

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

ELISABETI DA SILVA COUGO

**ESTIMATIVA DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO CARVÃO MINERAL DE
CANDIOTA (RS) A PARTIR DA ANÁLISE IMEDIATA**

**Bagé
2021**

ELISABETI DA SILVA COUGO

**ESTIMATIVA DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO CARVÃO MINERAL DE
CANDIOTA (RS) A PARTIR DA ANÁLISE IMEDIATA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Modelagem Computacional em Ensino, Experimentação e Simulação da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Especialista em Modelagem Computacional em Ensino, Experimentação e Simulação.

Orientadora: Dra. Profa. Francieli Aparecida Vaz

Coorientador: Dr. Prof. Rodolfo Rodrigues

**Bagé
2021**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

C43e Cougo, Elisabeti
Estimativa da composição elementar do carvão mineral de Candiota (RS) a partir da análise imediata / Elisabeti Cougo.

33 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) --
Universidade Federal do Pampa, ESPECIALIZAÇÃO EM
MODELAGEM COMPUTACIONAL EM ENSINO, EXPERIMENTAÇÃO E
SIMULAÇÃO, 2021.

"Orientação: Francieli Vaz".

1. Análise elementar. 2. Análise imediata. 3.
Carvão mineral. 4. Candiota. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Univerdisade Federal do Pampa

ELISABETI DA SILVA COUGO

**ESTIMATIVA DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DO CARVÃO MINERAL DE
CANDIOTA (RS) A PARTIR DA ANÁLISE IMEDIATA**

Monografia apresentadas ao Programa de Modelagem Computacional em Ensino, Experimentação e Simulação da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Especialista em Modelagem Computacional em Ensino, Experimentação e Simulação.

Monografia defendida e aprovada em: 23 de abril de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dra. Francieli Aparecida Vaz
Orientadora
UNIPAMPA

Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues
Coorientador
UFSM

Profa. Dra. Vera Lucia Duarte Ferreira
UNIPAMPA

Prof. Dr. Nilo Eduardo Kehrwald Zimmermann
UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **Rodolfo Rodrigues, Usuário Externo**, em 30/04/2021, às 20:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **FRANCIELI APARECIDA VAZ, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 30/04/2021, às 20:23, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **NILO EDUARDO KEHRWALD ZIMMERMANN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 03/05/2021, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VERA LUCIA DUARTE FERREIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/05/2021, às 14:36, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0515496** e o código CRC **15C93382**.

AGRADECIMENTO

Ao final desta caminhada necessito agradecer de forma especial:

À Deus pela vida que me concedeu, pela família e amigas que colocou em meu caminho.

Ao Professor Rodolfo Rodrigues pela orientação e pelos ensinamentos durante a realização deste trabalho, pela sua dedicação, atenção e paciência, assim como, ter aceitado ao convite a me orientar.

A Professora Francieli Aparecida Vaz pelos seus ensinamentos, pela sua atenção e dedicação, e por ter se disponibilizado a me orientar.

Aos professores da Especialização pelos seus ensinamentos e comprometimento com a nossa formação.

Aos colegas da especialização pela parceria e pelos momentos alegres vivenciados no decorrer do curso, em especial as minhas amigas, Bruna, Geovana e Daiane.

À Universidade Federal do Pampa por me proporcionar mais esta conquista através de um ensino público e de qualidade.

RESUMO

A composição do carvão mineral pode ser avaliada com relação a sua análise imediata e análise elementar. A análise imediata é simples e barata de se realizar ao passo que a análise elementar é mais complexa e cara por exigir equipamentos especiais. Um recurso útil para a avaliação de carvão mineral é a obtenção de sua análise elementar a partir de sua análise imediata. Para este trabalho tem-se como objetivo obter correlações lineares e não-lineares a partir de dados da análise imediata de cinza, matéria volátil e carbono fixo e análise elementar para estimar o teor de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio do carvão mineral de Candiota – RS. Para estimar suas respectivas composições elementares, um conjunto de 20 análises experimentais da literatura foi utilizado para se obter correlações de 1ª, 2ª e 3ª ordens, as mesmas foram avaliadas a partir dos seguintes parâmetros estatísticos: erro relativo médio, desvio padrão médio e coeficiente de determinação. A estimativa dos parâmetros foi obtida a partir da ferramenta *solver* do *software LibreOffice Calc* versão 7.1.0.3 (x64) utilizando o critério de maximização do coeficiente de determinação. As correlações obtidas para o carbono apresentaram coeficientes de determinação de 0,52 a 0,86, para o hidrogênio de 0,77 a 0,83, para o oxigênio de 0,77 a 0,94 e para o nitrogênio de 0,39 a 0,64. Os melhores resultados foram alcançados para as correlações de 3ª ordem pois obtiveram os maiores coeficientes de determinação. Os erros relativos médios obtidos para as correlações de 3ª ordem foram de respectivamente de 4,66%, 5,42%, 7,26% e 7,71% para carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio. As correlações de 3ª ordem, obtidas neste trabalho, foram significativas quando comparadas a correlações de outros autores. O *LibreOffice Calc* mostrou-se uma ferramenta eficiente para encontrar as correlações, além de ser um *software* livre e de fácil operação. Por fim, ressaltamos que as correlações são recursos importantes para aplicação em estudos de modelagem e simulação de processos.

Palavras-Chave: Análise elementar. Análise imediata. Carvão mineral. Candiota.

ABSTRACT

The composition of the coal can be evaluated in relation to its proximate analysis and ultimate analysis. Proximate analysis is simple and inexpensive to perform, while ultimate analysis is more complex and expensive because it requires special equipment. A useful resource for the evaluation of coal is to obtain its elementary analysis from its immediate analysis. For this work we aim to obtain linear and non-linear correlations from data from the immediate analysis of ash, volatile matter and fixed carbon and elementary analysis to estimate the carbon, hydrogen, oxygen and nitrogen content of Candiota coal. To estimate their respective elementary compositions, a set of 20 experimental analyzes of the literature was used to obtain correlations of 1st, 2nd and 3rd orders, they were evaluated using the following statistical parameters: average relative error, average standard deviation and coefficient of determination. The parameter estimation was obtained using the LibreOffice Calc software version 7.1.0.3 (x64) solver tool using the determination coefficient maximization criterion. The correlations obtained for carbon showed coefficients of determination from 0.52 to 0.86, for hydrogen from 0.77 to 0.83, for oxygen from 0.77 to 0.94 and for nitrogen from 0.39 to 0.64. The best results were achieved for the 3rd order correlations as they obtained the highest determination coefficients. The average relative errors obtained for the 3rd order correlations were 4.66%, 5.42%, 7.26% and 7.71% for carbon, hydrogen, oxygen and nitrogen, respectively. The 3rd order correlations, obtained in this work, were significant when compared to other authors' correlations. LibreOffice Calc proved to be an efficient tool for finding correlations, in addition to being free and easy to operate. Finally, we emphasize that the correlations are important resources for application in studies of modeling and process simulation.

Keywords: Ultimate analysis. Proximate analysis. Coal. Candiota.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Jazida de carvão mineral de Candiota	13
Figura 2 – Localização do município de Candiota.....	14
Figura 3 – Coeficientes de determinação obtidos	25
Figura 4 – Qualidade das correlações propostas para estimar a composição de C, H, O, N.....	27
Figura 5 – Correlações obtidas X correlações da literatura	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação do carvão mineral.....	17
Tabela 2 – Conjunto de análises imediatas e elementares utilizadas	21
Tabela 3 – Qualidade do ajuste obtido pelas correlações propostas	25
Tabela 4 – Faixas de validade das correlações	28

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ASH – Cinza

b.s. – Base seca

DPM – Desvio padrão médio

ERM – Erro relativo médio

FC – Carbono fixo

n – Número de conjuntos de análises experimentais avaliadas

PCS – Poder calorífico superior

R^2 – Coeficiente de determinação

RS – Rio Grande do Sul

v_{est} – Valor estimado

v_{exp} – Valor experimental

$\overline{v_{exp}}$ – Média aritmética simples de valores experimentais

VM – Matéria volátil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Geral	15
1.2.2 Específicos	16
1.3 Estrutura do trabalho.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Carvão mineral.....	17
2.2 Análise imediata.....	18
2.3 Análise elementar	19
2.4 Correlações entre análise imediata e elementar	19
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
5 CONCLUSÕES	30
REFERÊNCIAS	31

1 INTRODUÇÃO

O carvão mineral tem origem há milhares de anos sendo encontrado no subsolo, em depósitos, sua formação se dá por meio da decomposição da matéria orgânica na ausência do oxigênio. É utilizado pelas usinas termoelétricas para a produção de energia. Segundo Nunes (2012), cerca de 40% da oferta de energia elétrica mundial vem do carvão mineral. No Brasil as reservas são estimadas em 7.10^9 tep (toneladas equivalentes de petróleo) e estão localizadas nos estados da região sul Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Este carvão representa 30% dos recursos energéticos fósseis. A abundância de carvão mineral, encontrado nas reservas, como por exemplo a de Candiota, no qual a facilidade de extração favorece o seu uso, e por ter uma mina a céu aberto, se tornou muito atrativo para a construção de usinas termoelétricas. O que favorece o desenvolvimento econômico da região. Porém, a utilização do carvão mineral tem seu lado desfavorável, a poluição. O mesmo combustível que gera energia é altamente poluente, contudo, se aliado a tecnologias limpas a sua utilização se torna favorável.

Na cidade de Candiota que se encontra na metade sul do Estado do Rio Grande do Sul, localizada a 387 km da capital, Porto Alegre, se encontra a maior jazida a céu aberto de carvão mineral do Brasil, Figura 1.

Figura 1 - Jazida de carvão mineral de Candiota



Fonte: COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO (2020).

De acordo com a Prefeitura Municipal de Candiota (2020), o município, Figura 2, tem um subsolo rico em carvão mineral e calcário, o que o torna o centro de geração de energia termoelétrica e de produção de cimento pozolânico. Segundo a Companhia Riograndense de Mineração (2020), as reservas de carvão são de 1 bilhão de toneladas, com uma profundidade de até 50 metros.

Figura 2 - Localização do município de Candiota



Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE CANDIOTA – RS (2020)

A composição de um carvão mineral pode ser avaliada a partir de sua análise imediata e de sua análise elementar. A análise imediata é utilizada para quantificar as frações que constituem uma amostra e a análise elementar determina a quantidade de cada elemento químico na amostra. A análise imediata inclui os percentuais mássicos, em base seca, de cinza (ASH), matéria volátil (VM) e carbono fixo (FC). A análise elementar inclui os percentuais mássicos, em base seca, de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N).

Na literatura há estudos em que se obtém a análise elementar a partir da análise imediata, como, por exemplo, Yi *et al.* (2017), que utilizaram correlações matemáticas

para prever a análise elementar usando a análise imediata. Akkaya (2019) também utilizou modelos matemáticos para prever a análise elementar usando informações da análise imediata. A análise por correlação mede o grau de relação entre as variáveis e é classificada de acordo com o coeficiente de correlação.

Na análise imediata são realizadas sucessivas perdas de massa pelo aquecimento de uma amostra de carvão mineral para quantificação das frações de matéria volátil, carbono fixo e cinzas. Na análise elementar ocorre a combustão completa da amostra de carvão mineral e, posteriormente, os gases são analisados, necessitando de um equipamento mais sensível e de alto custo de operação. Isso faz com que o uso de correlações matemáticas que permitam prever a composição elementar de um carvão mineral a partir de dados da análise imediata seja um recurso útil.

Partindo da necessidade econômica de se obter uma análise elementar a partir de uma análise mais simples, este trabalho busca discutir a utilização de correlações matemáticas para alcançar-se resultados significativos para análise elementar a partir da análise imediata. A seguir apresentamos a justificativa que possibilitou que este trabalho pudesse ser desenvolvido, bem como os objetivos, geral e específicos.

1.1 Justificativa

A análise elementar tem um alto custo para ser realizada, em contrapartida a análise imediata é de fácil obtenção, além de ser de baixo custo. Desta forma torna-se atrativo obter a análise elementar a partir da análise imediata através de correlações matemáticas. Além do que a obtenção destas correlações é uma ferramenta útil para aplicações em modelagem e simulação de processos de conversão termoquímica do carvão mineral.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Obter correlações lineares e não-lineares entre as composições da análise imediata do carvão mineral de Candiota para estimar suas respectivas composições elementares.

1.2.2 Específicos

- Obter dados de análises imediata e elementar de carvão mineral de Candiota, a partir da literatura.
- Ajustar correlações lineares e não-lineares a partir dos teores de carbono fixo, matéria volátil e cinza para estimar as composições de C, H, O e N.
- Utilizar a ferramenta *solver* do pacote *LibreOffice* para obter os parâmetros das correlações.
- Comparar as correlações obtidas com correlações da literatura.

1.3 Estrutura do Trabalho

No presente trabalho já apresentamos a introdução, bem como a justificativa e os objetivos geral e específicos. A seguir, no capítulo 2, mostraremos o referencial teórico, onde abordaremos os tópicos sobre o carvão mineral, análise imediata, análise elementar e correlações da literatura. Os procedimentos metodológicos serão apresentados na sequência com o capítulo 3. Posteriormente, os capítulos 4 e 5, poderemos ver os resultados e as discussões deste trabalho e por fim, no capítulo 6, as conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carvão Mineral

De acordo com Nunes (2012) o carvão mineral é considerado uma rocha sedimentar orgânica que se forma por meio de uma mistura heterogênea de materiais orgânicos. A formação das camadas de carvão mineral ocorre após contínuos soterramentos de florestas em áreas pantanosas que sofrem a ação da pressão, temperatura, bactérias e agentes anaeróbicos que transformam a massa celulósica em massa carbonosa. Para ocorrer a transformação da matéria vegetal em carvão é necessário que o carvão sofra a ação das bactérias (processo bioquímico) e conseqüentemente, ocorram mudanças químicas e físicas (carbonificação). A carbonização depende de fatores como, por exemplo, profundidade, ação do calor por compressão, tipo de vegetação, pressão resultante da compressão. Tais fatores influenciam diretamente na classificação do carvão, ou seja, seu grau de maturação, pois o grau de carbonificação é o enriquecimento do carvão em carbono fixo. A Tabela 1 mostra a classificação do carvão mineral.

Tabela 1 – Classificação do carvão mineral

Tipo	Matéria volátil (% mássico, b.s.)	Carbono fixo (% mássico, b.s.)	Poder calorífico superior (PCS) (MJ/kg, b.s.)
Antracito	< 8	> 92	36–37
Betuminoso	8–22	78–92	32–36
Sub-betuminoso	22–27	73–78	28–32
Linhito	27–35	65–73	26–28

Fonte: Higman; van der Burgt (2008).

Podemos perceber que o carvão antracito tem um teor de carbono fixo maior do que 92%, sendo considerado o mais valorizado pelos seus baixos teores de impurezas, matéria volátil e umidade e com maior produção energética, pois tem uma queima poderosa e estável por um período longo. O carvão betuminoso contém maior teor de matéria volátil e umidade. Já o carvão sub-betuminoso, encontrado na jazida de Candiota, tem um baixo poder calorífico, com um teor de carbono fixo também baixo. Por fim, o carvão linhito é caracterizado pelos altos teores de cinza e umidade, e um baixo teor de carbono fixo. Segundo Avila (2018), de acordo com a classificação

do carvão, que inclui poder calorífico e sua composição, o mesmo poderá ter diversas aplicações. O carvão linhito é usado para geração de calor e em alguns processos industriais para gerar vapor de água. O carvão sub-betuminoso é utilizado na geração de energia elétrica e em processos industriais, já o carvão betuminoso além de ser usado para a produção de vapor para a geração de energia elétrica, pode ser usado também para a obtenção de aço. O carvão antracito, com melhor classificação, tem uma ampla variedade de aplicações, que vai desde a geração de calor ou vapor para indústrias de aço e ferro, corantes, fabricação de borracha sintética, até mesmo na purificação de água para consumo.

2.2 Análise Imediata

Partindo da compreensão de que um laboratório é um local onde se realizam experimentos e este espaço deve estar provido de equipamentos específicos para os experimentos que se deseja realizar, bem como equipamentos de segurança e etc., os equipamentos devem estar de acordo com a área de estudos na qual se deseja trabalhar, seja na Química Orgânica, Inorgânica ou Analítica, por exemplo. Para que as análises químicas ocorram, os padrões exigidos devem ser rigorosamente seguidos, afim de que se tenha um resultado confiável, ou seja, obedecer a todas as técnicas laboratoriais necessárias para se identificar, por exemplo, uma substância presente em uma amostra e, também seu teor, se assim desejar. A análise imediata consiste em isolar espécies químicas presentes em uma amostra e para utilizar esta análise é necessário saber qual o tipo de amostra e qual substância se deseja identificar, posteriormente, deve-se verificar na literatura quais procedimentos devem ser seguidos para que se consiga analisar corretamente.

A análise imediata é considerada simples onde se identifica o teor de umidade (ABNT NBR 8293, 1983), matéria volátil (ABNT NBR 8290, 1983), cinza (ABNT NBR 8289, 1987) e carbono fixo (ABNT NBR 8299, 1983) na amostra de carvão mineral. O teor de matéria volátil indica a fração de substâncias voláteis que se desprendem durante o aquecimento do carvão. Já o teor de cinzas indica a fração de resíduo mineral da combustão completa do carvão. E, por fim, o teor de carbono fixo indica a fração de carbono disponível no carvão e é encontrado pela diferença entre 100% e a soma dos teores de umidade, matéria volátil e cinza. Segundo Vieira (2017) os

combustíveis com quantidade de carbono fixo elevada, contém um teor de matéria volátil baixo. Essa característica faz com que o carvão queime lentamente, com um maior tempo de residência na fornalha.

O teor de carbono fixo só é obtido após a retirada da matéria volátil. De acordo com Silva (2017) para se obter a quantidade de matéria volátil é necessário seguir um padrão de temperatura, razão de aquecimento e ambiente controlado porque a quantidade de matéria volátil pode variar se tais medidas não forem seguidas corretamente. Um alto teor de matéria volátil influencia na temperatura de ignição, quanto maior a quantidade, menor a temperatura.

2.3 Análise Elementar

A análise elementar, segundo Silva (2017), determina a composição elementar de uma amostra, onde são obtidos os valores da quantidade, em porcentagem de massa, de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S). De acordo com Central Analítica IQ-USP (2014) na análise elementar as amostras passam pela combustão completa, dentro de um ambiente com oxigênio puro. Logo em seguida, os gases que resultam desta combustão são quantificados em um detector de condutividade térmica.

Também, de acordo com a Central Analítica IQ-USP (2014), a análise elementar pode ser utilizada para analisar amostras de substâncias sólidas ou líquidas, por exemplo, amostras geológicas, ambientais, derivados do petróleo entre outros.

2.4 Correlações entre Análise Imediata e Análise Elementar

Uma correlação matemática pode expressar o grau de relacionamento entre as variáveis: teores de cinza, carbono fixo e matéria volátil para obter os teores de C, O, H e N. De acordo Silva (2017), o fato da análise elementar ter um alto custo, levou muitos autores a utilizarem a modelagem computacional para desenvolverem equações empíricas e a utilizarem bancos de dados, de análises imediatas disponíveis na literatura, para predizerem a composição elementar de C, O, N e H. Também, Ceylan e Sungur (2010), nos dizem que há anos vem sendo desenvolvido muitos

modelos empíricos, baseados em equações não-lineares, com o objetivo de determinar a análise elementar a partir da análise imediata do carvão.

Yi *et al.* (2017) nos relatam vários outros autores que também utilizaram correlações em seus trabalhos e obtiveram êxito em suas pesquisas. Um exemplo é Vakkilainen (2000) que utilizou correlações para estimar a relação de análise elementar e análise imediata para licor preto, um efluente líquido da indústria da celulose e papel. Há também o exemplo de Parikh; Channiwala; Ghosal (2007) que utilizaram correlações para obter a análise elementar a partir da análise imediata de diversas biomassas.

Parikh; Channiwala; Ghosal (2007) nos explicam que o carbono fixo indica a extensão da matéria orgânica não volátil que também contém oxigênio e hidrogênio, logo o conteúdo da matéria volátil reflete a extensão da matéria orgânica volátil na amostra. Considerando que ambas as análises indicam a presença de carbono, hidrogênio e oxigênio, em diferentes formas, é razoável considerar uma relação entre os resultados dessas duas análises. Diz-se então que os teores elementares de carbono, hidrogênio e oxigênio são proporcionais ao carbono e conteúdo de matéria volátil da amostra de biomassa.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este trabalho coletou dados de análises elementar e imediata na literatura de amostras do tipo de carvão mineral da jazida de Candiota. As análises imediatas incluíam os percentuais mássicos, em base seca, de cinza (ASH), matéria volátil (VM) e carbono fixo (FC). As análises elementares incluíam os percentuais mássicos, em base seca, de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O) e nitrogênio (N).

Um conjunto de 20 análises imediatas, selecionadas da literatura (KALKREUTH *et al.*, 2006; OLIVEIRA; KALKREUTH, 2010; KALKREUTH *et al.*, 2013) para obtenção de correlações de 1ª, 2ª e 3ª ordem. A Tabela 2 apresenta os valores das análises utilizadas neste trabalho.

Tabela 2 – Conjunto de análises imediatas e elementares utilizadas.

Nº	Análise imediata (% mássico, b.s.)			Análise elementar (% mássico, b.s.)			
	ASH	VM	FC	C	H	O	N
1	52,21	21,65	26,14	27,78	3,04	15,55	0,34
2	51,33	22,15	26,51	28,59	3,12	15,74	0,50
3	34,48	24,46	41,06	30,70	3,10	28,06	0,77
4	65,37	18,78	15,84	18,31	2,24	12,97	0,51
5	43,73	22,36	33,91	28,21	2,90	21,26	0,71
6	56,00	20,51	23,49	24,15	2,55	14,14	0,64
7	49,48	16,98	33,54	15,00	1,99	32,19	0,47
8	47,42	17,53	35,05	23,98	2,23	24,37	0,52
9	59,44	20,06	20,49	24,67	2,42	12,49	0,45
10	48,37	21,90	29,74	33,73	2,84	13,47	0,55
11	53,71	22,02	24,27	27,11	2,56	15,03	0,57
12	47,2	28,2	24,6	29,19	3,88	14,75	0,65
13	57,1	23,5	19,3	25,69	3,35	11,60	0,54
14	55,2	25,2	19,6	24,39	2,91	14,13	0,55
15	58,2	24,5	17,3	25,62	2,97	10,43	0,63
16	51,8	27,3	20,9	27,01	3,09	15,28	0,64
17	61,2	19,9	18,9	24,20	2,55	10,50	0,45
18	60,6	19,9	19,6	21,70	2,10	14,14	0,46
19	49,3	25,1	25,5	31,50	2,97	14,65	0,46
20	59,3	22,9	17,8	24,96	2,63	11,83	0,54

Fonte: Kalkreuth *et al.* (2006) (Nº 1 e 2); Oliveira; Kalkreuth (2010) (Nº 3 a 11); Kalkreuth *et al.* (2013) (Nº 12 a 20).

As correlações de 1ª e 2ª ordens foram baseadas nas correlações propostas por Yi *et al.* (2017) sendo que as correlações de 3ª ordem foram extrapolações das correlações de 2ª ordem do mesmo estudo. A correlação de 1ª ordem corresponde a uma correlação linear entre as análises elementar e imediata ao passo que as correlações de 2ª e 3ª ordens são correlações não-lineares entre as mesmas análises.

A correlação de 1ª ordem é apresentada a seguir:

$$X = a_1 \cdot \text{ASH} + a_2 \cdot \text{VM} + a_3 \cdot \text{FC} \quad (1)$$

onde X indica a composição de C, H, O ou N, conforme o caso, e a_1 , a_2 e a_3 são parâmetros ajustados a partir de dados experimentais.

A correlação de 2ª ordem é dada a seguir:

$$X = a_1 \cdot \text{ASH} + a_2 \cdot \text{ASH}^2 + a_3 \cdot \text{VM} + a_4 \cdot \text{VM}^2 + a_5 \cdot \text{FC} + a_6 \cdot \text{FC}^2 \quad (2)$$

onde a_1 a a_6 são parâmetros ajustados a partir de dados experimentais.

Por fim, a correlação de 3ª ordem é dada a seguir:

$$X = a_1 \cdot \text{ASH} + a_2 \cdot \text{ASH}^2 + a_3 \cdot \text{ASH}^3 + a_4 \cdot \text{VM} + a_5 \cdot \text{VM}^2 + a_6 \cdot \text{VM}^3 + a_7 \cdot \text{FC} + a_8 \cdot \text{FC}^2 + a_9 \cdot \text{FC}^3 \quad (3)$$

onde a_1 a a_9 são parâmetros ajustados a partir de dados experimentais.

As correlações propostas foram avaliadas a partir dos seguintes parâmetros estatísticos: erro relativo médio (ERM), desvio padrão médio (DPM) e coeficiente de determinação (R^2). Esses parâmetros estatísticos são calculados de acordo as expressões abaixo:

$$ERM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{v_{est} - v_{exp}}{v_{exp}} \right| \times 100\% \quad (4)$$

$$DPM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_{est} - v_{exp}}{v_{exp}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_{exp} - v_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (v_{exp} - \overline{v_{exp}})^2} \quad (6)$$

onde n é o número de conjuntos de análises experimentais consideradas, v_{est} é o valor estimado, v_{exp} é o valor experimental e $\overline{v_{exp}}$ é a média aritmética simples dos valores experimentais. Conforme Yi *et al.* (2017), ERM indica o grau de proximidade

entre valores estimados e valores experimentais ao passo que DPM indica quanto um valor estimado é subestimado ou superestimado em relação ao valor experimental. O valor de R^2 varia entre 0 e 1 e indica o ajuste das correlações propostas aos valores experimentais, ou seja, quanto maior o valor de R^2 melhor ele se ajusta aos dados.

A estimativa dos parâmetros foi obtida a partir da ferramenta *solver* do *software LibreOffice Calc* versão 7.1.0.3 (x64) (*The Document Foundation*). O pacote *LibreOffice* foi escolhido por ser uma ferramenta de uso livre e fácil utilização. O algoritmo *DEPS Evolutionary* (APACHE OPENOFFICE WIKI, 2012) da ferramenta *solver* foi selecionado para estimar os parâmetros ajustados a_1 a a_9 de modo a maximizar o parâmetro estatístico R^2 . O algoritmo foi utilizado assumindo suas configurações padrões (ciclos de aprendizagem: 2000, fator de escala máximo e mínimo: 0,5, limite de estagnação: 70, piso dos limites das variáveis: 3, coeficiente de constrição: 0,729, constante cognitiva e social: 1,494, taxa de alternância do agente: 0,5 e tolerância de estagnação: 10^{-6}).

Buscou-se também definir o intervalo de validade das correlações obtidas a partir dos valores mínimos e máximos de cada análise, além de, comparar as correlações obtidas neste trabalho com correlações similares da literatura. Nesta comparação foram utilizadas as correlações obtidas por Yi *et al.* (2017), Akkaya (2019) e Parikh; Channiwala; Ghosal (2007) para estimar o conjunto de análises elementares apresentada na Tabela 2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As correlações de 1º, 2º e 3º ordens obtidas neste trabalho são apresentadas nas Equações 7 a 18.

As correlações de 1ª ordem são apresentadas a seguir:

$$C = -0,0084 \cdot ASH + 0,943 \cdot VM + 0,215 \cdot FC \quad (7)$$

$$H = -0,00471 \cdot ASH + 0,13 \cdot VM + 0,00486 \cdot FC \quad (8)$$

$$O = 0,0664 \cdot ASH - 0,289 \cdot VM + 0,771 \cdot FC \quad (9)$$

$$N = -0,000446 \cdot ASH + 0,018 \cdot VM + 0,00604 \cdot FC \quad (10)$$

As correlações de 2ª ordem são dadas a seguir:

$$C = -2,568 \cdot ASH + 0,0176 \cdot ASH^2 + 8,252 \cdot VM - 0,179 \cdot VM^2 + 1,915 \cdot FC - 0,0444 \cdot FC^2 \quad (11)$$

$$H = -0,0321 \cdot ASH + 0,0000342 \cdot ASH^2 + 0,255 \cdot VM - 0,00331 \cdot VM^2 + 0,0468 \cdot FC - 0,00119 \cdot FC^2 \quad (12)$$

$$O = 2,673 \cdot ASH - 0,0197 \cdot ASH^2 - 6,746 \cdot VM + 0,157 \cdot VM^2 - 1,116 \cdot FC + 0,045 \cdot FC^2 \quad (13)$$

$$N = 0,00664 \cdot ASH - 0,00002 \cdot ASH^2 + 0,0287 \cdot VM - 0,000118 \cdot VM^2 - 0,0355 \cdot FC + 0,000843 \cdot FC^2 \quad (14)$$

Por fim, as correlações de 3ª ordem são dadas a seguir:

$$C = 17,813 \cdot ASH - 0,571 \cdot ASH^2 + 0,00351 \cdot ASH^3 + 72,697 \cdot VM - 3,526 \cdot VM^2 + 0,0482 \cdot VM^3 - 3,039 \cdot FC - 0,396 \cdot FC^2 + 0,00534 \cdot FC^3 \quad (15)$$

$$H = 0,263 \cdot ASH - 0,0176 \cdot ASH^2 + 0,0001 \cdot ASH^3 + 6,968 \cdot VM - 0,333 \cdot VM^2 + 0,00481 \cdot VM^3 - 0,805 \cdot FC - 0,000729 \cdot FC^2 + 0,0000516 \cdot FC^3 \quad (16)$$

$$O = -11,941 \cdot ASH + 0,477 \cdot ASH^2 - 0,00285 \cdot ASH^3 - 105,196 \cdot VM + 5,1 \cdot VM^2 - 0,0717 \cdot VM^3 + 9,708 \cdot FC + 0,251 \cdot FC^2 - 0,00376 \cdot FC^3 \quad (17)$$

$$N = -0,481 \cdot ASH + 0,00872 \cdot ASH^2 - 0,00006 \cdot ASH^3 + 2,291 \cdot VM - 0,105 \cdot VM^2 + 0,00155 \cdot VM^3 - 0,485 \cdot FC + 0,0142 \cdot FC^2 - 0,000152 \cdot FC^3 \quad (18)$$

As correlações foram obtidas em condições ótimas dos parâmetros estatísticos (Equações (4), (5) e (6)) pelo *solver* do *LibreOffice Calc* conforme a Tabela 3, que

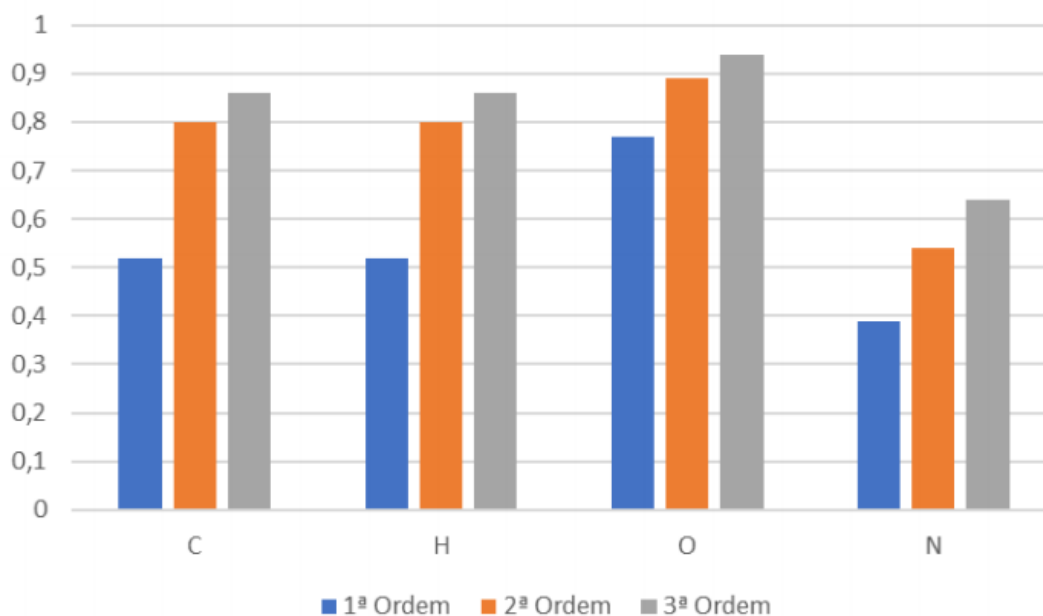
apresenta a qualidade do ajuste obtido pelas correlações apresentadas nas Equações 7 a 18. A Figura 3 compara os valores obtidos para os coeficientes de determinação das respectivas correlações propostas.

Tabela 3 – Qualidade do ajuste obtido pelas correlações propostas.

		ERM (%)	DPM (%)	R ²
1ª ordem	C	8,78	1,72	0,52
	H	6,02	0,59	0,77
	O	12,34	1,81	0,77
	N	11,22	2,29	0,39
2ª ordem	C	5,78	0,69	0,80
	H	5,84	0,51	0,79
	O	8,42	1,03	0,89
	N	9,06	1,79	0,54
3ª ordem	C	4,66	0,40	0,86
	H	5,42	0,40	0,83
	O	7,26	0,70	0,94
	N	7,71	1,49	0,64

Fonte: Autora

Figura 3 - Comparação dos coeficientes de determinação obtidos para as correlações propostas



Fonte: Autora

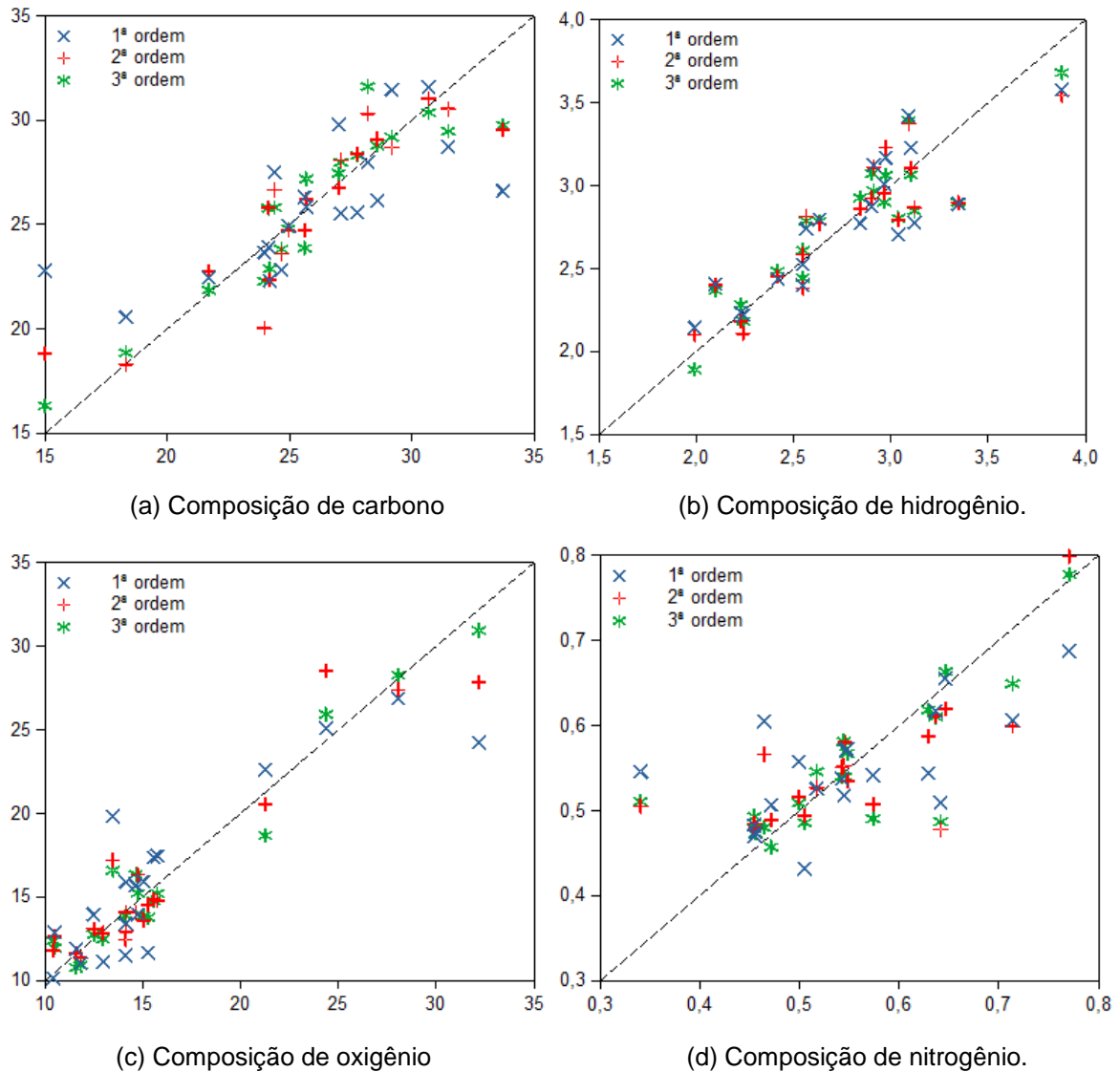
A partir da Tabela 3 é possível observar que as correlações para estimar a composição do elemento carbono a partir da análise imediata obtiverem R^2 de 0,52,

para 1ª ordem, 0,80 para 2ª ordem e 0,86 para 3ª ordem. Isto evidenciou que o valor do coeficiente de determinação aumentou com o aumento da ordem das correlações. Isso também foi observado para os demais elementos: hidrogênio com R^2 de 0,77 a 0,83, oxigênio com R^2 de 0,77 a 0,94 e nitrogênio com R^2 de 0,39 a 0,64.

Na Tabela 3, percebemos que os valores de R^2 ficam melhores (ou seja, mais próximos de 1) conforme a ordem das correlações aumenta. Isto também é observado para os demais parâmetros estatísticos analisados: ERM e DPM. O aumento da ordem e do R^2 tornam o ajuste melhor e conseqüentemente a correlação, também. O gráfico apresentado na Figura 3 nos mostra os valores de R^2 de acordo com suas respectivas correlações de 1ª, 2ª e 3ª ordens apresentados na Tabela 3, onde foi possível observar as correlações que estimaram a composição do elemento carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio e visualizar que a correlação de 3ª ordem foi a que mais se aproximou de 1 para todos os elementos.

A seguir apresentamos a Figura 4 onde a qualidade das correlações pode ser observada nos gráficos de dispersão para as correlações de 1ª, 2ª e 3ª ordens com relação aos dados experimentais. Os gráficos de dispersão relacionam a composição elementar experimental (eixo da abscissa) com a composição elementar estimada (eixo da ordenada). A região próxima a linha tracejada indica boa concordância entre dados experimentais e estimados.

Figura 4 - Qualidade das correlações propostas para estimar a composição de C, H, O e N.



Fonte: Autora

Na Figura 4 observa-se a qualidade das correlações utilizadas para estimar a composição de C, H, O e N deste trabalho, aqui se analisa a comparação entre as correlações obtidas de 1ª, 2ª e 3ª ordem. Percebe-se, para a composição do carbono, que quanto maior a ordem da correlação mais próximo da linha os pontos se encontram. O mesmo ocorre com o hidrogênio e oxigênio. Quanto ao nitrogênio tem-se uma dispersão dos pontos, mas como os valores presentes nas amostras é muito baixo ele não é considerado nos resultados.

As correlações obtidas neste estudo têm validade para os intervalos apresentados na Tabela 4. Esses valores correspondem aos valores mínimos e máximos dos teores de cinza, matéria volátil e carbono fixo das análises imediatas utilizadas para obtenção das correlações.

Tabela 4 – Faixas de validade das correlações

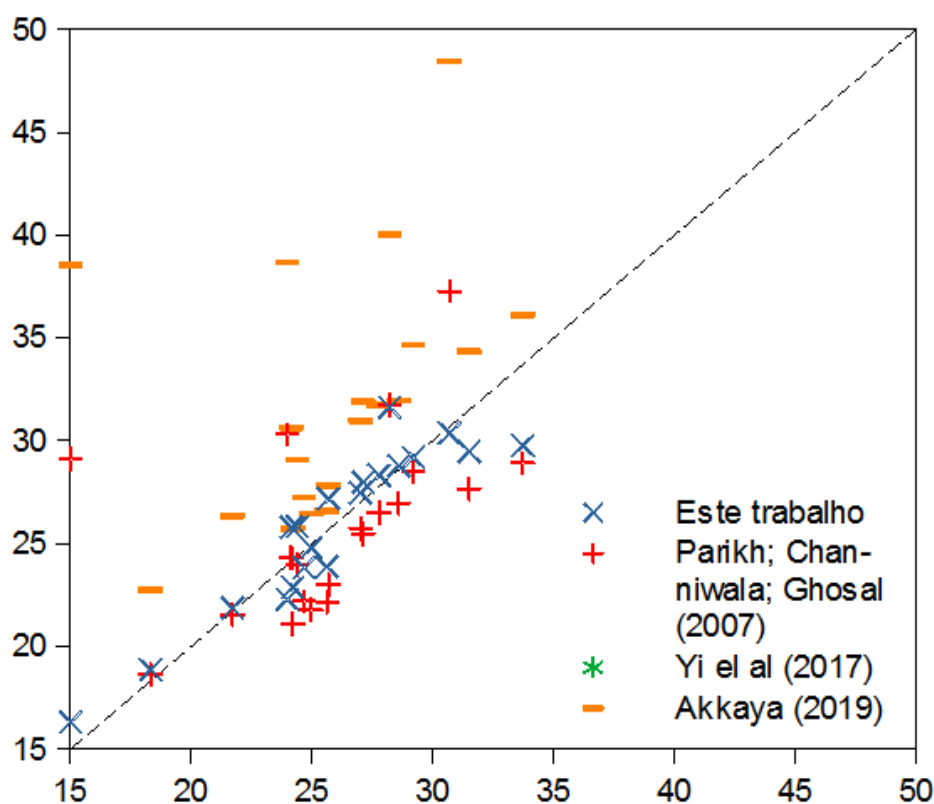
		Mínimo	Máximo
Análise imediata (% mássico, b.s.)	ASH	34,48	65,37
	VM	16,98	28,20
	FC	15,84	41,06
Análise elementar (% mássico, b.s.)	C	15,00	33,73
	H	1,99	3,88
	O	10,43	32,19
	N	0,34	0,77

Fonte: Autora

Para a análise elementar temos os valores mínimo de 15% e máximo de 33,73% para a composição de carbono. Para os demais elementos esses percentuais são de 1,99% mínimo e máximo de 3,88 % para o hidrogênio, enquanto que para o oxigênio os valores de mínimo são 10,43 % e 32,19% de máximo. Por fim, para o nitrogênio os valores de mínimo e máximo são respectivamente 0,34 % e 0,77 %. Os valores de mínimo e máximo são definidos como extremos, ou seja, para serem validados devem estar dentro dessa faixa de porcentagem. Desta forma, a qualidade dos ajustes apresentada na Tabela 3 somente é garantida se obedecidos os intervalos mínimo e máximo apresentados na Tabela 4.

A seguir podemos observar uma comparação das correlações obtidas neste trabalho com as correlações da literatura (YI *et al.*, 2017; AKKAYA, 2019; PARIKH; CHANNIWALA; GHOSAL, 2007) para a composição do carbono da análise imediata do carvão mineral de Candiota - RS.

Figura 5 – Comparativo entre correlações para estimar a composição de carbono do carvão mineral de Candiota



Fonte: Autora

Analisando-se a Figura 5 percebe-se que as correlações, de 3ª ordem, obtidas neste trabalho, utilizando a ferramenta *solver* do pacote *LibreOffice* para obtê-las, foram significativas quando comparadas a outros autores. É possível observar que a correlação de Parikh; Channiwala; Ghosal (2007) subestimou e superestimado vários pontos, sendo justificado pelo fato de a correlação em questão ser para biomassa embora ela tenha se saído melhor do que as correlações testadas para carvão mineral (YI et al. 2017; AKKAYA, 2019). Para este gráfico os valores de YI et al. (2017) não estão dentro da escala, logo os mesmos não aparecem. Akkaya (2019), embora tenha alguns pontos dispersos, se mantém bem próximo à linha de 45°, este resultado se dá pelo fato de ter um banco de dados bem alto, 6277 amostras de carvão mineral. Neste trabalho pode-se observar que os pontos estão bem próximos da reta de correlação, embora possua poucos dados, os resultados foram satisfatórios.

5 CONCLUSÕES

O carvão mineral é uma das fontes energéticas mais significativas na região que ficam as Usinas termelétricas de Candiota, no sul do Rio Grande do Sul, além de sua importância energética, a economia da região gira em torno dessa matéria. Dessa forma, aprender e pesquisar nesta área é de suma importância para o desenvolvimento e formas de controle, como por exemplo, a poluição que isso pode causar.

Neste estudo, trabalhamos para obter correlações lineares e não-lineares entre as composições da análise imediata do tipo de carvão mineral de Candiota para estimar suas respectivas composições elementares.

A partir de um conjunto de 20 dados da literatura de análises imediata e elementar sobre este carvão, as correlações foram estimadas. Apesar de ser um número pequeno de dados, os resultados foram significativos, pois de acordo com a análise da Figura 5, onde se fez o comparativo entre as correlações obtidas neste trabalho e as correlações de outros autores, os valores ficaram próximos aos dados encontrados na literatura. E, também, de acordo com os valores obtidos em R^2 que ficaram próximos de 1. Para estas correlações obtidas neste trabalho o *software LibreOffice Calc* mostrou-se uma ferramenta eficiente para encontrar as correlações, além de ser um *software* livre e de fácil operação.

Por fim, ressaltamos que as correlações são recursos importantes para aplicação em estudos de modelagem e simulação de processos. As correlações deste trabalho foram satisfatórias, entretanto, os resultados podem ser melhor ajustados adotando, por exemplo, correlações não lineares e utilizando mais dados experimentais, ficando assim como uma sugestão para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- AKKAYA, A. V. Predicting coal elemental components from proximate analysis: explicit versus implicit nonlinear models. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [S. l.], p. 1–13, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1640812>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15567036.2019.1640812>. Acesso em: 14 mar. 2021.
- APACHE OPENOFFICE WIKI. **NLPSolver**, 29 ago. 2012. Disponível em: https://wiki.openoffice.org/wiki/NLPSolver#DEPS_-_Differential_Evolution_.26_Particle_Swarm_Optimization. Acesso em: 14 mar. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8289**: Carvão mineral - Determinação do teor de cinzas. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8290**: Carvão mineral - determinação do teor de matérias voláteis. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8293**: Carvão mineral - determinação de umidade. Rio de Janeiro, 1983.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8299**: Carvão mineral - determinação de carbono fixo. Rio de Janeiro, 1983.
- AVILA, J. F. T. **Caracterização química e avaliação dos efeitos toxicológicos *in silico*, *in vitro* e *in vivo* do carvão betuminoso e sub-betuminoso da Colômbia**. 2018. Tese (Doutorado em Biologia Celular e Molecular) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Biologia Celular e Molecular. Porto Alegre, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/180602>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- BRAGANÇA, S. R. **Dessulfuração do gás de combustão do carvão Candiota em leite fluidizado**: influência da razão molar Ca/S, granulometria e composição química do sorbente. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 1996. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/122566>. Acesso em: 14 mar. 2021.
- CENTRAL ANALÍTICA IQ-USP. **Análise elementar – CHN**, 2014. Disponível em: http://ca.iq.usp.br/novo/paginas_view.php?idPagina=7. Acesso em: 31 mar. 2021.
- CEYLAN, Z.; SUNGUR, B. Estimation of coal elemental composition from proximate analysis using machine learning techniques. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, [S. l.], v. 42, n. 20, p. 2576–268, dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1790696>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15567036.2020.1790696>. Acesso em: 14 mar. 2021.

COMPANHIA RIOGRANDENSE DE MINERAÇÃO. **Mina de Candiota**, [2020]. Disponível em: http://www.crm.rs.gov.br/conteudo/858/?Mina-de-Candiota#.XmZTZ_IKhdg. Acesso em: 8 mar. 2020.

HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. **Gasification**. 2. ed. Burlington: Gulf Professional Publishing, 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750685283>. Acesso em: 14 mar. 2021.

KALKREUTH, W. *et al.* Petrology and chemistry of Permian coals from the Paraná Basin: Santa Terezinha, Leão-Butiá and Candiota coalfields, Rio Grande do Sul, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, [S. l.], v. 68, n. 1–2, p. 79–116, ago. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2005.10.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516206000231>. Acesso em: 14 mar. 2021.

KALKREUTH, W. *et al.* The lower and upper coal seams of the Candiota Coalfield, Brazil – Geological setting, petrological and chemical characterization, and studies on reactivity and beneficiation related to their combustion potential. **International Journal of Coal Geology**, [S. l.], v. 111, p. 53–66, maio 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.09.013>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016651621200225X>. Acesso em: 14 mar. 2021.

NUNES, K. G. P. *et al.* Cinética da oxidação do carvão da mina de Candiota – RS com alto teor de cinzas. *In*: XX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20., 2014, Florianópolis. **Anais [...]**. São Paulo: Blucher, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-0700-24377-174962>. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/download-pdf/245/17906>. Acesso em: 14 mar. 2021.

NUNES, K. G. P. **Determinação dos parâmetros cinéticos da reação de oxidação de carvão mineral**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Porto Alegre, 2012. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/76233>. Acesso em: 14 mar. 2021.

OLIVEIRA, J. S. de; KALKREUTH, W. Sequence stratigraphy, organic petrology and chemistry applied to the upper and lower coal seams in the Candiota Coalfield, Paraná Basin, RS, Brazil. **International Journal of Coal Geology**, [S. l.], v. 84, n. 3–4, p. 258–268, dez. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2010.08.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0166516210001667>. Acesso em: 14 mar. 2021.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, [S. l.], v. 86, n. 12–13, p. 1710–1719, ago. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236107000294>. Acesso em: 31 mar. 2021.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CANDIOTA – RS. **Localização e distâncias**, fev. 2016. Disponível em: <https://www.candiota.rs.gov.br/localizacao-e-distancias>. Acesso em: 8 mar. 2020.

SILVA, J. C. G. **Estudo dos parâmetros cinéticos da pirólise do bagaço de cana-de-açúcar**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis, João Pessoa, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/12765>. Acesso em: 31 mar. 2021.

SOUSA, F. de. **Extração e caracterização de ácido húmico do carvão Candiota e avaliação reológica do seu uso como defloculante em uma suspensão de alumina**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/171400>. Acesso em: 14 mar. 2021.

VAKKILAINEN, E. K. Estimation of elemental composition from proximate analysis of black liquor. **Paperi Ja Puu**, [S. l.], v. 82, n. 7, p. 450-454, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/292228646_Estimation_of_elemental_composition_from_proximate_analysis_of_black_liquor. Acesso em: 31 mar. 2021.

VIEIRA, S. M. M. **Produção de carvão vegetal para fins energéticos a partir da carbonização de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) e sua briquetagem com diferentes agentes aglutinantes**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São João Del Rei, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Ouro Branco, 2017. Disponível em: [https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgeq/Dissertacao Sabrina Mara de Macedo Vieira.pdf](https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgeq/Dissertacao%20Sabrina%20Mara%20de%20Macedo%20Vieira.pdf). Acesso em: 31 mar. 2021.

YI, L. *et al.* Prediction of elemental composition of coal using proximate analysis. **Fuel**, [S. l.], v. 193, p. 315–321, abr. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.12.044>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236116312753>. Acesso em: 14 mar. 2021.