

Estudo da pirólise rápida de Capim Elefante (*Pennisetum purpureum*) em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão

Study of the Elephant Grass (*Pennisetum purpureum*) fast pyrolysis in a bubbling fluidized bed reactor through the fine charcoal characterization

Edgardo Olivares Gómez

Orientador:

Prof. Dr. Luís Augusto Barbosa Cortez

Considerada uma forma inovadora de pirólise de materiais orgânicos, a pirólise rápida caracteriza-se por apresentar temperaturas moderadas, elevadas taxas de transferência de calor e massa e pequenos tempos de residência. Essas características fazem da tecnologia em leito fluidizado a mais apropriada para o melhor desenvolvimento dos processos físico-químicos que têm lugar durante a pirólise rápida. Por meio desse processo de termoconversão em reator de leito fluidizado, borbulhante ou circulante, pode-se obter um rendimento elevado de bio-óleo, considerado seu principal produto. Em plantas pilotos, são observados rendimentos da ordem de 60% a 65% (em massa, base seca) para o bio-óleo, além de gás e carvão vegetal residuais que são aproveitados como insumo energético para o próprio processo.

Com o objetivo de melhorar o conhecimento e gerar subsídios para a interpretação teórica do processo de pirólise rápida realizada em reator de leito fluidizado borbulhante, com biomassa vegetal polidispersa, dedicamos este estudo à caracterização das partículas de finos de carvão vegetal primário oriundas do processo, na sua relação direta com as condições operacionais e fluidodinâmicas do reator. A caracterização dessas partículas também atendeu à necessidade de dispor de dados para a modelagem matemática posterior a sua combustão, e para o estudo e desenvolvimento de sistemas mais eficientes de separação destes finos do fluxo de gases e vapores da pirólise, visando-se aumentar a qualidade do bio-óleo.

A pesquisa básica na área foi descrita, principalmente baseada nos princípios teóricos sobre a pirólise de materiais lignocelulósicos e variáveis de processo relacionadas, alguns aspectos sobre a modelagem matemática do processo de pirólise, e o seu desenvolvimento tecnológico.

Foi realizado, primeiramente, um estudo experimental e

teórico em instalações de bancada e condições ambientais, baseado em sistemas do tipo fluidizado, que avaliou as propriedades e características fluidodinâmicas dos sólidos participantes, a biomassa e o inerte. Analisa-se o efeito da granulometria e propriedades físicas dos materiais sobre a velocidade de mínima fluidização e velocidade terminal das partículas.

A planta onde foram realizados os experimentos de pirólise rápida foi projetada para operar com capacidade máxima de alimentação de 100kg/h de biomassa (base úmida), de fina granulometria (diâmetro mais provável máximo entre 1 a 2mm) e baixa densidade aparente à granel (abaixo de 60-70kg/m³ à umidade de equilíbrio de aproximadamente 10% base úmida). Nos experimentos uma vazão de alimentação de 70kg/h (base úmida) constante foi utilizada, valor considerado a partir dos experimentos exploratórios realizados. A velocidade superficial do gás de fluidização (parâmetro operacional) variou entre 0,090m/s e 0,156m/s com relação à temperatura média de operação do leito. Na mesma faixa de temperatura média do leito a velocidade superficial de mínima fluidização variava entre 0,008m/s e 0,010m/s para o inerte utilizado nos ensaios.

Para a coleta dos dados experimentais uma modelagem experimental baseada num planejamento fatorial completo e num planejamento central composto ortogonal-PCCO, foi utilizada. O nível de confiança estatística adotado para a análise dos resultados foi de 95% e, para alguns dos modelos matemáticos empíricos obtidos, um coeficiente de determinação de até 70% foi considerado satisfatório. Dois parâmetros foram essencialmente considerados no planejamento experimental, a altura do leito estático de inerte e a relação vazão mássica de ar atual à vazão mássica de ar estequiométrica, a qual, para as diferentes temperaturas médias do leito, estabelece a velocidade superficial

do gás (ar entrando pelo distribuidor). Vários outros parâmetros foram desenvolvidos para avaliar as características dos finos de carvão primário.

Os modelos matemáticos empíricos gerados foram discutidos à luz do fenômeno da pirólise em desenvolvimento. Analisa-se a influência das condições de operação do leito fluidizado borbulhante e parâmetros que caracterizam o processo de pirólise, nas propriedades que representam os finos de carvão primário obtidos, por exemplo, seu teor de voláteis e cinzas, teor de carbono e oxigênio elementar, a vazão de finos elutriados do reator, entre outras respostas. Uma análise da distribuição de tamanhos das partículas de finos de carvão é também realizada. O comportamento dinâmico do leito fluidizado borbulhante foi avaliado a partir do estudo dos perfis de pressão, temperatura e concentração de sólidos e porosidade ao longo da altura do reator.

Uma análise econômica preliminar do processo de pirólise rápida foi realizada, visando-se obter dados econômicos e financeiros relacionados com a produção de bio-óleo, por ser este produto seu principal resultado. Uma simulação econômica posterior permitiu obter as primeiras conclusões acerca da influência de parâmetros de operação nos principais índices econômicos e financeiros da planta na sua escala natural.

Abstract

Fast pyrolysis is an innovative process to convert organic materials under moderate temperature, high mass and heat transfer, and short residence time. Such characteristics make the fluid bed the most appropriate technology to process and better develop all physico-chemical biomass changes. Through the fluid bed (bubbling or circulating) thermoconversion process it is possible to obtain high yields of bio-oil as the main product. In pilot plants bio-oil typical yields are in the range of 60% to 65% wt (dry basis) and residual gas and char are used as an additional energy source in the process.

To improve the knowledge and provide subsidies for the theoretic elucidation of the fine biomass bubbling fluid bed fast pyrolysis, this study characterizes the primary fine char produced in the process and its relation to the reactor operational and fluid-dynamics conditions. The characterization of the fine char particles is also useful for making data available for modelling, studying and developing higher efficient systems to separate these particles from the pyrolysis gases and vapors aiming to improve the bio-oil quality.

The research is based mainly on theoretical principles about lignocellulosic material pyrolysis and its process variables, some

aspects of the pyrolysis process modeling and its technological development.

Firstly, it was carried out an experimental and theoretical study in a bench-scaled facility and under normal conditions based on the fluid systems. The solids fluid-dynamics properties and characteristics such as biomass and inert filling were evaluated. It were also analyzed the particle size and the materials physical properties effect on the minimal fluid velocity and on the particles final velocity.

The plant where the fast pyrolysis experiments were carried out was project to operate with a maximum feed capacity of 100 kg/h (wet basis), fine particle size (approximately 1 to 2 mm diameter) and low bulk density (lower than 60-70 kg/m³ at a approximate 10% humidity). It as employed a constant 70 kg/h feed rate (wet basis) which was considered an optimum rate based on the experiments carried out. The fluidization gas superficial velocity varied from 0.090 m/s to 0.156 m/s in relation to the bed operation average temperature. At the same bed average temperature, the minimal superficial fluidization velocity varied from 0.008 m/s to 0.010 m/s for the inert material used in the assay.

For the experimental data collection it was used an experimental modeling based on a complete factorial planning and on an ortogonal compound central planning (OCCP). It was achieved a 95% statistical data reliability and, for some empirical mathematics models, a 70% determination coefficient was considered satisfactory. It were considered two parameters for the experience planning: the inert material fixed bed height and the relation between the current air mass flow rate and the stequiometric air mass flow rate. This relation defines the gas superficial velocity for the bed different average temperatures. Other parameters were also considered to evaluate the char fines characteristics.

The empirical mathematical models were discussed in the light of the pyrolysis phenomenon being developed. It was analyzed the influence of the bubbling fluid bed operation conditions and the pyrolysis process parameters in the char fines properties such as volatile and ash content, elemental carbon and oxygen and the char flow rate, etc. A size distribution analysis for char fines was also carried out. The dynamic behavior of the bubbling fluid bed was evaluated based upon the pressure, temperature, solid concentration and the bed porosity through the reactor height.

A preliminary economic assessment of the fast pyrolysis process was carried out aiming to collect financial data related to the bio-oil production. A later economic simulation allowed to reach the first conclusions about the operational parameters influence in the main financial rates related to the plant in large scale.