

COMBUSTÃO DE CARVÃO E BIOMASSA EM FORNO DTF

Claudia Cristina ROHLOFF¹; Juliana Gonçalves POHLMANN²; Isaías Mortari MACHADO³; Renan Balbinotti KOPS⁴; Fernando Marcelo PEREIRA⁵

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, claudia.rohloff@yahoo.com.br; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, juliana.pohlmann@ufrgs.br; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, imortarim@gmail.com; ⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul, rekops@gmail.com; ⁵Universidade Federal do Rio Grande do Sul, fernando.pereira@ufrgs.br.

RESUMO

O carvão responde pela maior parte da produção da eletricidade em vários países, e é o combustível mais queimado em caldeiras de usinas termelétricas no mundo, sendo assim uma das principais fontes de gases de efeito estufa. A biomassa de madeira é um combustível renovável, e o dióxido de carbono tem um ciclo curto nos processos de oxidação das biomassas. Este estudo teve como principais objetivos comparar a combustão de dois carvões minerais (um brasileiro e outro colombiano) e um carvão vegetal em um forno tubular de queda livre, comumente chamado de forno DTF (Drop Tube Furnace). Um DTF consiste em um reator cilíndrico vertical, com aquecimento homogêneo, onde a combustão de partículas de um combustível sólido ocorre em taxas de aquecimento da ordem de 10^4 , semelhante às que ocorrem em caldeiras de leito pulverizado. Recentemente foi construído no Laboratório de Combustão do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS um forno DTF com 1,340 m de altura útil e que opera até 1200°C. A combustão foi avaliada a 1100°C em termos de *burnout* e espécies químicas ao longo do comprimento do reator. Dos resultados obtidos, o carvão colombiano apresentou maior combustibilidade, alcançando *burnouts* mais elevados do que o carvão brasileiro e o carvão vegetal. O carvão vegetal e o carvão brasileiro obtiveram *burnouts* semelhantes ao longo do comprimento do forno. O carvão vegetal liberou mais CO que os carvões minerais no início da combustão. A emissão de NO foi mais alta na combustão do carvão colombiano e do carvão vegetal porque estes concentram mais nitrogênio em sua estrutura. As emissões de SO₂ também foram proporcionais ao teor de enxofre nos carvões, de maneira que o carvão brasileiro apresentou as maiores concentrações, seguido pelo carvão colombiano e por último, o carvão vegetal.

Palavras-chave: Combustão. Carvão. Biomassa. *Drop tube furnace*.

ABSTRACT

Coal is responsible for the most of electricity production in many countries, and it is the most used fuel in boilers of thermoelectric power plants in the world, being one of the main source of greenhouse effect. Biomass of wood is a renewable fuel and carbon dioxide have a short circle in oxidation process of biomass. This study had as main objective to compare the combustion of two coals (one Brazilian and one Colombian coal) and a charcoal in a drop tube furnace. A DTF is a vertical cylindrical reactor with homogeneous heating, where the combustion of solid fuel particles occurs in similar conditions like pulverized bed boilers. Recently it was built a DTF with 1,340 m high that work until 1200°C in the Combustion Laboratory in the Mechanical Engineering Department of UFRGS. The combustion was available in terms of *burnout* and chemical species along the reactor. From the results obtained, the Colombian coal showed up more reactive because it was consumed more quickly reaching high *burnouts* than Brazilian coal and charcoal. The charcoal and the Brazilian coal showed similar *burnouts* along the furnace. The charcoal released more CO than the coals in the beginning of combustion. The NO emission was higher for the Colombian coal and the charcoal because they concentrate more nitrogen in their structure. The emission of SO₂ was proportional of Sulphur content in these coals, so the Brazilian coal presented the highest emission followed by the Colombian coal and the charcoal.

Key-Words: Combustion. Coal. Biomass. *Drop tube furnace*.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com dados da *International Energy Agency* (IEA, 2001), o carvão é a fonte mais utilizada

para geração de energia elétrica no mundo. Sua participação na produção global de energia primária, que considera outros usos além da produção de

energia elétrica, é de 26%. A IEA também projeta que o carvão se manterá no mesmo lugar no ranking nos próximos 30 anos. O carvão é abundante e tem baixo custo, relativamente a outras fontes.

Biomassa é uma fonte de energia renovável. Em 2015, a participação de renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo, correspondendo a 41,2% do total. Mundialmente, a participação de renováveis na matriz energética corresponde a 13,5% do total (BEN, 2016). As biomassas de origem vegetal absorvem dióxido de carbono durante seu crescimento através da fotossíntese, sendo consideradas neutras com respeito a estas emissões. Assim, com uma utilização sustentável, o dióxido de carbono gerado pela queima deste tipo de biomassa pode ser absorvido novamente pela natureza. O carvão vegetal é uma biomassa que passou por um processo de carbonização, processo no qual a biomassa é submetida a média temperatura (400 – 500°C) para decomposição principalmente da hemicelulose e celulose, gerando gases condensáveis (alcatrão) e não-condensáveis. As características do carvão vegetal tais como teor de voláteis e carbono, e consequentemente, poder calorífico, além de sua estrutura, estão relacionadas à temperatura final de carbonização (Pohlmann et al, 2014). O carvão vegetal tem baixa concentração de enxofre em sua estrutura, um dos fatores positivos para seu uso em caldeiras.

A caracterização experimental da queima de combustíveis sólidos, como carvão e biomassa, requer a reprodução de condições semelhantes às encontradas em fornos e caldeiras. O dispositivo deve ser capaz de acompanhar a evolução das partículas de combustível durante o seu histórico de queima e acessar as emissões gasosas produzidas. Adicionalmente deseja-se que o equipamento experimental permita a variação de parâmetros de queima como temperatura, tempo de residência e atmosfera. O forno de queda livre ou, *drop tube furnace* (DTF) na literatura inglesa, é um desses equipamentos.

O DTF consiste em um reator cilíndrico vertical, com aquecimento através de resistências elétricas. Partículas de combustíveis sólidos são continuamente alimentadas juntamente com um fluxo gasoso com velocidade inferior à velocidade terminal. As partículas se deslocam dentro do forno e podem ser coletadas em diferentes pontos, correspondendo a diferentes tempos de residência. No ponto de

coleta, as partículas são arrefecidas com um fluxo de nitrogênio a fim de cessar a reação. Para estudos de queima o gás pode ser ar atmosférico, produtos de combustão ou outras misturas com concentração controlada de oxigênio. Para estudos de pirólise as partículas podem ser introduzidas em uma atmosfera de nitrogênio.

O DTF é capaz de simular em laboratório as condições de trabalho de processos de combustão em grande escala, tais como altas temperaturas, altas taxas de aquecimento (na ordem de 10^4 °C/s) e tempos de residência na ordem de centésimos à décimos de segundo. Os fornos podem ser configurados para produzir resultados similares àqueles observados em queimadores reais por meio do ajuste de parâmetros operacionais como temperatura, velocidade do gás de arraste, tempo de residência da partícula e excesso de ar (Zimmer, 2012).

Através dos experimentos em fornos DTF pode-se caracterizar a eficiência de queima de combustíveis sólidos, o processo de liberação de voláteis, as emissões geradas e deposição de cinzas em superfícies. Com o auxílio de modelagem pode-se ainda extrair os parâmetros cinéticos de combustão e volatilização. Adicionalmente pode-se estudar os efeitos cinéticos de um determinado gás controlando-se a composição da atmosfera ou estudar os efeitos de interação de misturas de combustíveis diferentes.

A combustibilidade, bem como as emissões geradas pela queima de determinado combustível são parâmetros fortemente influenciados pelas características químicas e físicas do combustível, de forma que carvão mineral e vegetal podem apresentar diferentes comportamentos quando queimados. A literatura, no que diz respeito à comparação destes dois combustíveis em fornos de queda livre, indica que os *burnouts* das biomassas carbonizadas em forno DTF são maiores do que os dos carvões minerais (Pohlmann, 2014). Estudos a respeito da composição dos gases liberados na combustão de combustíveis sólidos mostram que estes dependem da composição dos combustíveis e podem ser tóxicos (Francisco, 2012). Em ensaios realizados em DTF, Wang (2014) constatou que quanto mais oxigênio estivesse presente no processo maior seria a liberação de CO e NOx e que em partículas de granulometria reduzida a liberação de NOx reduz, enquanto a temperatura e o *burnout*

aumentam, além disso, a reação ocorre mais rapidamente.

Este trabalho teve como objetivo o estudo da combustão de carvões minerais e carvão vegetal em um forno de queda livre. Os dados experimentais coletados incluíram o *burnout* ao longo de diferentes pontos dentro do forno e determinação dos teores de espécies gasosas liberadas durante a combustão.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados neste trabalho um carvão brasileiro sub-betuminoso alto volátil (CB), um carvão colombiano sub-betuminoso alto volátil (CC), e moinha de carvão vegetal de Acácia Negra (CV).

As amostras foram caracterizadas através de análise imediata conforme os métodos descritos nas normas ASTM D3173, ASTM D3174 e ASTM D3175, e quanto à composição elementar descrita no método ASTM D3176 e poder calorífico conforme descrito na norma ASTM D5865. A caracterização petrográfica dos carvões foi realizada de acordo com os métodos ISO 7405/5 para determinação do índice de refletância da vitrinita e conforme a norma ISO 7403-3 para determinação da composição maceral. As amostras para os testes de queima foram cominuídas em granulometria 75-36 µm.

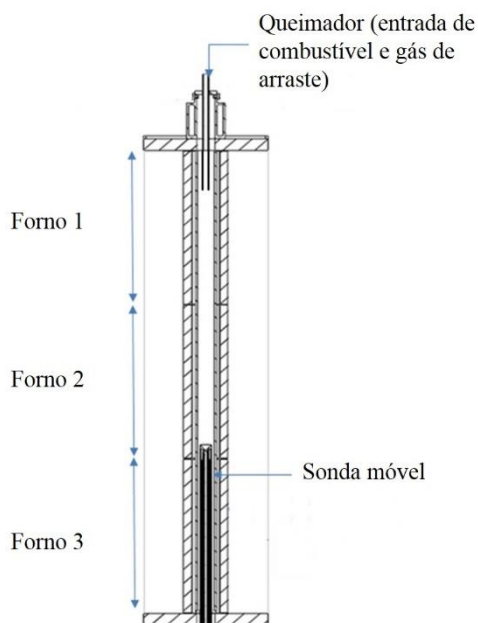


Figura 1 Diagrama esquemático do DTF utilizado neste trabalho.

A Figura 1 mostra um diagrama esquemático do DTF. O forno tem câmara de combustão fixa, de cerâmica, com 1650 mm de comprimento (1310 mm

úteis) e diâmetro interno de 47 mm. A câmara tubular é dividida em três estágios, cada qual com controle independente de temperatura. A temperatura máxima de operação é de 1200° C.

A alimentação das partículas é controlada por um alimentador pneumático seguido de um tubo de injeção (queimador) que se projeta dentro do forno. O sistema de alimentação é resfriado a água e garante que as partículas entrem no forno em uma condição conhecida. O ponto de injeção das partículas de combustível está situada a 340 mm abaixo da extremidade superior do forno, sendo esta posição considerada o ponto zero de entrada das partículas no DTF. Nos experimentos os pontos de coleta foram estabelecidos a cada 200 mm. Ar foi usado como gás de arraste com uma vazão de 22 L/min. A alimentação das partículas foi mantida em 90 g/h.

A determinação do *burnout* foi feita a partir do teor de cinzas conforme a Equação 01:

$$Burnout = 1 - \left(\frac{Cz_{bs}/(100 - Cz_{bs})}{(100 - Cz_{char})/Cz_{char}} \right) * 100 \quad [Eq. 01]$$

onde Cz_{bs} é o teor de cinzas da amostra (%), em base seca, e Cz_{char} compreende as cinzas determinadas pelo experimento, ou seja, as cinzas do char recolhido pela sonda (%).

Os gases emitidos foram analisados por um analisador de combustão portátil KANE 940, que faz uma análise de O₂, CO, NO e SO₂.

Cada teste foi realizado com pelo menos uma repetição, para fins de validar o experimento. O desvio entre os testes foi inferior a 5%.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

O resultado dos testes de caracterização é apresentado na Tabela 1:

Tabela 1 Caracterização dos carvões.

Análise Imediata	Parâmetros, Unidades	CB	CC	CV
	Umidade, %	5,28	7,37	10,23
	Cinzas, % bs	33,73	9,89	16,84
	Matéria Volátil, % bs	27,80	37,75	26,63
	Matéria Volátil, % bs isento de cinzas	42,61	42,78	35,39
	Carbono Fixo, % bs	38,47	52,36	56,53
Análise Elementar	C, % bs	50,80	69,77	64,13
	H, % bs	3,77	5,03	2,40
	N, % bs	0,93	1,49	1,23
	S, % bs	0,91	0,64	0,20
	O*, % bs	9,86	13,19	15,20
Poder Calorífico	PCS, (MJ/kg) bs	20,6	28,2	23,7
Análise Petrográfica	Rr, %	0,487	0,499	-
	V, % Imm	67,5	76,1	-
	L, % Imm	14,4	3,5	-
	I, % Imm	18,4	20,4	-

A análise imediata foi realizada em granulometria de 75 a 36 μm . bs significa base seca, Rr é a refletância da vitrinita, V é teor de vitrinita, L é teor de liptinita, I é o teor de inertinita, Imm significa livre de matéria mineral.

Pela Tabela 1 nota-se que, comparando os carvões minerais do estudo, o carvão colombiano, tem mais carbono fixo e menos cinzas que o brasileiro. O carvão vegetal tem teor de voláteis semelhante ao do carvão brasileiro e tem alto teor de cinzas pra uma biomassa, porém tem menos cinzas que o carvão brasileiro (16,84% para 33,73%) e mais que o carvão colombiano (16,84% para 9,89%) e menos matéria volátil que os demais. É importante salientar que analisando o teor de matéria volátil em base seca isento de cinzas, os valores que representam o carvão brasileiro e o carvão colombiano podem ser considerados iguais (42,61% e 42,78%, respectivamente), e o teor de matéria volátil do carvão vegetal continua sendo inferior ao teor dos carvões minerais. O poder calorífico do carvão colombiano é superior, seguido pelo carvão vegetal e por fim pelo carvão brasileiro.

O carvão colombiano tem mais carbono, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio que o carvão brasileiro, e menos enxofre. A biomassa se assemelha ao carvão colombiano em quantidade de carbono e nitrogênio, mas tem menos hidrogênio e

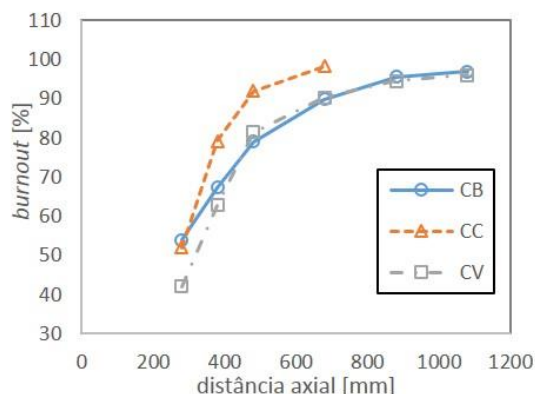
enxofre (o que é uma vantagem em relação a impactos ambientais) e mais oxigênio que ambos os carvões minerais.

Sobre a análise petrográfica, observa-se que o carvão colombiano contém mais vitrinita e inertinita que o carvão brasileiro, porém, bem menos liptinita (3,5% para 14,4%). Ambos os carvões, brasileiro e colombiano, são carvões sub-betuminosos alto volátil com mesmo poder refletor da vitrinita.

3.2 COMBUSTIBILIDADE

A combustibilidade é medida pelo *burnout*, quanto maior o *burnout*, maior a combustibilidade do carvão ou da biomassa.

As curvas de *burnout* para os três carvões estudados são apresentadas na Figura 2.


Figura 2 Curva de *burnout* das espécies.

Com o carvão colombiano pode-se notar que a maior parte da combustão acontece na primeira metade do DTF. Optou-se por terminar o experimento deste carvão antes do realizado nas outras amostras, pois neste ponto a amostra apresentou 98,57% de burnout, o que pode ser interpretado como a queima total do carvão.

Comparando os resultados dos carvões minerais, apesar do carvão brasileiro apresentar burnout semelhante ao carvão colombiano no primeiro ponto de medida, para maiores tempos de residência (quanto maior a distância axial) os burnouts do carvão brasileiro foram mais baixos do que os burnouts do carvão colombiano. Isso pode acontecer porque, como já foi citado, o primeiro tem mais cinzas, que podem formar uma camada entorno do carbono fixo, fazendo com que o oxigênio tenha que difundir através da estrutura porosa dessas cinzas antes de chegar na superfície do carbono. Essa resistência difusiva adicional reduz a taxa de

reação do carvão e pode ser responsável pelo burnout mais baixo do carvão brasileiro.

O carvão vegetal também apresentou uma curva muito semelhante ao carvão brasileiro. A reatividade da biomassa, segundo Pohlmann, 2014, deveria ser superior à reatividade do carvão brasileiro, por causa da estrutura celular da biomassa. No entanto tal fato não foi observado nesse trabalho. Uma possível explicação para tal efeito pode ser o maior teor de umidade nas partículas de carvão vegetal, o que acarretaria em maior tempo de ignição, retardando o início da combustão e deslocando a curva de *burnout* para a direita.

3.3 ANÁLISE DE GASES

Em cada ponto, para cada tipo de carvão, foram registradas as concentrações de espécies gasosas como O_2 , CO , NO e SO_2 . Os dados coletados passaram pelo critério de Chauvenet para redução da quantidade de valores de forma estatística, e depois foram calculadas médias e desvio padrão para cada amostra. A injeção de nitrogênio na sonda (usada para congelamento da reação do carvão) resulta em um fator de diluição de aproximadamente 2:1. Logo, os valores de média e desvio padrão para as concentrações molares medidas são proporcionalmente corrigidos.

São apresentados pelas Figura 3 e Figura 4 os gráficos comparativos do comportamento de cada componente gasoso para as três amostras, ao longo do DTF.

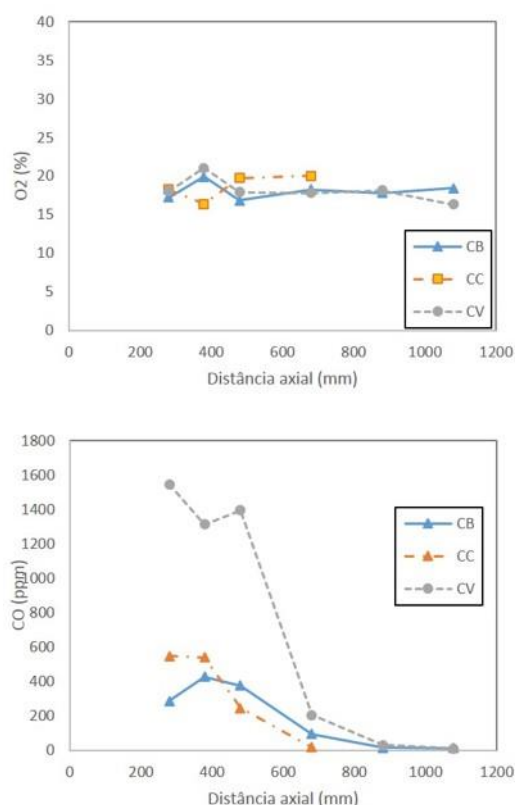


Figura 3 Medida do oxigênio e CO, para cada amostra de carvão, em porcentagem e ppm, respectivamente, por altura do forno (distância axial).

O oxigênio tem uma pequena queda na concentração no início do processo. Isso pode estar acontecendo devido à combustão da matéria volátil. No momento seguinte, a concentração de oxigênio praticamente não muda para nenhuma das amostras. Isso ocorre devido ao elevado excesso de ar nos testes. A menor variação de oxigênio a partir de 480 mm pode ocorrer também porque a variação no *burnout* a partir deste ponto é bem menor comparada aos pontos mais próximos do queimador.

O monóxido de carbono (CO) inicia alto e vai diminuindo ao longo da combustão, sendo mínimo ao final dela. O carvão vegetal libera mais CO que os carvões minerais no início da combustão, o que pode estar relacionado à maior reatividade do carvão vegetal.

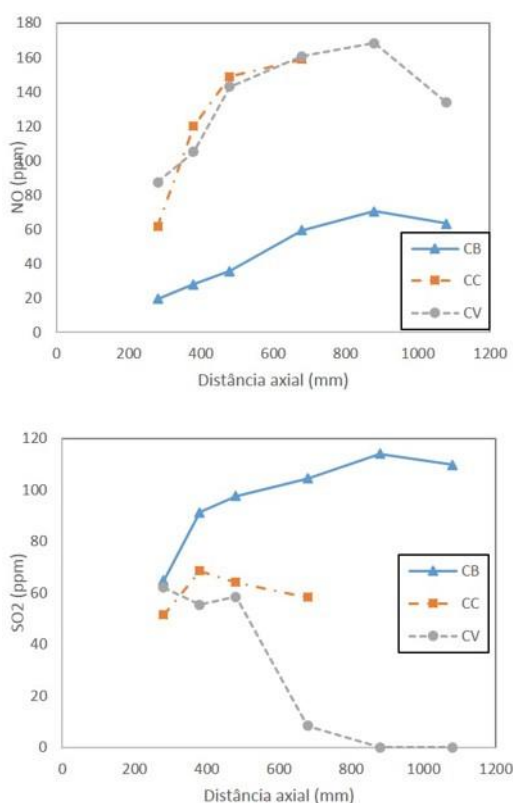


Figura 4 Medida de NO e SO₂, para cada amostra de carvão, em ppm por altura do forno (distância axial).

A formação de monóxido de nitrogênio (NO) pelo mecanismo térmico tende a ser pequena nas condições de teste, dadas às baixas temperaturas do ambiente. Assim, espera-se um domínio do NO formado pelo mecanismo do combustível, isto é, relacionado ao nitrogênio presente na composição da amostra. A emissão de NO foi mais alta na combustão do carvão colombiano e do carvão vegetal porque estes apresentam mais nitrogênio em sua estrutura de acordo com o esperado.

As emissões de dióxido de enxofre (SO₂) também foram proporcionais ao teor de enxofre nos carvões, de maneira que o carvão brasileiro apresentou as maiores concentrações, seguido pelo carvão colombiano e por último, o carvão vegetal.

4 CONCLUSÕES

Apesar dos carvões brasileiro e colombiano apresentarem mesmo rank e mesmo teor de voláteis em base seca e isenta de cinzas, o carvão colombiano apresentou maior combustibilidade do que o carvão brasileiro. Isso pode estar associado ao alto teor de cinzas deste último.

O carvão vegetal apresentou *burnouts* semelhantes aos do carvão brasileiro, contrariando o fato de que biomassas tem mais alta combustibilidade que carvões. Este aspecto segue sob investigação no grupo.

As emissões de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de enxofre (SO₂) foram proporcionais ao teor de nitrogênio e enxofre nos carvões.

5 REFERÊNCIAS

BEN - Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Rio de Janeiro, RJ. Junho de 2016.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Relatório Anual 2015. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. Brasil. 2015.

FRANCISCO, R. P. (2012). Estudo termoquímico da queima de combustíveis em caldeiras usando balanços de energia. MG - Universidade Federal de São João Del-Rei.

IEA - International Energy Agency. World Energy Outlook. OECD/IEA, Paris, 2001.

ÓRFÃO, J. J. M.; ANTUNES, F. J. A.; FIGUEIREDO, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials-three independent reactions model. Fuel, London, v.78, p.349-358, 1999.

POHLMANN, J. G., OSORIO, E., VILELA, A. C. F., DIEZ, M. A., BORREGO, A. G.(2010). Integrating physicochemical information to follow the transformations of biomass upon torrefaction and low-temperature carbonization. Fuel, London, v. 131, p. 17-27, 2014.

POHLMANN, J. G. (2014). Avaliação da combustibilidade e reatividade de biomassas termicamente tratadas e carvões com vistas à injeção em alto-fornos. RS – Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TURN, S. R. (2000). An introduction to combustion: concepts and applications (2ª ed.). Boston, EUA: McGraw-Hill.

WANG, G. (2014). (Co-) combustion of solid fuels: experiments and modeling. Portugal: Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa.

ZIMMER, L. (2012). Modelagem da combustão de carvão em um forno de queda livre. RS – Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul.