

Modelagem e simulação da pirólise do resíduo de sisal em regime transiente
Modeling and simulation of pyrolysis of sisal residue in transient regime
Modelado y simulación de pirólisis de residuos de sisal en régimen transitorio

Recebido: 22/01/2020 | Revisado: 29/01/2019 | Aceito: 15/02/2020 | Publicado: 27/02/2020

Tarcísio de Oliveira Pereira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6149-9082>

Universidade Federal da Bahia, Brasil

E-mail: tarcisio.oliveira01@hotmail.com

Carlos Augusto de Moraes Pires

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4231-6495>

Universidade Federal da Bahia, Brasil

E-mail: cap@ufba.br

Daniel Bemmuyal Passos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9700-0397>

Universidade Federal da Bahia, Brasil

E-mail: bemmuyalpassos@hotmail.com

Resumo

Esse estudo apresenta um modelo matemático em regime transiente capaz de prever a produção de carvão em um processo de pirólise rápida, a partir um reator de leito fluidizado. O modelo foi desenvolvido a partir da decomposição térmica de uma partícula de sisal e sua solução dependeu de dados não relatados na literatura. O coeficiente convectivo do meio reacional foi encontrado a partir de dados experimentais da unidade piloto, envolvendo calores cedidos e dissipados pelo sistema reacional. A temperatura superficial da partícula foi medida em um novo teste de bancada, no qual algumas partículas foram transformadas por pirólise a uma temperatura de reação fixa. A temperatura superficial de um conjunto de partículas foi medida a cada tempo de reação, assim como seus diâmetros e massas. A massa específica da partícula foi medida com o auxílio da picnometria a gás, utilizando as partículas obtidas no experimento de medida da temperatura superficial. A partir dos resultados dos diâmetros e massa específicas das partículas, foi possível determinar as suas capacidades caloríficas. O sistema de equações obtido foi resolvido em ambiente MATLAB, obtendo-se perfis de temperatura de superfície e massa da partícula ao longo da reação. Os dados

necessários para se calcular a massa de carvão teórica de uma unidade piloto de pirólise foram o diâmetro das partículas, obtidos a partir da simulação do modelo, e as velocidades resultantes da partícula no reator, obtidas a partir de um balanço de forças em uma partícula. O tempo de residência da partícula calculado foi de 35 s, e a massa de carvão calculada teve uma discrepância de 6,38% em relação a dados coletados na unidade piloto de produção. Estes resultados validam as propriedades, ao longo da reação, da partícula do resíduo de sisal encontradas experimentalmente e por meio de cálculos.

Palavras-Chave: Partícula; Modelagem; Propriedades térmicas.

Abstract

This study presents a transient mathematical model capable of predicting coal production in a fast pyrolysis process from a fluidized bed reactor. The model was developed from the thermal decomposition of a sisal particle and its solution depended on data not reported in the literature. The convective coefficient of the reaction medium was found from pilot unit experimental data involving heats given and dissipated by the reaction system. The surface temperature of the particle was measured in a new bench test, in which some particles were pyrolysis transformed at a fixed reaction temperature. The surface temperature of a set of particles was measured at each reaction time, as well as their diameters and masses. The particle specific mass was measured with the aid of gas pycnometry, using the particles obtained in the surface temperature experiment. From the results of the particle specific diameters and mass, it was possible to determine their calorific capacities. The system of equations obtained was solved in MATLAB environment, obtaining surface temperature and particle mass profiles throughout the reaction. The data needed to calculate the theoretical carbon mass of a pyrolysis pilot unit was the particle diameter obtained from the model simulation and the resulting particle velocities in the reactor obtained from a force balance in a particle. The calculated particle residence time was 35 s and the calculated coal mass had a discrepancy of 6.38% compared to data collected at the pilot production unit. These results validate the properties, throughout the reaction, of the particle of the sisal residue found experimentally and by means of calculations.

Keywords: Particle; Modeling; Thermal properties.

Resumen

Este estudio presenta un modelo matemático transitorio capaz de predecir la producción de carbón en un proceso de pirólisis rápida a partir de un reactor de lecho fluidizado. El modelo

fue desarrollado a partir de la descomposición térmica de una partícula de sisal y su solución dependía de datos no reportados en la literatura. El coeficiente convectivo del medio de reacción se encontró a partir de datos experimentales de la unidad piloto que implican calores dados y disipados por el sistema de reacción. La temperatura de la superficie de la partícula se midió en una nueva prueba de banco, en la que algunas partículas se transformaron por pirólisis a una temperatura de reacción fija. La temperatura de la superficie de un conjunto de partículas se midió en cada tiempo de reacción, así como sus diámetros y masas. La masa específica de partículas se midió con la ayuda de picnometría de gases, utilizando las partículas obtenidas en el experimento de temperatura de la superficie. A partir de los resultados de los diámetros y la masa específicos de las partículas, fue posible determinar sus capacidades caloríficas. El sistema de ecuaciones obtenido se resolvió en el entorno MATLAB, obteniendo perfiles de temperatura de superficie y masa de partículas durante toda la reacción. Los datos necesarios para calcular la masa de carbono teórica de una unidad piloto de pirólisis fue el diámetro de partícula obtenido de la simulación del modelo y las velocidades de partícula resultantes en el reactor obtenidas de un equilibrio de fuerza a partícula. El tiempo de residencia de partículas calculado fue de 35 s, y la masa de carbón calculada tuvo una discrepancia de 6.38% de los datos recopilados en la unidad de producción piloto. Estos resultados validan las propiedades, a lo largo de la reacción, de la partícula del residuo de sisal encontrada experimentalmente y mediante cálculos.

Palabras clave: Partícula; Modelado; Propiedades térmicas.

1. Introdução

No atual cenário mundial a escassez de combustíveis, a elevação dos preços das fontes de energia, o uso eficaz e o estudo de fontes de energias renováveis vêm ganhando uma maior visibilidade. Dentre as diversas formas de obtenção de potenciais fontes de energia, tem-se a utilização de biomassa, que tem gerado grande interesse da comunidade acadêmica, uma vez que as fibras vegetais estão envolvidas em pesquisas que têm por objetivo a utilização de seus resíduos na geração de gases e líquidos como potencial fonte de energia alternativa para processos químicos.

A pirólise da biomassa produz gás, líquido e sólido, cujos rendimentos são influenciados pelas condições operacionais do processo e pelas características da biomassa utilizada. Altas temperaturas e tempos de residência longos aumentam a conversão de

biomassa em gás e temperaturas moderadas e curtos tempos de residência são condições ótimas para a produção de bio-óleo (Bridgwater, 2011).

A produção de bio-óleo por pirólise rápida já vem sendo estudada há muito tempo, porém, poucos estudos se dedicaram a determinar as propriedades da partícula de biomassa ao longo da reação. Os trabalhos relatados não determinam as propriedades experimentalmente, porém, estimam indiretamente através da taxa de aquecimento por condução, entre a partícula e o gás (Wang *et al.*, 2017).

Wang *et al.*, (2017), em seus estudos propõe um modelo matemático único que exhibe a variação do produto da capacidade calorífica com a massa específica de partículas de carvão em uma reação de pirólise em função da temperatura de reação. Estes autores desenvolveram uma equação que é válida a temperaturas acima de 350°C e estabelecendo um valor constante para temperaturas inferiores. Wang *et al.*, (2017), ainda em seus estudos, executou um estudo sistemático no que diz respeito ao comportamento termodinâmico e cinético da pirólise rápida de uma única partícula de carvão. As características da pirólise de carvão foram investigadas por análise termogravimétrica, enquanto que os parâmetros cinéticos de reação foram obtidos utilizando o modelo DEAM (distribute activation energy model). Foi esperado por Wang *et al.*, (2017) que tal modelo pode ser integrado com simulação de CFD (Computational Fluid Dynamics) para fornecer informações úteis para a concepção de um reator de pirólise de carvão.

Kaushal *et al.*, (2010), realizou modelagem e simulação do processo de pirólise de uma partícula de biomassa, em um reator de leito fluidizado simulando o perfil do decaimento de massa, utilizando um conjunto de reações paralelas. Para isso, foi feita uma abordagem cinética, para prever o rendimento de bio-óleo, simulando os efeitos de parâmetros operacionais sobre o rendimento do produto de pirólise de biomassa. Posteriormente Kaushal *et al.*, (2011), em trabalho subsequente utilizou do Diâmetro de Sauter para propor uma equação empírica que descreve o decaimento de raio da partícula em função da temperatura de reação, no entanto, Kaushal *et al.*, (2011) não relatou em seus estudos a variação das propriedades físico-químicas ao longo do processo de pirólise.

Uma abordagem diferencial foi proposta por Peters *et al.*, (2011) para o encolhimento de uma partícula de biomassa. Para isso, os autores utilizaram as equações de movimento de Navier Stokes para propor um modelo capaz de simular a fluidização de uma partícula esférica de biomassa. No entanto, Peters *et al.*, (2011) desconsiderou a possibilidade da

variação das propriedades termodinâmicas da partícula, não dispondo de uma técnica ou artifício matemático para um levantamento da variação das propriedades físicas e morfológicas da biomassa ao longo do processo de pirólise rápida.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia experimental que seja capaz de investigar as variações das propriedades físicas da partícula do resíduo de sisal (*Agave sisalana*), quando esta se encontra em uma reação de pirólise rápida. No sentido de superar obstáculos referentes a informações termodinâmicas sobre a partícula de sisal em tempos distintos de uma reação de pirólise, que ainda não estão disponíveis na literatura, foi realizada a obtenção de equações que sejam capazes de expor a variação das propriedades físicas do resíduo de sisal em tempos diferentes de reação. Os resultados expostos por este trabalho ajudaram a entender melhor o processo de pirólise do resíduo de sisal.

2. Metodologia

A biomassa utilizada neste trabalho foi o resíduo de sisal, que vem sendo utilizado na produção de bio-óleo (Jambeiro et al., 2018 e Pereira e Pires, 2018). O resíduo foi coletado na região semiárida do Brasil, após o processo de desfibramento da folha do sisal. Para evitar a sua decomposição e consequente perda das características naturais, a matéria-prima foi armazenada a 4 °C. Antes da sua utilização no processo, o resíduo foi previamente seco em uma estufa a uma temperatura de 105 °C, por 4h, obtendo um teor de água de 7.5%. Além disso, o tamanho da partícula do resíduo do sisal foi reduzido em um moinho de facas, obtendo uma granulometria média de 600µm.

2.2 - A planta piloto

O modelo matemático desenvolvido para representar a pirólise de uma partícula de resíduo de sisal foi validado com dados experimentais de produção de carvão de uma unidade piloto. A produção ótima de bio-óleo dessa unidade piloto foi encontrada por Jambeiro et al. (2018) à temperatura reacional de 450 °C, vazão de 8 Nm³ h⁻¹ de N₂, e vazão de 1557 g h⁻¹ de biomassa. Nestas condições, foram produzidos 0.88858g. h⁻¹ de carvão, que foi o valor utilizado para validar o modelo.

A unidade piloto de pirólise de biomassa é constituída de um silo de armazenamento, um reator de leito fluidizado, construído em aço inoxidável, de 1 m de altura e 10 cm de diâmetro, dois ciclones em série para a recuperação do carvão e um sistema de coleta de bio-óleo. A unidade possui um forno de aquecimento do gás fluidizante (N_2) de 13 kW e um sistema de controle de temperatura e vazões. O reator possui um leito de areia de 20 cm e quatro resistências elétricas tipo coleira, cada uma com 1.3 kW.

O reator é dotado de uma camada externa de alumínio, uma camada interna de lã de vidro (termal insulation), uma parte interna constituída de aço e quatro resistências do tipo coleira, que tem por objetivo manter a temperatura da parede do reator com valor próximo da temperatura de reação, para evitar a perda de calor de dentro para fora do reator (Figura 1). Durante o processo de pirólise, as partículas absorvem calor da vizinhança, tendo como consequência a perda de massa devido a volatilização das espécies produzidas a partir da pirólise da celulose, hemicelulose, lignina e extrativos.

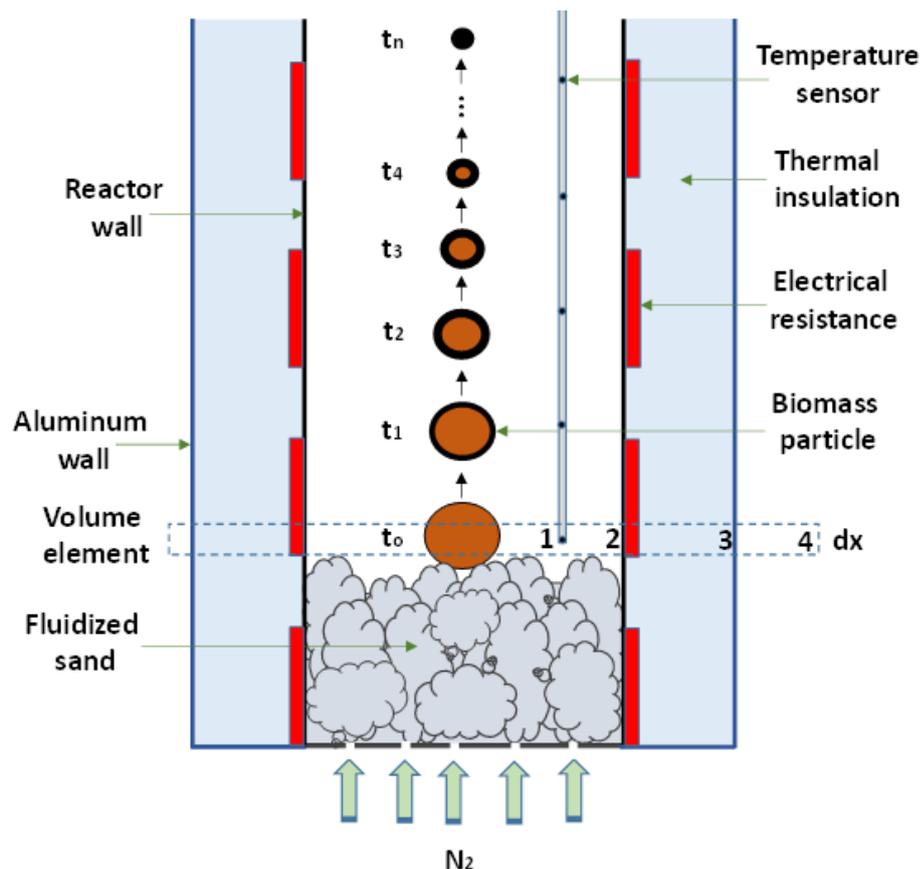


Figura 1 - Representação esquemática do reator.

2.3 - Balanço de energia na partícula de sisal

A situação térmica no interior da partícula pode ser influenciada simultaneamente pela convecção, pela radiação térmica, pela aplicação de um fluxo em sua superfície e pela geração interna de energia. O balanço de energia global é dado pela Equação 1.

$$\dot{E}_{input} - \dot{E}_{output} + \dot{E}_{generation} = \frac{dE}{dt} \quad \text{Eq. 1}$$

A taxa de energia que entra na partícula é a soma das taxas de energia por convecção e por radiação.

$$(q''_{convection} + q'_{radiation}) A_s - \dot{E}_{output} + \dot{E}_{generation} = \frac{dE}{dt} \quad \text{Eq. 2}$$

A Equação 2 pode ser simplificada, considerando que o calor de entrada por convecção é muito maior do que o calor de entrada por radiação. Esta hipótese parece ser razoável, visto que a radiação emitida pelas resistências térmicas acopladas à parede externa do reator é suficiente apenas para manter a temperatura da parede do reator próxima da temperatura de reação, minimizando a perda de calor pela parede do reator. Outra simplificação que foi feita na Equação 2 envolve a energia de geração e a energia de saída da partícula. A energia que sai da partícula é conduzida pelas espécies voláteis geradas pela pirólise, sendo aproximadamente igual à energia de geração dessas espécies. A partir destas simplificações, obtendo-se a Equação 3.

$$q'_{convection} A_s = \frac{dE}{dt} \quad \text{Eq. 3}$$

$$h_{int} A_s (T_s - T_{\infty}) = \frac{dE}{dt} \quad \text{Eq. 4}$$

A Equação 4 representa o método da capacitância global, utilizado para aquecimento e resfriamento de sólidos em regime transiente (Incropera, 2014). Tal método é útil para descrever o comportamento térmico no processo de aquecimento ou resfriamento de um sólido em regime transiente, considerando a hipótese de que a temperatura da partícula sólida se encontra inferior à temperatura do meio. Logo, se o processo de aquecimento se inicia no tempo $t=0$, a temperatura do sólido irá aumentar para tempos $t > 0$, até que atinja a temperatura global do meio reacional. Esse aumento de temperatura se deve à transferência de calor por convecção na interface sólido-gás. A essência do método da capacitância global está relacionada com o pressuposto de que a temperatura do sólido é uniforme na superfície

exposta ao fluido, sendo apenas função do tempo. Por esse motivo, os gradientes de temperatura no interior do sólido são considerados desprezíveis (Incropera, 2014).

Fazendo uma análise da Lei de Fourier, a condução térmica na ausência de um gradiente de temperatura implica na existência de uma condutividade térmica infinita. Sendo assim, através desse ponto de vista, tal condição coloca-se como improvável. Entretanto, ela pode ser considerada como uma condição aproximada, se a resistência à condução no interior do sólido for pequena em comparação com a resistência à transferência de calor entre o sólido e a sua vizinhança. Como a espessura das partículas do resíduo de sisal são finas comparadas com as outras medidas geométricas, é razoável intuir que a resistência à condução no interior do sólido é pequena e, portanto, pode-se empregar o método da capacitância global, cometendo-se um pequeno erro.

A taxa de variação de energia no volume de controle é um somatório das energias internas (U), cinéticas (Ec) e potenciais (Ep). Com o propósito de facilitar a resolução do problema, considerou-se as variações da energia cinética e potencial relativamente baixas, quando comparadas à variação de energia interna no volume de controle. Desse modo, a Equação 4 passou a ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = h_{int} A_L (T_s - T_\infty) \quad \text{Eq. 4}$$

A energia interna é dada por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \rho V C_v \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad \text{Eq. 5}$$

Substituindo a Equação 5 na Equação 4 e considerando que: a) em sólidos $C_p \approx C_v = C$ e b) o volume e a massa específica da partícula são funções do tempo de reação, tem-se:

$$C \frac{dT_s(\rho V)}{dt} = h_{int} A (T_s - T_\infty) \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo ρV igual à massa da partícula, chega-se na seguinte equação diferencial, na qual a capacidade calorífica e a área de troca térmica encontram-se variando simultaneamente com a temperatura de superfície da partícula:

$$C_{(T_s)} \left(m \frac{dT_s}{dt} + T_s \frac{dm}{dt} \right) = h_{int} A_{(T_s)} (T_s - T_\infty) \quad \text{Eq. 7}$$

Para que a Equação 7 possa ser resolvida, foi necessário identificar a capacidade calorífica (C) na temperatura de superfície da partícula (T_s), a variação da temperatura da superfície e massa da partícula com o tempo de reação e o coeficiente convectivo no meio reacional (h_{int}). Todas estas variáveis serão encontradas por meio de experimentos.

2.4 - Determinação do coeficiente convectivo no meio reacional

O coeficiente convectivo no meio reacional foi encontrado a partir de dados experimentais provenientes da planta piloto de pirólise. Para isso, considerou-se a taxa de calor cedido pelas resistências elétricas que envolvem o reator, considerando que cada uma possui 1.3 kW de potência com eficiência de 100%, a temperatura do meio reacional, a temperatura na parede externa do reator, a temperatura externa da parede de alumínio e o coeficiente convectivo do meio externo ao reator.

Para determinar a temperatura na parede interna do reator no momento da reação, foi necessário retirar o isolante térmico que reveste o reator (lã de rocha). Como a parede do reator é de aço inoxidável e possui uma espessura relativamente pequena (8mm), ela possui uma baixa resistência térmica à transferência de calor. Por isso, foi considerado que as temperaturas das superfícies interna e externa do reator eram iguais.

A planta piloto fica localizada em um espaço interno de 10m³, limitado por paredes de vidro. O ambiente também é isento de equipamentos de rotação (ventiladores e ar condicionado). A correlação de Morgan foi utilizada para determinar o coeficiente convectivo no meio externo ao reator.

O reator possui um sensor de temperatura na altura do leito reacional, que é utilizado como referência para o controle da temperatura da reação. Medidas de temperaturas foram feitas na mesma cota do sensor de temperatura. O coeficiente convectivo no leito do reator foi determinado com o auxílio de um balanço de energia na forma diferencial. Este procedimento pode ser resumido como os calores que foram fornecidos e dissipados pelo sistema dentro do volume de controle (Figura 1), onde: 1 é a temperatura do meio reacional (T_{∞}), 2 é a temperatura na parede o reator (T_{int}), 3 é a temperatura na parede de alumínio (T_{ext}) e 4 é temperatura do ambiente externo à planta piloto (T_{amb}).

O balanço de energia envolvendo o elemento de volume mostrado na Figura 1 definiu a Equação 8.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Taxa de calor} \\ \text{por metro} \\ \text{fornecido pelas} \\ \text{resistências tipo coleira no} \\ \text{volume de controle} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Taxa de calor} \\ \text{por metro} \\ \text{transferido por} \\ \text{convecção para} \\ \text{dentro do reator no} \\ \text{volume de controle} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Taxa de calor} \\ \text{por metro} \\ \text{perdido por} \\ \text{convecção pelo} \\ \text{ambiente externo no} \\ \text{volume de controle} \end{array} \right)$$

$$\dot{Q} dx = h_{int} \pi d dx (T_{int} - T_{\infty}) + \bar{h}_{ext} \pi D dx (T_{ext} - T_{amb}) \quad \text{Eq. 8}$$

No sentido de determinar o coeficiente convectivo externo ao reator (\bar{h}_{ext}), utilizou-se as correlações de Morgan para convecção natural em superfície cilíndrica.

$$\overline{Nu}_D = \frac{D \bar{h}_{ext}}{K\alpha} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\overline{Nu}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 Ra_D^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{2/7}} \right\}^2 \quad \text{Eq.10}$$

$$Ra_D = \frac{g\beta (T_{s_{ext}} - T_{amb}) D^3}{\nu\alpha} \quad \text{Eq. 11}$$

As temperaturas médias nos pontos 2, 3 e 4 da Figura 1 encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Temperaturas das paredes do reator.

Local da medida	°C
Temperatura externa na parede de alumínio (T_{ext})	60
Temperatura do ambiente externo (T_{amb})	25
Temperatura na parede o reator (T_{int})	256

As propriedades físicas do ar no ambiente externo à unidade piloto foram determinadas a partir da temperatura média entre face externa da parede de alumínio e o ambiente externo (Tabela 2).

Tabela 2 – Propriedades físicas do ar a 42,5 °C e 1atm (Incropera, 2014).

Propriedade do ar	Valores
Viscosidade cinemática - ν ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	15.89×10^{-6}
Viscosidade dinâmica - μ (N s m^{-2})	184.6×10^{-7}
Condutividade térmica - K_a ($\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$)	26.3×10^{-6}
Número de Prandtl – Pr	0.707×10^{-6}
Difusividade térmica - α ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)	22.5
Coefficiente de expansão térmica - β (k^{-1})	3.3×10^{-3}
Diâmetro da casca externa do reator – D (m)	0.2456
Gravidade - g (m s^{-2})	9.8

A variação de temperatura do nitrogênio foi desconsiderada entre a entrada e a saída do volume de controle. Dessa forma, o calor envolvido no processo de escoamento de nitrogênio não foi levado em consideração no balanço de energia (Equação 8).

Após a inclusão de valores nas Equações 10 e 11, o coeficiente convectivo externo ao reator (\bar{h}_{ext}) foi calculado a partir da Equação 9, encontrando o valor de $4.806 \text{ W m}^{-2} \text{ k}^{-1}$. A partir da integração da Equação 8 e com os valores da altura da resistência elétrica (0.1 m) e a taxa de calor \dot{Q} (16000 W m^{-1}), foi calculado o coeficiente convectivo do meio reacional ($h_{int} = 260.4 \text{ W m}^{-2} \text{ k}^{-1}$) utilizando a Equação 12. Posteriormente, o coeficiente convectivo do meio reacional calculado foi incluído na Equação 5.

$$h_{int} = \frac{\dot{Q} - \bar{h}_{ext} \pi D (T_{s_{ext}} - T_{amb})}{\pi d (T_{s_{int}} - T_{\infty})} \quad \text{Eq. 12}$$

2.5 – Temperatura da superfície da partícula

Durante o processo de pirólise ocorrem diversas reações, que modifica a composição química, a massa e o raio da partícula com o tempo. Estas informações são necessárias para que se possa fazer previsões ao longo do tempo de reação a partir da Equação 7. Os valores destas variáveis não podem ser obtidos diretamente do reator piloto porque não se teria condições de acompanhar os diversos estágios de uma partícula ao longo da reação. Em um determinado tempo de reação no reator piloto, as partículas acumuladas no leito estariam em estágios reacionais diferentes, sendo impossível quantificar as variações no material. Por este motivo, seria necessário um equipamento específico para realizar este trabalho. Porém, ele não foi encontrado na literatura e nem nos portfólios de fabricantes tradicionais de equipamentos.

Para resolver este problema, a reação de pirólise foi conduzida em uma mufla adaptada, com entrada e saída de N₂, a fim de manter o ambiente inerte. Inicialmente o resíduo de sisal foi peneirado, obtendo-se partículas na faixa de 600µm. Em seguida, as amostras foram pesadas e colocadas em três cadinhos e introduzidas na mufla, que já se encontrava na temperatura de reação desejada. Após um determinado tempo de reação, foram realizadas as leituras das temperaturas superficiais das partículas, com o uso de um termômetro infravermelho. Os cadinhos foram resfriados em um ambiente inerte e pesados. Este procedimento foi realizado para sete tempos de reação distintos, iniciando em 15 s e finalizando em 75 s, com intervalos de 10 s (Tabela 3).

Tabela 3 - Temperatura superficial da partícula em função do tempo de reação.

Amostra	t (s)	Ts (1)	Ts (2)	Ts (3)	Ts (média)
1	15	215	219	220	218.0 ± 2.65
2	25	259	255	259	257.7 ± 2.31
3	35	320	311	341	324.0 ± 15.40
4	45	382	400	408	396.7 ± 13.32
5	55	418	412	419	416.3 ± 3.79
6	65	437	430	444	437.0 ± 7.00
7	75	451	456	449	452.0 ± 3.61

t é o tempo de reação, Ts (i) é a temperatura de superfície a cada repetição i

Os dados experimentais mostrados na Tabela 3 foram ajustados a um modelo logarítmico (Equação 13), que descreveu de maneira satisfatória o comportamento da temperatura superficial da partícula em função do tempo, tendo um valor de R² equivalente a 0,9691.

$$T_s = 159.02 \ln(t) - 228.44 \quad \text{Eq. 13}$$

2.6 - Decaimento do raio da partícula

A microscopia eletrônica de varredura foi à técnica escolhida para a determinação do tamanho das partículas de sisal. A microscopia é a única técnica de medida direta. Por esta razão, é frequentemente utilizada como método padrão.

Quando as partículas não esféricas são observadas por meio de um microscópio, vários métodos podem ser utilizados para o seu dimensionamento. A metodologia escolhida para a realização da medida do decaimento do raio da partícula de sisal foi o método do Diâmetro do Perímetro (Kaye, 1998), utilizado para partículas com formato irregular. Para isso, foi

realizada a microscopia eletrônica de varredura das partículas obtidas no experimento que mediu as temperaturas superficiais.

2.7 - Massa específica das partículas

A fim de encontrar as massas específicas das partículas obtidas no experimento que mediu as temperaturas superficiais, utilizou-se o método de picnometria com injeção de gás hélio. O picnômetro de gás determina o volume real de um sólido, mesmo que poroso, por variação da pressão de gás numa câmara de volume conhecido (Webb e Orr, 1997). O picnômetro de hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia): a câmara em que a amostra é colocada e a câmara de expansão, ligadas por uma válvula (válvula de expansão). As massas específicas das partículas foram calculadas dividindo-se a massa das partículas pelos respectivos volumes.

2.8 - Capacidades caloríficas das partículas

A capacidade calorífica de sólidos é medida normalmente por Calorímetro Adiabático e por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). A medida mais comum é por DSC, mas alguns autores levantaram dúvidas em relação aos resultados encontrados (Blokhin Av, Voitkevich Ov, Kabo Gj, Paulechka Yu, Shishonok Mv, Kabo Ag, et al, 2011). Estes autores alegam que a pequena massa de biomassa utilizada nesta técnica, aliada à porosidade da biomassa, pode produzir um fluxo do calor muito baixo, comprometendo a veracidade dos resultados devido ao limite de detecção do equipamento.

Devido a estes problemas, as capacidades caloríficas das partículas, obtidas no experimento de determinação da temperatura superficial, foram calculadas a partir da Equação 7, com dados de temperatura superficial, raio e massa específica das partículas.

2.9 – Validação das propriedades da partícula de biomassa

A validação das propriedades da partícula de resíduo de sisal durante a reação de pirólise foi realizada em três etapas: 1) determinação do perfil de massa da partícula em função do tempo de reação (baseada na resolução da Equação 7); 2) determinação do tempo

de residência da partícula; e 3) comparação entre produção de carvão calculado e experimental.

2.9.1 - Tempo de residência da partícula de sisal dentro do reator

A fim de determinar o tempo de residência da partícula dentro do reator, foi desenvolvido um balanço de forças capaz de determinar o perfil de velocidade da partícula (Cremasco, M.A. 2012). No momento da reação, as partículas de sisal sofreram a ação das forças da gravidade (P), arraste (F_a) e empuxo (F_E) (Figura 2). No momento em que a partícula alcança a velocidade mínima para a fluidização, ela passa a ser sustentada pelo gás ascendente (N_2). Porém, como o peso da partícula diminui com o tempo, a sua velocidade aumentará até que ela seja conduzida para fora do reator.

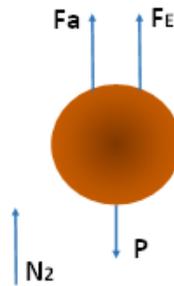


Figura 2 - Equilíbrio de forças na partícula sólida.

O balanço de forças que atuam na partícula é dado pela Equação 14.

$$P = F_a + F_E \quad \text{Eq. 14}$$

Substituindo as equações da força peso e de empuxo em função do raio da partícula, além da força de arraste sugerida por Cremasco, M.A. (2012), obtém-se a velocidade relativa da partícula.

$$V_r = \sqrt{\frac{2g(\rho - \rho_f)(4/3)\pi r^3}{Cd Ac \rho_f}} \quad \text{Eq. 15}$$

A Equação 15 considera a área característica da partícula (A_c), o coeficiente de arraste da partícula (C_d) e a velocidade relativa da partícula (V_r).

Para cálculo a velocidade relativa, utilizou-se o coeficiente de arraste (C_d) de acordo com o tipo de regime de escoamento que o fluido proporcionou à partícula, que foi dado pelo número de Reynolds da partícula, Re_p (Equação 16).

$$Re_p = \frac{D_i V_r \rho_f}{\mu} \quad \text{Eq. 16}$$

O cálculo de Re_p depende do diâmetro da partícula (D_i), velocidade relativa da partícula (V_r), e das propriedades do fluido como: densidade (ρ_f) e viscosidade dinâmica (μ), na temperatura de reação.

Como o Re_p foi sempre menor do que 0.4, o cálculo do coeficiente de arraste considerou apenas que o regime de escoamento foi laminar (Equação 17).

$$C_d = \frac{24}{\sqrt{Re_p}} \quad \text{Eq. 17}$$

As Equações 15-18 foram utilizadas em um processo iterativo, para cada diâmetro (ou raio) calculado com o auxílio da Equação 7, a fim de se determinar a velocidade relativa (V_r). Inicialmente supôs-se uma velocidade relativa da partícula igual à velocidade do gás fluidizante (N_2). Em seguida, utilizou-se a Equação 16 para calcular o Re_p , considerando um diâmetro de partícula D_i . O Re_p calculado foi inserido na Equação 17, para calcular o coeficiente de arraste C_d . A partir destes valores, calculou-se a nova velocidade relativa com a Equação 15. Este procedimento foi repetido tantas vezes quantas foram necessárias, de maneira a obter valores de V_r muito próximos, para um determinado diâmetro de partícula.

Então, a velocidade da partícula foi calculada a partir da Equação 18.

$$V_p = V_f - V_r \quad \text{Eq. 18}$$

A partir do tempo de reação e da velocidade da partícula, determinou-se em que altura do reator a partícula se encontrava. Como este cálculo considerou o diâmetro da partícula em função do tempo de reação, pôde-se relacionar o diâmetro da partícula com o comprimento do reator. Ao associar a saída do reator com o diâmetro da partícula, obteve-se o tempo de residência da partícula.

2.9.2 - Massa de carvão calculada x experimental

O modelo desenvolvido foi validado com base na produção de carvão da unidade piloto (Jambeiro et al., 2018). A fim de estimar a massa de carvão produzida em uma hora de operação, foi utilizado o tempo de residência estimado de uma partícula (t_f) no reator. Dessa forma, foi calculada a massa final de carvão, tomando como base a massa de uma partícula ao longo da reação.

Inicialmente, estimou-se a quantidade de partículas de sisal (θ) que entraram no reator em uma hora de reação, considerando-a constante. A quantidade de partícula foi encontrada dividindo-se a massa de resíduo de sisal que foi processada em uma hora de reação (m_s) pela massa média de uma partícula de resíduo de sisal antes da reação (m_p).

$$\theta = \frac{(m_s)}{(m_p)} \quad \text{Eq. 19}$$

A massa média de uma partícula do resíduo de sisal (m_p) foi determinada usando o dado da massa específica e do diâmetro médio das amostras, que foram encontrados, respectivamente, a partir da picnometria e da microscopia eletrônica de varredura.

A massa média de uma partícula do resíduo de sisal foi determinada a partir da massa específica da partícula, do volume equivalente da partícula na saída do reator e do tempo de residência (t_f).

$$m_p = \frac{\rho_{(t=t_f)} \frac{4}{3} \pi (R_{(t=t_f)})^3}{t_f} \quad \text{Eq. 20}$$

Na qual, o raio (R) da partícula associada ao tempo de residência foi calculado tomando como base a simulação do decaimento de massa da partícula (M_p) até o tempo de residência.

Considerando a massa por partícula que deixa o reator por segundo (m_p) e multiplicando-a pelo número de partículas estimado na entrada e na saída do reator, foi possível prever a massa de carvão esperada para uma hora de produção.

$$m_{\text{carvão}} = m_p \cdot \theta \cdot 3600 \quad \text{Eq. 21}$$

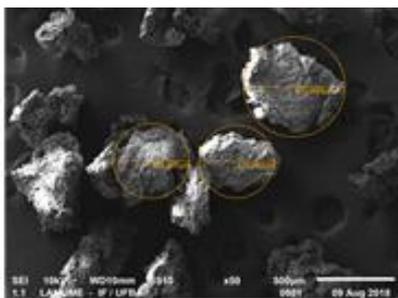
No sentido de validar o modelo, foi utilizada a Equação 22 para determinar a discrepância do modelo proposto com dados obtidos experimentalmente (Jambeiro et al., 2018).

$$\text{Discrep\~{a}ncia} = \left| \frac{M_{\text{carv\~{a}o experimental}} - M_{\text{carv\~{a}o calculada}}}{M_{\text{carv\~{a}o experimental}}} \right| \times 100 \quad \text{Eq. 22}$$

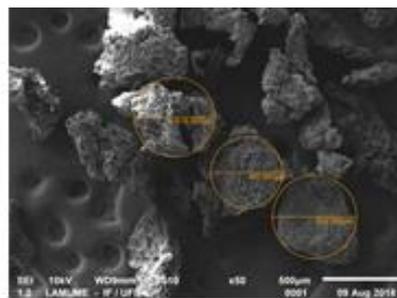
3.0 - RESULTADOS

3.1 - Variação do raio em relação a temperatura de superficial da partícula

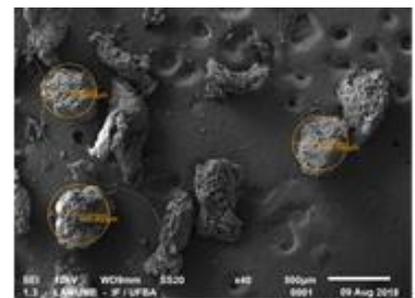
As partículas do resíduo de sisal obtidas a partir dos ensaios realizados para identificar a temperatura de superfície, a vários tempos de reação, foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura e suas imagens encontram-se na Figura 3.



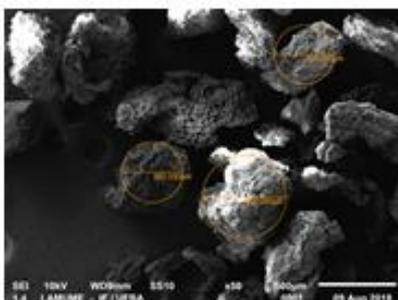
(1)



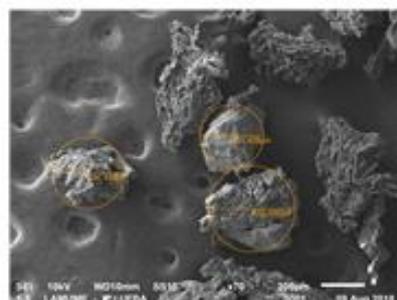
(2)



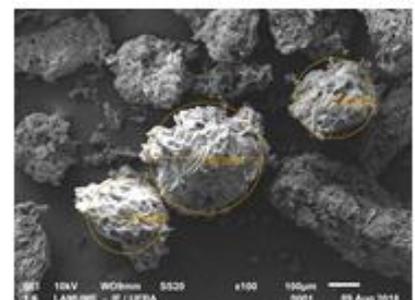
(3)



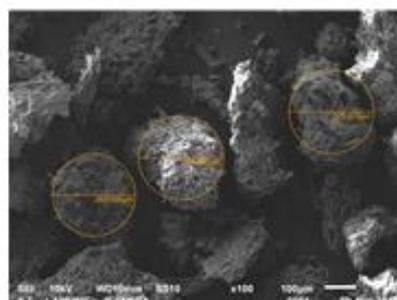
(4)



(5)



(6)



(7)

Figura 3 – MEV das partículas de resíduo de sisal em função do tempo de reação: (1) 15 s, (2) 25 s, (3) 35 s, (4) 45 s, (5) 55 s, (6) 65 s e (7) 75 s.

Pode-se observar que as partículas são irregulares, mas que a reação não produziu alterações perceptíveis nas suas formas. Os diâmetros médios das partículas foram calculados a partir da medida dos diâmetros de três partículas, para cada tempo de reação, e os valores numéricos encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Diâmetros e raios equivalentes médios das partículas por tempo de reação.

Tempo de reação (s)	Diâmetro médio (m)	Raio médio (m)
15	$5,39 \times 10^{-4}$	$2,69 \times 10^{-4} \pm 4,92 \times 10^{-5}$
25	$5,05 \times 10^{-4}$	$2,53 \times 10^{-4} \pm 2,05 \times 10^{-5}$
35	$4,53 \times 10^{-4}$	$2,27 \times 10^{-4} \pm 1,38 \times 10^{-5}$
45	$4,36 \times 10^{-4}$	$2,18 \times 10^{-4} \pm 4,34 \times 10^{-5}$
55	$3,41 \times 10^{-4}$	$1,70 \times 10^{-4} \pm 2,75 \times 10^{-5}$
65	$2,86 \times 10^{-4}$	$1,43 \times 10^{-4} \pm 3,22 \times 10^{-5}$
75	$2,68 \times 10^{-4}$	$1,34 \times 10^{-4} \pm 1,73 \times 10^{-6}$

A variação do raio da partícula do resíduo de sisal em função da sua temperatura superficial encontra-se na Figura 4. Pode-se observar que o raio da partícula diminui de acordo com o aumento da temperatura superficial, indicando um comportamento linear. O comportamento do raio da partícula com a temperatura superficial foi representado por um modelo linear (Equação 23), que descreveu de maneira satisfatória o comportamento matemático do conjunto de dados obtidos, tendo um valor de R^2 equivalente a 0,8804. A Equação 23 foi utilizada no modelo matemático proposto por este trabalho.

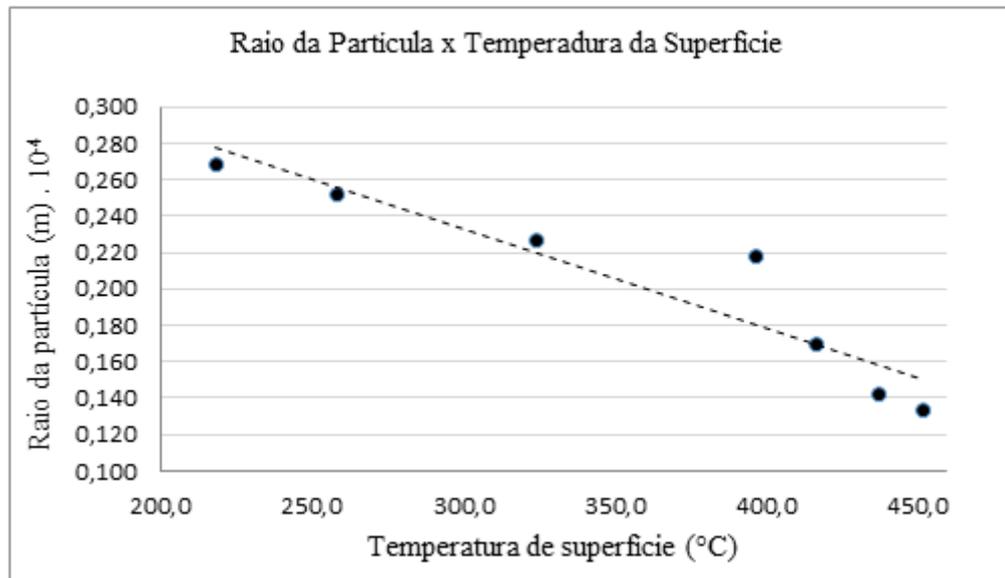


Figura 4 – Raio da partícula em relação à temperatura de superfície.

$$R_{(T_s)} = -5 \times 10^{-6} T_s + 0,0004 \quad \text{Eq. 23}$$

3.2 – Variação da massa da partícula em função do tempo de reação

As massas específicas das partículas de resíduo de sisal coletadas a cada tempo de reação foram determinadas por picnometria, com injeção de gás hélio, de acordo com o procedimento experimental descrito na metodologia desse trabalho (Figura 5).

A massa específica da partícula diminuiu de acordo com aumento do tempo de reação, mostrando um comportamento esperado. A representação matemática que melhor se ajustou aos dados experimentais foi a exponencial (Equação 24), cujo valor de R² foi 0,9313.

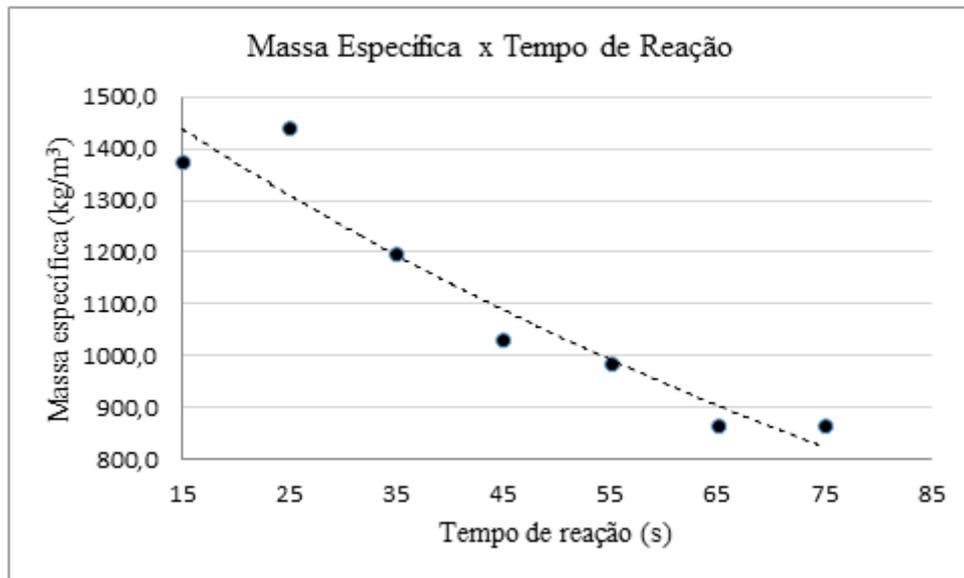


Figura 5 – Massa específica da partícula em relação ao tempo de reação.

$$\rho_{(t)} = 1653,8 \exp(-0,009 t) \quad \text{Eq. 24}$$

Foi considerado neste trabalho que a densidade média da amostra é igual a densidade de uma partícula. A variação de massa das partículas com o tempo de reação foi determinada a partir da massa específica das partículas.

$$\rho_{(t,Ts)} = \frac{m_t}{V_{Ts}} \quad \text{Eq. 25}$$

Substituindo a equação do volume de uma esfera na Equação 25, pôde-se determinar uma expressão matemática capaz de prever a massa da partícula em tempos distintos de reação (Equação 26).

$$m_t = \rho_{(t,Ts)} \frac{4}{3} \pi [R_{(Ts)}]^3 \quad \text{Eq. 26}$$

A influência do tempo de reação na massa da partícula pode ser observada na Figura 6.

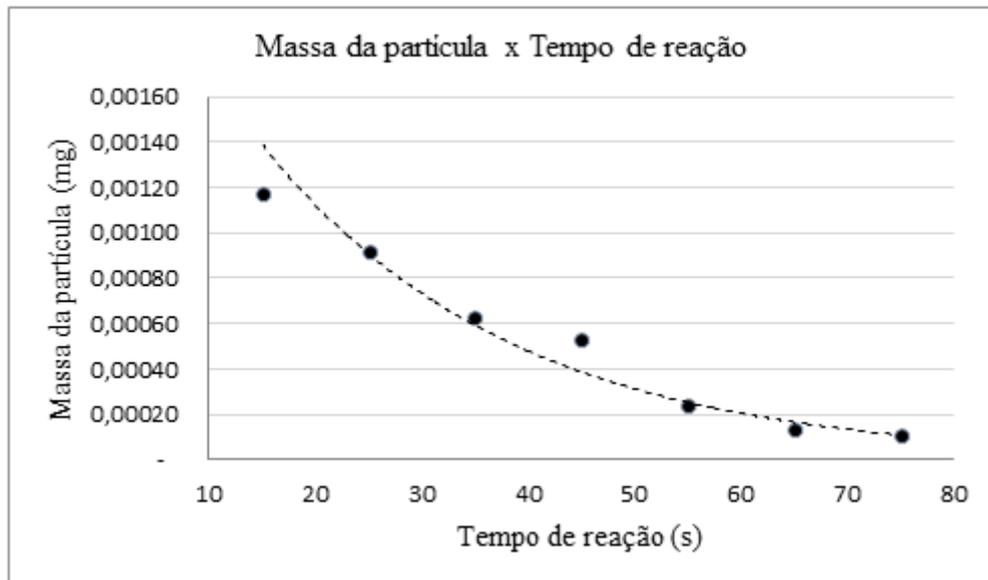


Figura 6 – Massa da partícula em função do tempo de reação

Um modelo polinomial (Equação 27) foi estabelecido para prever esta relação. Ele descreveu de maneira satisfatória o comportamento da massa da partícula com o tempo de reação, obtendo-se R^2 de 0,9313.

$$m(t) = 2 \cdot 10^{-11} t^2 - 4 \cdot 10^{-9} t + 2 \cdot 10^{-7} \quad \text{Eq. 27}$$

A Equação 28 representa a variação diferencial da massa da partícula com o tempo de reação.

$$\frac{dm}{dt} = 4 \cdot 10^{-11} t - 4 \cdot 10^{-9} \quad \text{Eq. 28}$$

3.3 - Variação da taxa de calor envolvida no processo de pirólise em relação à temperatura de superfície e tempo de reação

Na determinação do comportamento energético de uma partícula de biomassa, foi admitida a hipótese de que a taxa de calor que é absorvida pela partícula por condução equivale à taxa de calor utilizado pela partícula por convecção. Desse modo, utilizou-se a Lei de Newton do resfriamento (Equação 29), variando o raio da partícula em relação à sua temperatura de superfície.

$$Q_{(T_s,r)} = h_{int} (4\pi[R(T_s)]^2)(T_s - T_{\infty}) \quad \text{Eq. 29}$$

Após a realização dos cálculos necessários, foram encontrados os valores da taxa de calor, cuja influência da temperatura da superfície da partícula é mostrada na Figura 7.

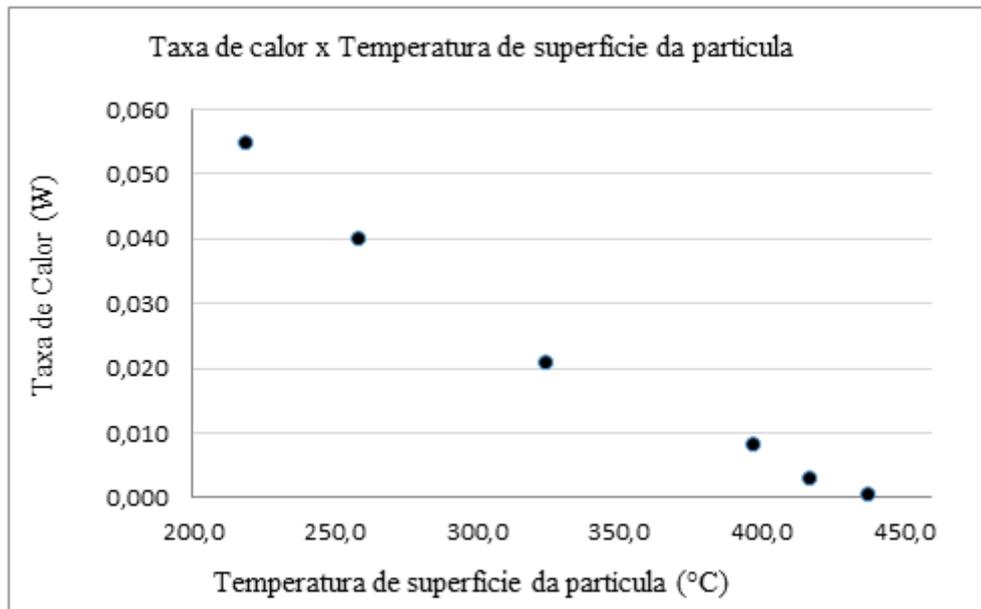


Figura 7 – Taxa de calor que entra na partícula em relação ao tempo de reação.

No momento em que a partícula de sisal foi inserida no reator, a mesma passou a absorver calor por condução e, paralelamente a isso, aconteceu o decaimento de massa através do processo de pirólise. Ao fazer uma análise da Figura 7, é possível constatar que a partícula de sisal inicialmente absorve calor por convecção, na qual a taxa de calor tenderá a zero quando a partícula atingir a temperatura de reação. Isso se deve ao fato de que a temperatura relativa entre a superfície da partícula e o ambiente reacional tenderá a zero com o aumento do tempo de reação.

3.4 - Capacidade calorífica da partícula em relação à temperatura de superfície e tempo de reação

A capacidade calorífica da partícula, em um determinado tempo de reação, foi calculada a partir da Equação 6, considerando a massa específica e o volume da partícula constantes (Equação 30).

$$C_{(T_s,t)} = \frac{h_{int} A (T_s - T_{\infty})}{\rho V \frac{dT_s}{dt}} \quad \text{Eq. 30}$$

A derivada da temperatura superficial da partícula em função do tempo (Equação 31) foi determinada a partir da Equação 13.

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{159,02}{t} \quad \text{Eq. 31}$$

Substituindo na Equação 30 a Equações 31, a equação da área e do volume de uma esfera em função do raio e a equação da variação da massa específica em função do tempo de reação (Equação 24) encontra-se a equação que determinará a capacidade calorífica da partícula em qualquer tempo de reação.

$$C_{(T_s,t)} = \frac{h_{int} 4\pi [-5 \cdot 10^{-6} T_s + 0,0004]^2 (T_s - T_{\infty})}{1653,8 \exp(-0,009t) \left(\frac{159,02}{t}\right) \left(\frac{4}{3}\pi [-5 \cdot 10^{-6} T_s + 0,0004]^3\right)} \quad \text{Eq. 32}$$

A variação da capacidade calorífica das partículas em função da temperatura superficial da partícula pode ser observada na Figura 8.

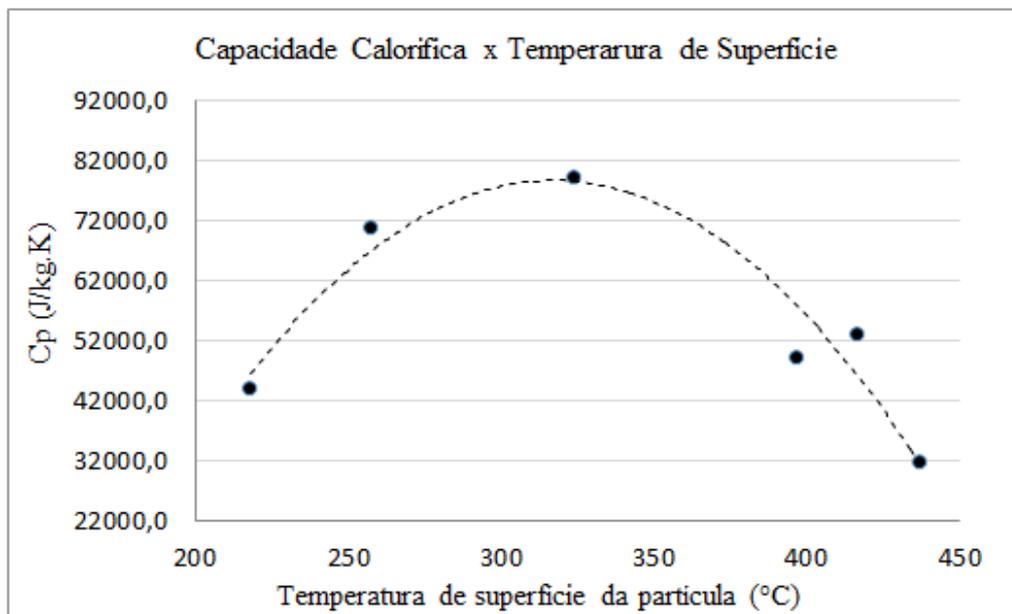


Figura 8 – Variação da massa específica da partícula em função da temperatura superficial da partícula.

A capacidade calorífica aumentou com o aumento da temperatura superficial, até uma temperatura de 330 °C, e depois diminuiu, até a temperatura superficial atingir a temperatura de reação. Este comportamento foi observado no trabalho de Capucine et al. (2014), que justificou esta tendência de comportamento pela liberação de energia provocada pela formação de novas substâncias ao longo da reação de pirólise. Estes autores realizaram medidas de capacidade calorífica em diversos tipos de biomassa submetidas à pirólise em reatores industriais. Foi observada que, em intervalos de temperatura de 353 K a 513K, a

capacidade calorífica do carvão apresentou um comportamento linear, no entanto, em intervalos de temperatura mais elevados (773K - 1073K), ela apresentou um decaimento aproximadamente parabólico.

O comportamento dos dados apresentados na Figura 8 é parabólico e, por isso, foi adotado o modelo polinomial (Equação 33) para representar a variação da capacidade calorífica em função da temperatura superficial da partícula. Este modelo descreveu de maneira satisfatória o comportamento matemático do conjunto de dados obtidos, tendo um valor de R² equivalente a 0,9081.

$$Cp_{(Ts)} = -3,2796Ts^2 + 2079,6Ts - 251073 \quad \text{Eq. 33}$$

3.5 – Validação das propriedades das partículas de biomassa

3.5.1 – Perfil da temperatura superficial e da massa da partícula ao longo da reação

Os perfis de temperatura superficial e massa da partícula com o tempo de reação foram obtidos a partir da resolução simultânea das Equações 7, 23, 24, 27, 28, 33. O sistema de equações foi resolvido utilizando o Software Matlab, adicionando o comando da função ODE15s, capaz de resolver sistemas de equações diferenciais rígidas.

O modelo foi simulado com dados iniciais obtidos na produção das alíquotas de biomassa em tempos distintos de reação. A temperatura inicial e tempo inicial de reação, utilizados na simulação, foram obtidos experimentalmente (Tabela 5).

Tabela 5 – Condições iniciais de uma partícula utilizadas na simulação.

Temperatura de superfície (°C)	218
Tempo inicial (s)	15
Massa da partícula (kg)	1,172 x 10 ⁻⁶

Os perfis da temperatura superficial e da massa da partícula ao longo da reação encontram-se, respectivamente, nas Figuras 9 e 10. Os dois perfis mostram-se coerentes com o que se espera de uma partícula sendo transformada quimicamente pelo calor. A Figura 9 mostra um perfil de temperatura superficial crescente até 25 s de reação, quando a partícula atinge a temperatura final de reação.

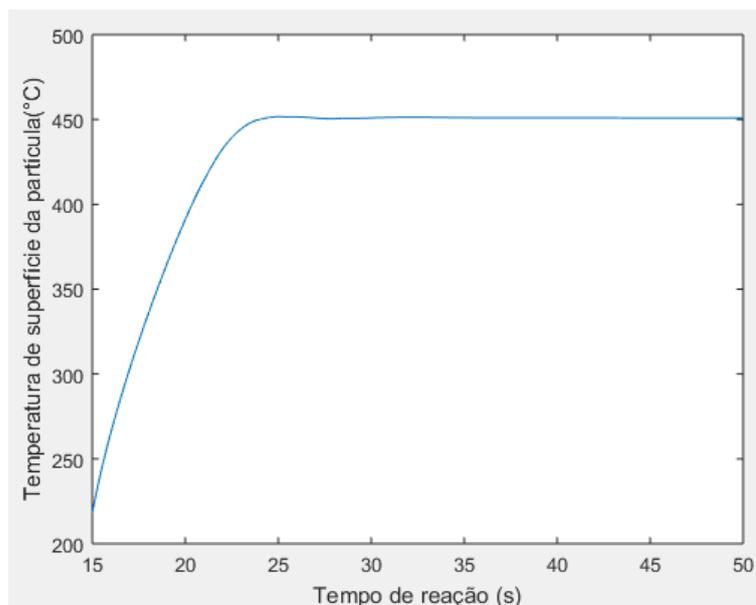


Figura 9 – Variação da temperatura de superfície em relação ao tempo de reação.

A Figura 10 mostra que a massa da partícula diminuiu até 25 s de reação, que foi o tempo no qual a temperatura superficial atingiu a temperatura do meio reacional, e após este tempo continuou diminuindo, mesmo com a temperatura superficial constante. Segundo Jambeiro et al. (2018), toda celulose e hemicelulose já foram consumidas até 437 °C e, a partir desta temperatura, a lignina continuou sendo consumida. Por este motivo, a massa da partícula de sisal diminuiu continuamente com a permanência da partícula no ambiente reacional.

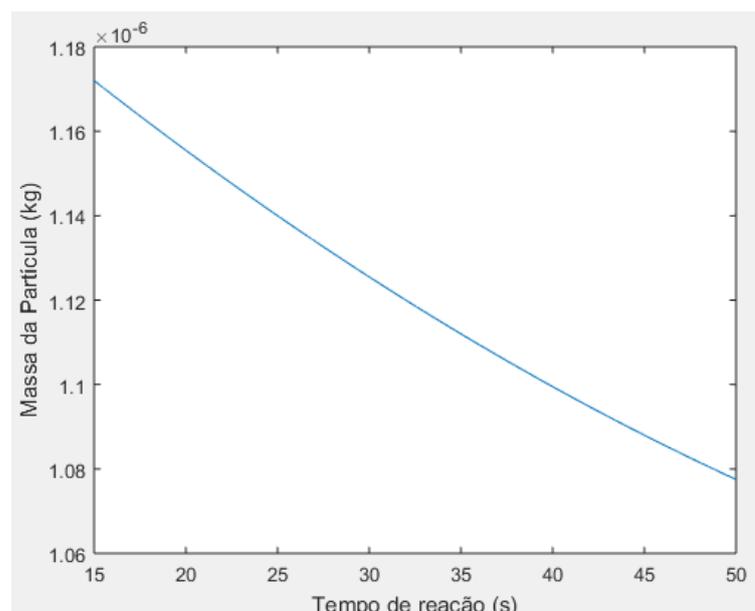


Figura 10 – Variação da massa de uma partícula de sisal em relação ao tempo de reação.

3.5.2 – Tempo de residência da partícula (carvão) na saída do reator piloto

Para obter a velocidade relativa da partícula foi necessário resolver as Equações 15-17, de maneira iterativa, considerando como valor inicial da velocidade relativa a velocidade do gás nitrogênio que escoava pelo reator (Tabela 6).

Tabela 6 – Condições de escoamento para o gás nitrogênio na temperatura de 450°C.

Propriedades do N ₂	
$\rho(\text{kg/m}^3)$	0,467
$\mu(\text{N.s/m}^2) \cdot 10^7$	327,5
Vazão de N ₂ (N.m ³ /h)	8,000
Velocidade do N ₂ (m/s)	0,283

O fluxograma utilizado para determinar o perfil de velocidade relativa da partícula encontra-se na Figura 11. No sentido de obter uma maior precisão nos resultados, as interações foram realizadas com intervalos de tempo de quatro segundos. O diâmetro da partícula, associado a diferentes intervalos de tempos, foi determinado com o uso das Equações 15 e 18.

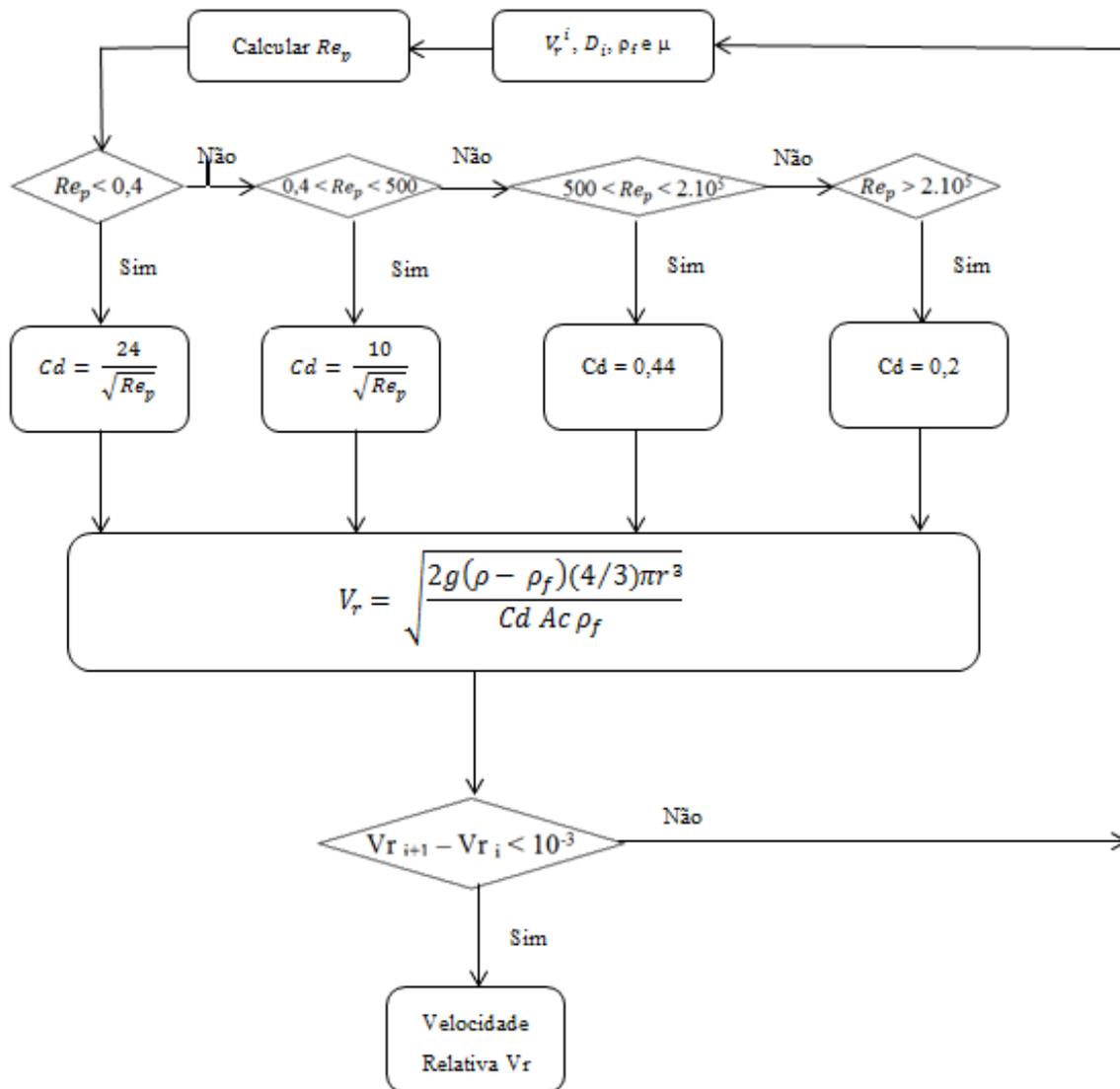


Figura 11 – Interação para a determinação da velocidade relativa da partícula.

A Tabela 7 exibe os valores de velocidade da partícula para todos os intervalos de tempo e a distância percorrida pela mesma dentro do reator. Conforme a metodologia descrita por este trabalho, o reator possui uma altura equivalente a 100 cm. No entanto, a distância entre a alimentação e a saída da partícula é de 80 cm devido ao material inerte contido no reator (areia). Dessa forma, conforme os resultados calculados, a partícula escapa do reator em um tempo de aproximadamente 35s, sendo este o tempo de residência da partícula.

Tabela 7 – Posição da partícula dentro do reator.

Tempo de reação (s)	Diâmetro da partícula (m)	Velocidade relativa (m/s)	Velocidade da partícula (m/s)	Posição da partícula (m)
15	0,00058	0,26562	0,01732	0,25987
19	0,00056	0,26458	0,01836	0,34879

23	0,00055	0,26164	0,02130	0,48988
27	0,00054	0,26202	0,02093	0,56498
31	0,00053	0,26080	0,02215	0,68650
35	0,00051	0,26029	0,02265	0,79272
39	0,00050	0,25990	0,02304	0,89856
43	0,00048	0,25956	0,02338	1,00547
47	0,00046	0,25880	0,02414	1,13457
51	0,00044	0,25808	0,02486	1,26788
55	0,00042	0,26028	0,02267	1,24663
59	0,00040	0,26032	0,02262	1,33468
63	0,00038	0,26001	0,02293	1,44467
67	0,00036	0,25969	0,02325	1,55770
71	0,00033	0,25979	0,02315	1,64376
75	0,00030	0,25926	0,02369	1,77650

3.5.3 – Massa de carvão calculada na saída do reator piloto

A fim de estimar a massa de carvão produzida em uma hora de operação, foi utilizado o tempo de residência estimado de uma partícula no reator ($t_f = 35$ s). Dessa forma, foi calculada a massa final de carvão, tomando como base a massa de uma partícula no tempo de 35 s mostrada na Figura 10.

A massa de partícula de resíduo de sisal que entra no reator foi calculada a partir do diâmetro médio da partícula antes da reação. Este valor foi determinado a partir da imagem desta partícula produzida pelo MEV, encontrando um raio equivalente médio de $2,68 \times 10^{-3} \pm 1,27 \cdot 10^{-4}$ m. Posteriormente, utilizando a Equação 19 estimou-se a quantidade de partículas de sisal (θ) que entram no reator ao longo de uma hora, considerando que essa quantidade seja mantida constante.

Com a vazão de alimentação relatada por Jambeiro et al. (2018) e a massa aproximada de uma partícula na alimentação (Tabela 8), calculou-se a quantidade média de partículas de resíduo de sisal que entram na alimentação por hora de produção, cujo resultado foi em torno de 16932 partículas.

Tabela 8 – Propriedades da partícula antes da reação.

Propriedades de uma partícula <i>in natura</i>	
Massa específica (kg/m ³)	1140,5
Raio do perímetro (m)	$2,68 \cdot 10^{-3}$

Volume (m ³)	8,06.10 ⁻⁸
Massa (kg)	9,20.10 ⁻⁵

A produção esperada por partícula de carvão (m_p), por segundo de reação, foi o resultante do produto entre sua massa específica, associada ao tempo de residência da partícula, e o volume equivalente na saída do reator, dividido pelo tempo de residência (t_f) (Equação 20). Na qual, o raio R (Equação 34) foi calculado tomando como base a simulação até o tempo de 35 s (tempo de residência). Dessa forma, o valor de massa fornecida pela simulação correspondente a $1,09.10^{-6}$ Kg.

$$R_{(t=t_f)} = \left[\frac{1,09.10^{-6}}{\rho_{(t=t_f)} \frac{4}{3}\pi} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{Eq. 34}$$

Por fim, usando a Equação 20, obteve-se produção de partículas (carvão) de $1,56 \times 10^{-8}$ Kg s⁻¹. No sentido de prever a massa de carvão esperada para uma hora de produção foi utilizado a Equação 21.

Para validar o resultado obtido na simulação, foi necessário compará-lo com dado experimental produzido por Jambeiro et al. (2018), sob condições operacionais semelhantes ao da simulação. Conforme dados experimentais obtidos por Jambeiro et al. (2018), o ponto ótimo de produção de bio-óleo ocorreu à temperatura de 450 °C, 8 N.m³/h de N₂, e 1557g de biomassa injetadas no reator, em uma hora de produção. Esta massa de carvão foi utilizada para validar os modelos desenvolvidos. A massa de carvão prevista pelo modelo foi de 0,94914g, enquanto que a massa de carvão experimental foi de 0,88856g. Como se pode observar, a massa de carvão predita foi muito próxima da massa de carvão experimental, obtendo-se uma discrepância entre estes valores de 6,38%, que é considerada baixa.

4.0 - Conclusão

Este trabalho foi desenvolvido a partir de equações de balanço disponíveis na literatura, cuja manipulação matemática envolveu o problema específico em estudo. Porém, vários obstáculos referentes a informações termodinâmicas sobre a partícula foram superados a partir da criação de novas metodologias, que ainda não estão disponíveis na literatura.

A principal metodologia desenvolvida neste estudo foi para identificar a temperatura da superfície da partícula durante uma reação de pirólise. Ela foi altamente relevante para a execução do trabalho, dando origem a várias medidas importantes como, por exemplo, a capacidade calorífica e massa específica da partícula, além do decaimento da massa ao longo da reação.

Foi perceptível que a realização da modelagem e simulação da pirólise de uma partícula de sisal em regime transiente não é um processo simples. No entanto, observou-se que a modificação do modelo da capacitância global acoplado a uma curva de decaimento de massa obtida experimentalmente, associada com as micrografias apresentou um resultado satisfatório. Fator ratificado e validado, quando confrontado com dados de simulação em relação à massa de carvão coletada na unidade piloto de produção, obtendo discrepância de 6,38%.

A partir da resolução do sistema de equações diferenciais, foi possível observar curvas que exibiram resultados satisfatórios, no que tange ao processo de variação de massa e temperatura de superfície da partícula durante o processo de pirólise. Estes resultados ajudaram a entender melhor o processo de pirólise de uma partícula, que será fundamental para uma futura otimização matemática do processo global.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

- A Área de troca térmica do leito fluidizado.
- Al Área de troca térmica da partícula.
- Cv Capacidade calorífica a volume constante.
- d Diâmetro interno do reator.
- D Diâmetro externo do reator.
- dx Altura da abraçadeira.
- E Energia interna.

Ec	Energia cinética.
Ep	Energia Potencial.
h	Coeficiente convectivo.
hint	Coeficiente convectivo dentro do reator.
NuD	Número de Nusselt relacionando o diâmetro externo do reator.
Pr:	Número de Prandtl do ambiente externo do reator.
Kj	Quilo joule.
Q	Taxa de calor.
Q'	Taxa de calor gerado por metro de abraçadeira.
R	Raio da partícula
RaD	Número de Rayleigh relacionando o diâmetro externo do reator.
Ts	Temperatura da superfície.
Tsint	Temperatura da superfície interna do reator.
T ∞	Temperatura de reação.
Tsext	Temperatura da superfície externa do reator.
Tamb	Temperatura do meio externo do reator.
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
U	Energia interna.
Ū	Energia interna específica do sólido.
α	Difusividade térmica do ar.
β	Coeficiente de expansão térmica.
ν	Viscosidade cinemática.
g	Aceleração da gravidade.

- ρ Densidade do sólido.
- Pr Número de Prandtl do ar externo ao reator.
- V Volume do sólido.

Referências

- Blokhin AV, Voitkevich OV, Kabo GJ, Paulechka YU, Shishonok MV, Kabo AG, et al. Thermodynamic properties of plant biomass components. Heat capacity, combustion energy, and gasification equilibria of cellulose. *J Chem Eng* , 2011; 3523–31.
- Bridgwater, A.V.; Meier B, D.; Radlein C, D. An overview of fast pyrolysis of biomass, p. 1502, 1994. *Organic Geochemistry* 30, 1999. p.1479±1493
- Bevilaqua, D. B., Rambo, M. K. D., Rizzetti, T. M., Cardoso, A. L., Martins, A.F.. Cleaner production: Levulinic acid from rice husks. *Journal of Cleaner Production*,v. 47, 2013.
- Bridgwater, A. V. Review of Thermochemical Biomass Conversion. Energy Research Group, Aston university, Birmingham, Crown Copyright, 2011.
- Bridgwater, A.V.; Meier B, D.; Radlein C, D. An overview of fast pyrolysis of biomass, p. 1502, 1994. *Organic Geochemistry* 30, 1999. p.1479±1493
- Bridgwater, A. V. Production of high grade fuels and chemicals from catalytic pyrolysis of biomass. *Catalysis Today*, no29, Elsevier, 1996. pp.285-295.
- Cantalino, A. T., Silva, E. A., Santana, M.. Sustainability of Sisal Cultivation in Brazil Using Co-Products and Wastes. *Journal of Agricultural Science*, v. 7, n. 7, p. 64–75, 2015.
- Capucine, D., Rodica, C., Guillaume, G., Authier, T. Heat capacity measurements of various biomass types and pyrolysis residues. *Fuel* 115 (2014) 644–651.

Carvalho, N. L., Bortolini, J. G., Barcellos, A. L. Biocombustíveis: Uma Opção Para o Desenvolvimento Sustentável. GEDECON - Gestão e Desenvolvimento de Contexto, IV Fórum de Sustentabilidade, Abril 2015.

Centi, G., Santen, R. A (editores). Catalysis for renewables: from feedstock to energy production. Wiley-VCH, Weinheim, 423 pp. 2007

Connor, M. A. Advances in thermochemical biomass conversion, p. 1502, 1994.

Crevasco, M.A. Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos. São Paulo: Editora Blücher, 2012.

Dellaert, S. N. C. (2014). Sustainability Assessment of the Production of Sisal fiber in Brazil. 2014.84 p. Master thesis (M.Sc. Sustainable Development: Energy and Resources). Faculty of Geosciences, Utrecht University.

Eichler, P.; Santos, F.; Toledo, M.; Zerbin, P.; Schmitz, G.; Alves, C.; Ries, L.; Gomes, F.,. Produção do Biometanol Via Gaseificação de Biomassa Lignocelulósica. Química Nova, Maio 2015.

Esposito, D., Antonietti, M. Redefining biorefinery: the search for unconventional building blocks for materials. Chemical Society Review, v. 44, 2015.

Ferrari, R. A.; Oliveira, V. S.; Scabio, A. Biodiesel de soja-taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. Química Nova, Vol. 28, No. 1, 19-23, 2005.

Yan, K., Jarvis, C., G,U, J.,Yan, Y.. Production and catalytic transformation of levulinic acid: A platform for speciality chemicals and fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 51, 2015.

Yan, L., Greenwood, A. A., Hossain, A., Yang, B. A comprehensive mechanistic kinetic model for dilute acid hydrolysis of switchgrass cellulose to glucose, 5-HMF and levulinic acid. The Royal Society of Chemistry, v. 4, n. 45, p. 23492, 2014.

Goldemberg, J.; Biomassa e energia Science 2007, Revista Química nova, São Paulo , 315, 808.

Huber, G. W.; Corma, A., 2007. "Synergies between bio- and oil refineries for the production of fuels from biomass". *Angewandte Chemie - International Edition*, v. 46, n. 38, p. 7184-7201

Huber, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A., 2006. "Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering". *Chemical Reviews*, v. 106, n. 9, p. 4044-4098

Incropera F. P., De Witt, D. P., *Fundamentos Transferência de Calor e de Massa*, 7ª edição. Guanabara Koogan, 2014.

Kaye, B. H. Particle Image *Análisis*, *ASM Handbook*, v. 7, p. 259-273, 1998.

Kirkwood BR, Sterne JAC. *Essential medical statistics*. 2nd ed. Malden: Blackwell Science, 2003.

Klass, D. L. *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. 1st Edition. San Diego, Califórnia, USA. Academic Press – An Imprint of Elsevier, 1998, 651 p.

Leite, R.C.; Leal. M.V.; *O Biocombustível no Brasil*. *Novos Estudos*. São Paulo, v. 78, Jul 2007. Pp . 1-2.

Martins, M. A. *Fibra de Sisal: Mercerização, Acetilação e Aplicação em Compósitos de Borracha de Pneu Triturado*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2001.

Niemelä, P.; Tolvanen, H.; Saarinen, T.; Leppanen, A.; Joronen, T. CFD based reactivity parameter determination for biomass particles of multiple size ranges in high heating rate devolatilization. All rights reserved. *Energy* 128 (2017) 676 e 687.

Rajika, J. K. A. T.; Narayana, M. Modelling and simulation of wood chip combustion in a hot air generator system. SpringerPlus (2016) 5:1166.

Sharifzadeh, M.; Sadeqzadeh, M.; Guo, M.; Borhani, T.; Konda, M.; Garcia., M.; Wang, L.; Hallett, J.; Shah, N. The multi-scale challenges of biomass fast pyrolysis and bio-oil upgrading: Review of the state of art and future research directions. Elsevier Ltd. All rights reserved, 2019.

Vissotto, J. P.; Neves, R. C.; Sanchez, C. G. Gaseificação de serragem de pinus em leito fluidizado. Revista Ciência e Tecnologia, v. volume 18, p. n.32, p.19-24, Junho 2015.

Varma, A. K., Mondal, P. Physicochemical characterization and kinetic study of pine needle for pyrolysis process, J Therm Anal Calorim (2016) 124:487–497.

Wang, J.; Lian, W.; Li, P.; Zhang, Z.; Yang, J.; Hao, X.; Huang, W.; Guan, G. Simulation of pyrolysis in low rank coal particle by using DAEM kinetics model: Reaction behavior and heat transfer. 0016-2361/_2017 Elsevier Ltd. All rights reserved

Webb, P.A., Orr, C., 1997. Analytical Methods in Fine Particle Technology. Micromeritics Instrument Corporation, USA, 301 pp.

Gibou, F., Fedkiw, R., Caflisch, R., Osher, S., 2003. A level set approach for the numerical simulation of dendritic growth. J. Sci. Comput. 19, 183–199.

Gibou, F., Fedkiw, R.P., Cheng, L.T., Kang, M., 2002. A second-order-accurate symmetric discretization of the Poisson equation on irregular domains. J. Comput. Phys. 176, 205–227.

Mostafa, S., Abdelkader, H., Eric, C., Anthony, W. Coupling the fictitious domain and sharp interface methods for the simulation of convective mass transfer around reactive particles: Towards a reactive Sherwood number correlation for dilute systems. Chemical Engineering Science 198 (2019) 334–351.

Bruchmüller, J., Vanwachem, B.G.M., Gu, S., Luo, K.H., Brown, R.C., 2012. Modeling the thermo chemical degradation of biomass inside a fast pyrolysis fluidized bed reactor. *AIChEJ.*58,3030–3042.

Lan, X., Xu, C., Wang, G., Wu, L., Gao, J., 2009. CFD modeling of gas–solid flow and cracking reaction in two-stage riser FCC reactors. *Chem. Eng. Sci.*64, 3847–3858.

Shi, Y., Yu, Z., Shao, X., 2011. Combination of the direct-forcing fictitious domain method and the sharp interface method for the three-dimensional dielectrophoresis of particles. *Powder Technol.* 210, 52–59.

Liu, X.D., Fedkiw, R.P., Kang, M., 2000. A boundary condition capturing method for Poisson’s equation on irregular domains. *J. Comput. Phys.* 160, 151–178.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Tarcísio de Oliveira Pereira – 45%

Carlos Augusto de Moraes Pires – 45%

Daniel Bemmuyal Passos Santos – 10%