



**Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Curso de Engenharia de Energia**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA GASEIFICAÇÃO DO  
CAROÇO DE AÇAÍ**

**Autores: Alexandre Cyrino de Sousa  
e Pedro José Caliman Vieira  
Orientadora: Professora Dra. Thaís Maia Araújo**

**Brasília, DF  
2014**



**Alexandre Cyrino de Sousa e Pedro José Caliman Vieira**

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA GASEIFICAÇÃO DO CAROÇO DE AÇAÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Profa. Dra. Thaís Maia Araújo.

Co-Orientador: Prof. Dr. Augusto César Mendonça Brasil.

**Brasília, DF  
2014**

## **CIP – Catalogação Internacional da Publicação\***

Sousa, Alexandre Cyrino de, Vieira, Pedro José Caliman

Estudo experimental da gaseificação do caroço de açaí /  
Alexandre Cyrino de Sousa e Pedro José Caliman Vieira.  
Brasília: UnB, 2014. 52 p.: il.; 29,5 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília  
Faculdade do Gama, Brasília, 2014. Professora Dra. Thaís Maia  
Araújo.

1. Gaseificação. 2. Cocorrente. 3. Biomassa I. Araújo, Thaís Maia. II.  
Estudo experimental da gaseificação do caroço de açaí.

CDU Classificação



**REGULAMENTO E NORMA PARA REDAÇÃO DE RELATÓRIOS DE PROJETOS  
DE GRADUAÇÃO FACULDADE DO GAMA - FGA**

**Alexandre Cyrino de Sousa e Pedro José Caliman Vieira**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 25/06/2014 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

---

**Profa. Dra.: Thaís Maia Araújo, UnB/ FGA**  
Orientadora

---

**Prof. Dr.: Augusto César Mendonça Brasil**  
Membro Convidado

---

**Prof. Dr.: Carlos Alberto Gurgel Veras**  
Membro Convidado

Brasília, DF  
2014

Esse trabalho é dedicado às crianças adultas que quando pequenas, sonharam em se tornar cientistas.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente às nossas famílias, pelo amor e pelo cuidado. Em especial, por terem acreditado nesse sonho, nos disponibilizando todos os recursos necessários para cumprirmos essa etapa da nossa vida, sempre dando força para continuarmos correndo atrás dos nossos objetivos, independente dos obstáculos.

À professora Thaís Maia, por seus ensinamentos, paciência e confiança ao longo da supervisão das atividades, tanto em relação ao trabalho de conclusão, quanto ao longo do curso. Ao professor Augusto Brasil, por acreditar neste trabalho e nos passar as orientações necessárias para sua conclusão.

Aos nossos colegas e amigos do curso de engenharia, que nos acompanharam durante esse trajeto, proporcionando muitos momentos de alegria e sempre nos ajudando nos momentos de dificuldade.

À Universidade de Brasília, pela educação de qualidade a que tivemos acesso.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário”. (Albert Einstein)

## RESUMO

Para a execução do presente trabalho foi construído uma bancada experimental em escala reduzida de um gaseificador, utilizando um reator de leito fixo cocorrente estratificado, com fins de compreender melhor o processo de gaseificação. A biomassa utilizada no reator foi o caroço de açaí, devido ao seu alto poder calorífico. Nos testes realizados, foram coletados dados de consumo de biomassa, temperatura de leito e massa dos produtos. Utilizando esses dados, com auxílio da metodologia de Tiangco e o software ComGas, foi possível determinar, por meio de simulação, a composição do gás e sua eficiência. O reator trabalhou a uma taxa de gaseificação de 135 kg/m<sup>2</sup>h, que está dentro do intervalo de gaseificação, determinado pelo modelo adotado, comprovando a eficácia da bancada.

**Palavras-chave:** Gaseificação. Cocorrente. Biomassa. Caroço de açaí



## ABSTRACT

For the implementation of this work a small experimental gasifier was built using a fixed bed downdraft reactor stratified, which purpose was better understanding the gasification process. The biomass used in the reactor was the core of acai, due to its high calorific value. During the tests, the consumption data of biomass, bed temperature and mass of the products were collected. Using these data, with the help of the Tiangco methodology and COMGAS software, it was possible to determine, through simulation, the gas composition and efficiency. The reactor worked at a gasifying rate of  $135 \text{ kg} / \text{m}^2 \cdot \text{h}$ , which is within the range of gasification, determined by the adopted model, proving the efficacy of the experimental set.

**Keywords:** Gasification. Downdraft. Biomass. Açai's core.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Oferta interna brasileira de oferta de energia elétrica em porcentagem em 2012 incluindo importação de energia (Fonte: ANEEL, 2013).....	16
Figura 2. Gaseificador contracorrente (Fonte: GBGasifired adaptado, 2012). ....	19
Figura 3. Gaseificador cocorrente (Fonte: Manglam Biogasifiers (adaptado, 2012). ....	20
Figura 4. Gaseificador de leito cruzado (Fonte: UNICAMP adaptado, 2012). ....	21
Figura 5. Gaseificador de leito fluidizado (Fonte: CSFMB adaptado).....	22
Figura 6. Representação do sistema de gaseificação. ....	29
Figura 7. Tubo em Y montado baseando-se no efeito Venturi.....	30
Figura 8. Opções de inserção de dados provenientes de análise elementar utilizando o software ComGas. ....	38
Figura 9. Seleção dos campos de gaseificação no software ComGas. ....	38
Figura 10. Seleção das opções no Software ComGas. ....	39
Figura 11. Comandos no ComGas.....	39
Figura 12. Janela de seleção dos intervalos de razão de equivalência desejados no software ComGas. ....	40
Figura 13. Configuração do sistema de gaseificação. ....	41
Figura 14. Comparação com os resultados de Tiangco no gráfico $\eta g$ versus $\psi$ .....	45
Figura 15. Gráfico Relação ar-combustível versus $\psi$ . ....	47
Figura 16. Gráfico de composição dos gases com razão de equivalência de 5,88. ....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Fontes de energia utilizadas no Brasil 2006/2007 (Fonte: MME, 2008, apud ANEEL, 2008).....	15
Tabela 2. Composição de gás de síntese para diferentes modelos de reator (Fonte: Stassen, 2005).....	21
Tabela 3. Reações químicas no reator de gaseificação (Oliveira, 1982).....	25
Tabela 4. Análise elementar do caroço de açai. ....	26
Tabela 5. Análise imediata do caroço de açai. ....	26
Tabela 6. Poder calorífico do caroço do açai.....	26
Tabela 7. Resumo dos resultados obtidos.....	44
Tabela 8. Razão de equivalência para $\psi = 135 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ . ....	46
Tabela 9. Resultados para $\psi = 200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ .....	49

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.2. OBJETIVO .....	17
1.3. ESTADO DA ARTE .....	17
1.4. PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO .....	18
1.4.1. Gaseificadores contracorrente .....	19
1.4.2. Gaseificadores cocorrentes .....	19
1.4.3. Gaseificadores de leito cruzado .....	21
1.4.4. Gaseificadores de leito fluidizado .....	22
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>23</b>
2.1. GASEIFICADORES COCORRENTES .....	23
2.2. REAÇÕES QUÍMICAS E ELEMENTARES DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO ..	24
2.3. BIOMASSA .....	25
2.3.1. Análise Elementar.....	26
2.3.2. Análise Imediata .....	26
2.3.3. Poder calorífico.....	26
2.4. PRODUTOS DA GASEIFICAÇÃO .....	27
<b>3. APARATO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>29</b>
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
4.1. VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO DA BIOMASSA .....	32
4.2. TAXA DE CONSUMO DA BIOMASSA .....	33
4.3. TAXA ESPECÍFICA DE GASEIFICAÇÃO .....	33
4.4. PODER CALORÍFICO INFERIOR DO COMBUSTÍVEL .....	33
4.5. FLUXO MÁSSICO DE COMBUSTÍVEL .....	34
4.6. ENERGIA DO COMBUSTÍVEL .....	34
4.7. EFICIÊNCIA .....	34
4.8. ENERGIA DO FLUXO DE GÁS .....	34
4.9. PODER CALORÍFICO INFERIOR DO GÁS .....	35
4.10. FLUXO VOLUMÉTRICO DE GÁS .....	35
4.11. MASSA DE GÁS .....	35
4.13. RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA .....	36
<b>5. OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR E COLETA DE DADOS</b> .....	<b>41</b>
<b>6. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>43</b>

6.1. RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA .....	45
6.2. RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA EM RELAÇÃO AO SOFTWARE COMGAS.....	47
6.3. MELHORIAS .....	48
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>8. REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS.....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Sucessivas crises do petróleo e prospecções sugerindo o tempo restante de uso de tal combustível tornam o cenário energético atual, tanto nacional quanto internacional, propício a investimentos em fontes de energia renováveis. Além disso, as legislações ambientais e acordos de diminuição de emissão de poluentes se mostram favoráveis nas buscas de alternativas viáveis do ponto de vista tecnológico, econômico e ambiental.

Dado a dimensão do uso de derivados do petróleo em caráter mundial e seus problemas decorrentes dos seus usos, processos alternativos e conhecidos para transformação de energia e obtenção de combustíveis têm sido largamente pesquisados para melhorias de rendimento e qualidade.

Embora o Brasil seja referência no uso de fontes de energias renováveis, ainda tem como principais fontes de energia as não renováveis. Energia esta que pode-se considerar não somente para geração de energia elétrica, mas também mecânica. Porém, é expressiva a ascensão da participação das energias renováveis, que entre 2006 e 2007 apresentou um aumento de 0,9%, conforme pode ser verificado nos dados da Tab. (1), totalizando 45,9% de toda a energia consumida no país (Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2008).

Em relação ao potencial elétrico brasileiro a principal fonte de energia é a renovável, em sua grande parte hidráulica. A energia proveniente do potencial hídrico é responsável por aproximadamente 77% do total para o ano de 2012 como indicado na Fig. (1) (ANEEL, 2013). Essa energia por meio da energia da água pode ser obtido por dois tipos de construções: usinas hidroelétricas (UHE), que geram mais do que 30MW, ou pequenas centrais hidroelétricas (PCH), que geram entre 1MW e 30 MW (Atlas da Energia Elétrica do Brasil, 2008). Porém, a crescente necessidade de aumento de oferta de energia elétrica e os entraves ambientais dificultam a construção de novas usinas hidroelétricas, enquanto que a construção de pequenas centrais hidroelétricas não é suficiente para acompanhar o ritmo do crescimento da demanda de energia elétrica. Ou seja, atualmente, esse entrave na energia hídrica incentiva a busca por formas alternativas, mas também de caráter renovável. Também difundido, há o uso de fontes renováveis no Brasil do tipo gás natural, carvão vegetal, eólica e também biomassa. Uma grande atenção tem sido voltada para a produção de energia elétrica a partir da biomassa principalmente em comunidades isoladas, região norte do país, onde é de fácil a obtenção de algum resíduo orgânico (Hinrichs & Kleinbach, 2009 e Balanço Energético Nacional, 2013).

Tabela 1. Fontes de energia utilizadas no Brasil 2006/2007 (Fonte: MME, 2008, apud ANEEL, 2008).

Especificação	Mil tep - toneladas equivalente de petróleo		Crescimento percentual (%)	Percentual em relação a toda a fonte energética (%)	
	2006	2007		2006	2007
Não-renovável	124.464	129.102	3,7	55,0	54,1
Petróleo e derivados	85.545	89.239	4,3	37,8	37,4
Gás natural	21.716	22.199	2,2	9,6	9,3
Carvão mineral e derivados	13.537	14.356	6,1	6,0	6,0
Urânio e derivados	3.667	3.309	-9,8	1,6	1,4
Renovável	101.880	109.656	7,6	45,0	45,9
Hidráulica e eletricidade	33.537	35.505	5,9	14,8	14,9
Lenha e carvão vegetal	28.589	28.628	0,1	12,8	12,0
Derivados de cana-de-açúcar	32.999	37.847	14,7	14,6	15,9
Outras renováveis	6.754	7.676	13,7	3,0	3,2
Total	226.344	238.758	5,5	100,0	100,0

Biomassa é conceituada como qualquer matéria orgânica que dela possa ser produzida algum tipo de energia: mecânica, elétrica ou térmica, por exemplo. Classificada a partir de sua origem, pode ser florestal, agrícola, rejeitos urbanos e industriais. O uso de combustível oriundo da biomassa já tem expressão no cenário nacional atual devido à capacidade brasileira de obtenção desses compostos orgânicos, pois ocupa o segundo lugar na matriz energética conforme se pode observar no gráfico apresentado na Fig. (1) (Couto, 2004). O uso de biomassa para geração de energia elétrica vem aumentando, pois em 2007 a participação que era de 3,7% (MME, 2008) vai para 6,8% em 2012 (ANEEL, 2013). Se for considerada ainda a

matriz energética total, tanto para energia elétrica quanto mecânica, a participação do uso de biomassa se torna ainda maior devido ao uso do etanol, proveniente da cana-de-açúcar, como combustível em automóveis.

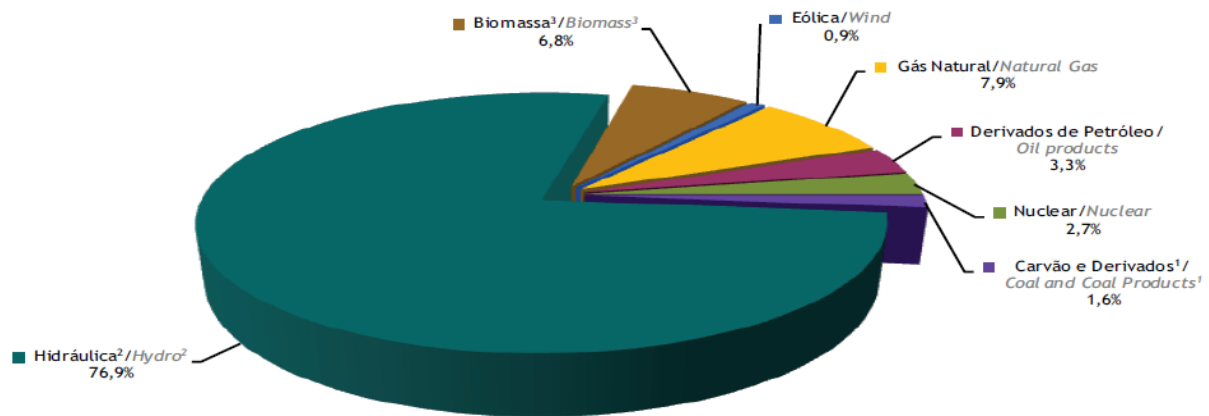


Figura 1. Oferta interna brasileira de oferta de energia elétrica em porcentagem em 2012 incluindo importação de energia (Fonte: ANEEL, 2013).

Dentre as inúmeras biomassas utilizadas na transformação de energia se encontra o caroço de açaí (*Euterpe oleracea*). O açazeiro (*Euterpe oleracea Mart.*) é uma palmeira facilmente encontrada na Amazônia, de grande importância cultural e econômica para as comunidades daquela região. Esta planta gera um fruto em que somente entre 5% e 15% são utilizados e o restante descartado. Entre esses resíduos encontra-se o caroço, que por possuir bom poder calorífico pode ser usado como combustível. Estudos realizados confirmam um poder calorífico próximo de 4.500 kcal/kg desses caroços, ou seja, para um potencial de produção do mesmo de 93.500 toneladas por ano, tem-se um potencial de produção de energia elétrica de 40.800 MWh/ano (Silva et al, 2004). Para uso dessa biomassa como combustível energético tem-se como processos mais utilizados a gaseificação, a pirólise e a biodigestão (Padilha et al, 2005). Neste trabalho foi considerada em específico a gaseificação.

A gaseificação é o processo de conversão de uma biomassa sólida composta por carbono, que produz um gás de síntese com um poder calorífico específico, cujo valor varia dependendo da biomassa utilizada. Diferentemente da pirólise não há presença de combustão nesse processo, mesmo havendo uma região de pirolisação no reator de gaseificação (Higman & Burgt, 2003).

Estabelecendo uma conexão entre biomassa, no caso o caroço de açaí, e gaseificação tem-se um processo de crescentes estudos para melhor conhecimento em relação ao seu potencial energético (Xavier et al, 2006; Silva et al, 2004 e Padilha, 2005). Porém, existem



algumas barreiras que ainda se mostram desconhecidas, como dados mais específicos que relacionem de forma mais precisa a reação entre reagentes (biomassa) e produto gerado.

Neste sentido é proposto no presente trabalho a construção de um reator, na configuração cocorrente, para estudo da composição dos gases e análise de sua eficiência, por meio do software ComGas que simula as reações de gaseificação e estipula as frações molares dos componentes do gás de síntese, como resultado. A eficiência do gás é determinada por um equacionamento de diversas variáveis da gaseificação, proposta por Tiangco et al (1996).

## 1.2. OBJETIVO

Para determinar a composição dos gases, e assim, garantir a gaseificação, o trabalho teve como um dos objetivos a construção de um gaseificador cocorrente de pequena escala utilizando como biomassa caroço de açaí. Para alcançar tal objetivo fez-se necessário conhecer a razão de equivalência e composição dos gases resultantes da gaseificação. O método de Tiangco foi seguido para determinar a razão de equivalência enquanto que o software ComGas foi usado como base.

## 1.3. ESTADO DA ARTE

A história mostra claramente que nossos antepassados faziam uso do fogo por meio da biomassa existente, para atividades de caça, proteção contra o frio e mais tarde para cocção de alimentos. A evolução conduziu esses indivíduos a usar tal processo em outras atividades como na produção de energia para a indústria cerâmica e metalúrgica. Gradativamente, as técnicas para a conversão de biomassa em biocombustível ou em energia térmica, por meio da combustão direta, foram desenvolvidas e modernizadas em processos que hoje são úteis e eficientes. Os primeiros trabalhos com gaseificação datam de 1669, realizados por Thomas Shirley, e, com o aperfeiçoamento do processo, surgem os primeiros resultados publicados (Siemens, 1889; Dowson & Larter, 1907 e Goldman & Jones 1939).

Durante as duas grandes guerras mundiais, os trabalhos e pesquisas relacionadas à conversão térmica utilizando a biomassa foram estimulados devido à escassez do petróleo. Porém, logo após este período, os trabalhos envolvendo o processo da gaseificação foram esquecidos por um tempo, devido ao baixo preço dos combustíveis fósseis. Entretanto, depois dos dois grandes choques do petróleo da década de 1970, o mundo ficou alerta para a necessidade de encontrar novas fontes de energia e novos processos de transformação. Somado a isso, o aumento acelerado dos custos dos combustíveis fósseis, preocupação mundial com a emissão de gases poluentes e os problemas geopolíticos gerados, a atividade

de pesquisa em conversões termoquímicas de biomassa tem sido estimulada (Hinrichs & Kleinbach, 2009).

Existem em desenvolvimento no Brasil mais de onze projetos de gaseificadores de biomassa. Dentre eles destacam-se os projetos da UNIFOR, UNICAMP, UFPA, UNB, UFSM, UNIFACS, UFPE e UNIFEI, assim como projetos em desenvolvimento em diversos países. A Secretaria de Desenvolvimento do Estado de São Paulo anunciou a aprovação da primeira fase do projeto de Centro de Desenvolvimento de Gaseificação de Biomassa (CDGB) no Parque Tecnológico de Piracicaba em São Paulo, da construção de uma planta de gaseificação para bagaço de cana-de-açúcar em 2010. O projeto, com custo de 80 milhões de dólares, foi viabilizado por uma parceria entre o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep) e o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) (IPT, 2010).

#### 1.4. PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

O processo de gaseificação consiste na conversão termoquímica de biomassa, combustível sólido, em gás de síntese, que é um combustível gasoso rico em CO e  $H_2$ , por meio da oxidação parcial, que é uma combustão com baixo teor de oxigênio em relação à queima estequiométrica da biomassa a elevadas temperaturas (PUC, 1998). Durante este processo, ocorrem, principalmente, reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução, que envolvem as fases sólida e gasosa. Esta conversão pode ser realizada em vários modelos de reatores podendo ser de leito fixo ou leito fluidizado. O gás gerado (gás de síntese) pelo processo de gaseificação pode ser utilizado para a combustão em motores ou turbinas para geração de potência e energia elétrica. No entanto, estes gases contêm impurezas que devem ser tratadas antes que sejam despejados nestes dispositivos mecânicos. As principais impurezas encontradas nestes gases são alcatrão, cinzas voláteis, compostos nitrogenados, resíduos carbonosos e, por estes motivos, se torna necessário desenvolver tecnologias para a limpeza desses gases quentes para que o processo de gaseificação de biomassa se torne comercialmente viável (Sánchez, 2010).

Os reatores de gaseificação podem ser classificados de acordo com o poder calorífico do gás, com o tipo e forma de biomassa utilizada, pressão do gaseificador, agente de gaseificação (ar, oxigênio, vapor), ou de acordo com a direção do movimento relativo entre a biomassa e o agente de gaseificação. Em geral, a última forma de classificação é a mais utilizada, sendo classificados em gaseificadores de contracorrente (*updraft*), cocorrentes (*downdraft*), fluxo cruzado e leito fluidizado (Sánchez, 2010). Os gaseificadores mais comuns

são os de leito fixo de contracorrente e cocorrentes, por serem eficientes e mais simples de serem construídos.

#### 1.4.1. Gaseificadores contracorrente

A Figura (2) traz um esquema de funcionamento de um gaseificador contracorrente que mostra que a biomassa é introduzida no topo do reator, enquanto que a entrada de ar se dá na parte inferior do sistema. Este tipo de reator tende a ter uma eficiência térmica alta, devido à baixa temperatura dos gases na saída do gaseificador, além do fato de que os gases quentes provenientes da zona de combustão pré-aquecerem a carga (biomassa) ao passar por ela nas demais zonas. Tendo a simplicidade como principal característica, possui, no entanto, a desvantagem de produzir um gás extremamente impuro. Esse fato se deve porque nenhum dos alcatrões e outros produtos de pirólise são craqueados na zona de combustão, já que são levados pelo fluxo de gases para o topo do gaseificador e que podem causar incrustações nas tubulações seguintes à saída do reator (Unicamp, 2002). No entanto, o efeito de uma filtragem na saída pode auxiliar na remoção dessas impurezas tornando o gás mais limpo.

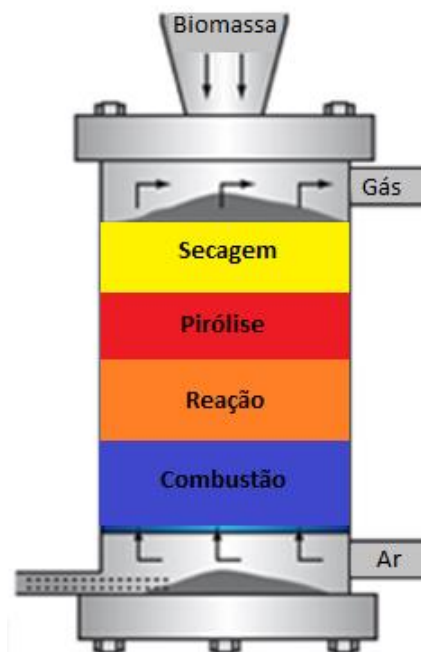


Figura 2. Gaseificador contracorrente (Fonte: GBGasified adaptado, 2012).

#### 1.4.2. Gaseificadores cocorrentes

Nos gaseificadores cocorrentes a biomassa é introduzida no topo e o ar tem um fluxo descendente, no mesmo sentido do fluxo da carga, cujo esquema é ilustrado na Fig. (3). A característica essencial deste gaseificador é que ele é projetado de modo que os alcatrões e

voláteis provenientes da zona de pirólise são direcionados a passar pela zona de combustão (oxidação), permitindo o craqueamento parcial do alcatrão, o que resulta num gás de saída com baixo teor de alcatrão. Como os gases deixam o gaseificador a temperatura cerca de 900-1000 °C, a eficiência energética global de um gaseificador cocorrente é baixa, devido ao conteúdo de calor elevado ao transitar pelo gás quente (Tecnologia da Combustão, 2002). O teor de alcatrão do gás produto é menor do que para um gaseificador contracorrente, mas o conteúdo de partículas do gás é elevado (Reed, 1988).

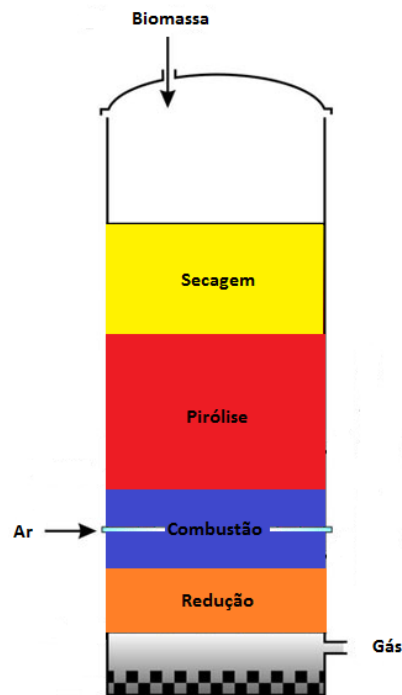


Figura 3. Gaseificador cocorrente (Fonte: Manglam Biogasifiers (adaptado, 2012).

Stassen (2005) realiza uma comparação entre os produtos dos gaseificadores contracorrente e cocorrente utilizando madeira como biomassa, indicada na Tab. (2). Portanto, existe uma diferença na composição dos gases de síntese para cada modelo de gaseificador.

Tabela 2. Composição de gás de síntese para diferentes modelos de reator (Fonte: Stassen, 2005).

Produtos da reação	Modelo de gaseificador (mistura de alimentação - % de base úmida)	
	Contracorrente (10 – 20)	Cocorrente (10 – 20)
Hidrogênio	8 – 14	12 – 20
Monóxido de carbono	20 – 30	15 – 22
Metano	2 – 3	1 – 3
Dióxido de carbono	5 – 10	8 – 15
Oxigênio	45 – 45	45 – 55
Alcatrão em gás g/Nm <sup>3</sup> gás seco	2 - 10	1 - 3

### 1.4.3. Gaseificadores de leito cruzado

Os gaseificadores de leito cruzado tem sua construção baseada no mesmo sentido de injeção de ar e de saída de ar, exemplificado na Fig. (4). Desse modo a zona de combustão e redução ficam muito próximas uma da outra, o que deixa a produção de gases bem maior e de forma mais rápida que nos outros gaseificadores de leito fixo.

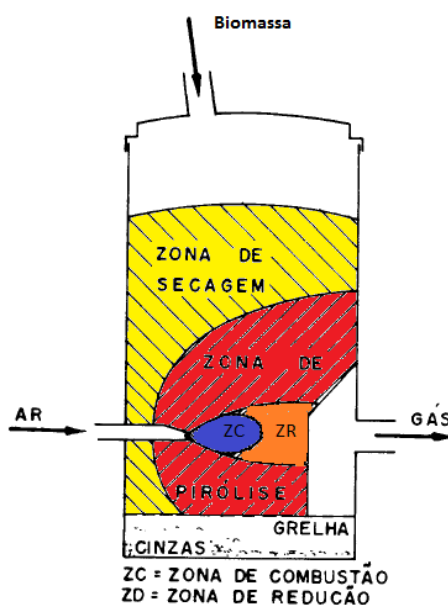


Figura 4. Gaseificador de leito cruzado (Fonte: UNICAMP adaptado, 2012).

Como vantagem possui rápida resposta durante a alimentação do reator, simplicidade construtiva devido a proximidade das zonas de alta temperatura e peso reduzido. Em contrapartida, exigem combustíveis mais homogêneos em relação a umidade e composição química.

#### 1.4.4. Gaseificadores de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado, ilustrado na Fig. (5), é composto por partículas inertes (areia, alumina, dolomita) em seu leito, que são fluidizados e mantidos em suspensão com o combustível pelo agente gaseificador (ar, oxigênio, ar enriquecido com oxigênio), em um fluxo ascendente. O agente gaseificador é introduzido ao sistema com velocidade suficiente para manter as partículas num estado de suspensão. Esses reatores podem ter duas configurações: leito borbulhante e circulante. A diferença básica é que no borbulhante, as partículas sólidas, denominadas elutriadas, não recirculam, enquanto que no gaseificador circulante esse material recircula. Pelo fato desses reatores terem o fluxo de ar na direção vertical, no sentido ascendente, faz com que adquiram melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura dentro do gaseificador, já que no leito fluidizado não existem zonas de reação. As temperaturas de operação de leito fluidizado, que estão em um intervalo de 700-900 °C, são inferiores às temperaturas máximas do de leito fixo (PUC, 1998).

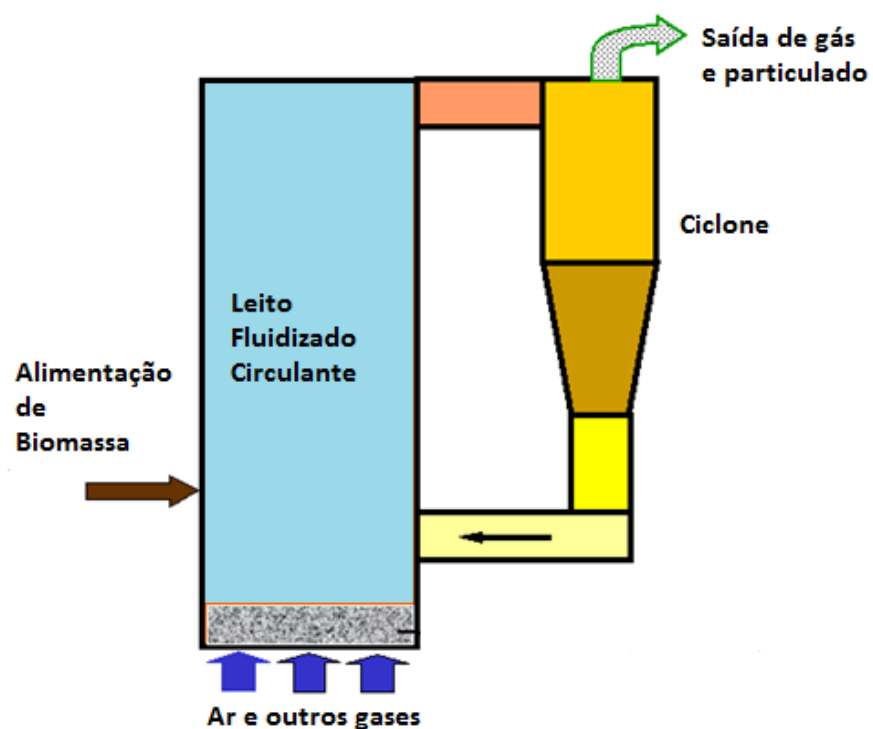


Figura 5. Gaseificador de leito fluidizado (Fonte: CSFMB adaptado).

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

O gaseificador cocorrente foi escolhido devido à menor quantidade de alcatrão produzida e à melhor qualidade do gás de síntese.

Os principais conceitos e embasamentos teóricos a respeito da gaseificação em fluxo cocorrente serão abordados neste capítulo. Também serão mencionadas as reações que ocorrem na gaseificação, as análises da biomassa e os produtos gerados por este processo.

### 2.1. GASEIFICADORES COCORRENTES

A gaseificação é um processo dividido em quatro etapas: secagem, pirólise, combustão (oxidação) e redução, que podem ser verificadas no desenho da Fig. (3). Posteriormente à adição de biomassa em um gaseificador ocorre a secagem, que envolve processos físicos como o transporte de massa e de calor, pelo fato de que o teor de umidade da biomassa é reduzido pela adição de calor que evapora a água contida na carga. Esse teor pode variar entre 5% a 35%.

Uma vez ultrapassado a etapa de secagem as partículas de biomassa dentro do reator continuam em aquecimento e passam a entrar na etapa de pirólise. A pirólise, por definição, implica em uma decomposição por meio do aquecimento, com temperaturas entre 350 a 600°C. Neste processo a matéria volátil, devido às temperaturas elevadas na biomassa, é reduzida resultando na liberação de gases de hidrocarbonetos contidos na biomassa. Os gases liberados podem condensar a uma temperatura ambiente para gerar alcatrões líquidos (Basu, 2010).

A terceira etapa é o processo de combustão (oxidação), região onde ocorre a reação entre a biomassa sólida e o oxigênio no ar. Esta reação é responsável pela geração de calor utilizado nas demais etapas da gaseificação (secagem, redução e pirólise), além da formação de dióxido de carbono e água. Contudo, se o oxigênio estiver em quantidades estequiométricas, oxidação parcial do carbono pode ocorrer, resultando na geração de monóxido de carbono.

A última etapa é o processo de redução, zona na qual ocorre a maioria das reações que conduzem a formação dos gases produzidos no reator como o monóxido de carbono (CO), o metano ( $CH_4$ ) e o hidrogênio ( $H_2$ ), que ocorrem em temperaturas entre 600°C a 950 °C. Estes gases em conjunto com os formados na zona de pirólise, que não foram queimados na zona de oxidação, constituem o gás combustível, produto do processo de gaseificação (Sánchez, 2010). Dependendo da configuração do gaseificador, a zona de redução pode ser antes ou

depois da zona de pirólise, mas é sempre seguido da zona de combustão em relação ao fluxo de ar.

Para este trabalho foi determinado o reator cocorrente, pela baixa quantidade de alcatrão produzido nesta configuração. O alcatrão gerado no processo de gaseificação de biomassa, após condensado influencia no funcionamento e rendimento do sistema, obstruindo canalizações e seu acúmulo proporciona perdas de carga ao longo do escoamento. A direção do fluxo de ar, ascendente ou descendente, e a temperatura de operação durante o processo também influenciam numa maior ou menor produção de alcatrão. Nos gaseificadores cocorrente e de leito fluidizado nota-se uma menor concentração de alcatrão. Enquanto que nos gaseificadores contracorrente, devido a uma maior eficiência térmica, uma maior concentração de alcatrão é encontrada nos produtos oriundos do processo (CENBIO, 2002).

## 2.2. REAÇÕES QUÍMICAS E ELEMENTARES DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Por ser um processo termoquímico, a gaseificação depende de diversas reações químicas em diferentes faixas de temperatura, que no caso são determinadas pelas zonas de pirólise, oxidação e redução, para que esse processo seja realizado com sucesso. O processo em si de gaseificação acontece na faixa de temperatura entre 800 e 1800 °C, sendo esta temperatura influenciada pelas características do combustível utilizado e por isso foram medidas as temperaturas durante a fase de testes do deste trabalho. As principais reações químicas decorrentes do processo de gaseificação são as que envolvem carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e água (Higman & Burgt, 2008). A Tabela (3) foi construída para mostrar as diferentes zonas do processo e as principais reações envolvidas.

Na zona de combustão é onde ocorrem as reações de oxidação (na presença de oxigênio) ou exotérmicas, ou seja, libera calor para o ambiente. A liberação de calor é crucial para que as reações subsequentes sejam realizadas com êxito. As reações de (1) a (3), na Tab. (3), identificam essa zona.

Já na zona de redução, a reação de Boudouard, definida como (4) na Tab. (3), é considerada a reação mais importante do processo de gaseificação de biomassa. É uma reação heterogênea de redução-oxidação de uma mistura de monóxido de carbono e dióxido de carbono a uma determinada temperatura. Nesta, ocorre o desequilíbrio proporcional do monóxido de carbono em dióxido de carbono. Esta reação implica que, sob baixas temperaturas, o equilíbrio é deslocado para a reação exotérmica de formação de dióxido de



carbono, e, sob altas temperaturas, a formação endotérmica de monóxido de carbono é o produto dominante.

Além da reação de Boudouard, outras reações encontram-se na zona de redução como reação de gás água, deslocamento gás-água e metanação (Oliveira, 1982).

A reação de gás água, definida como (5) na Tab. (3), é uma reação química endotérmica e heterogênea, na qual o carbono reage com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio (Oliveira, 1982).

A reação (6) da Tab. (3) é a reação de metanação, exotérmica e heterogênea, em que o carbono reage com o hidrogênio para a formação do metano.

Enquanto que as reações de deslocamento de gás-água reduzem os produtos das reações heterogêneas citadas anteriormente, a reação (7) da Tab. (3) é uma reação exotérmica, onde o monóxido de carbono reage com o vapor de água para formar dióxido de carbono e hidrogênio. Ao mesmo tempo, a reação (8) da mesma tabela é uma reação endotérmica, em que o metano reage com vapor de água para formação de monóxido de carbono e hidrogênio.

Tabela 3. Reações químicas no reator de gaseificação (Oliveira, 1982).

Zona de Combustão	Reações químicas	Energia da reação (MJ/kmol)	Identificação da reação
Reação de oxidação do carbono	$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$	-111	(1)
		-283	(2)
	$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$	-242	(3)
	$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$		
Reação de Boudouard	$C + CO_2 \rightarrow 2CO$	172	(4)
Reação de gás-água	$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$	131	(5)
Reação de metanação	$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$	-75	(6)
Reações Homogêneas (fase gasosa)	$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$	-41	(7)
	$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$	206	(8)

### 2.3. BIOMASSA

Os aspectos técnicos mais importantes a serem considerados para caracterizar a biomassa do ponto de vista energético são: análise elementar e imediata e poder calorífico.

Essas análises são importantes ao trabalho, pois os resultados foram os dados de entrada do software ComGas, sendo assim possível a simulação da composição do gás.

### 2.3.1. Análise Elementar

Realiza-se uma composição química elementar para determinar em frações de peso dos principais constituintes: oxigênio (O); hidrogênio (H); nitrogênio (N); enxofre (S); carbono (C) e cinzas (A) conforme indicado na Tab. (4). Este último é composto por todos os elementos não combustíveis (Santos, 2011).

Tabela 4. Análise elementar do caroço de açaí.

Caroço de açaí	O (%)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)
Ghesti (2012)	36,490	51,430	5,640	0,900	0,917
Santos (2011)	43,37	46,17	6,01	4,33	0,13

### 2.3.2. Análise Imediata

As análises imediatas da biomassa resultam em dados sobre umidade ( $\omega_{bu}$ ), teor de voláteis ( $T_v$ ), teor de cinzas ( $T_{cinzas}$ ) e teor de carbono fixo ( $T_{cb}$ ) conforme indicado na Tab. (5). O teor de voláteis expõe uma melhor ou pior capacidade da queima do material enquanto que o teor de carbono fixo é a diferença da fração de carbono que iniciou o processo com a parte que remanesceu na amostra após o aquecimento.

Tabela 5. Análise imediata do caroço de açaí.

Caroço de açaí	$\omega_{bu}$ (%)	$T_v$ (%)	$T_{cinzas}$ (%)	$T_{cf}$ (%)
Ghesti (2012)	14,72	85,38	0,20	14,42
Santos (2011)	24,41	79,19	1,23	19,59

### 2.3.3. Poder calorífico

Poder calorífico é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa de um agente combustível, e se encontra indicado na Tab. (6).

Tabela 6. Poder calorífico do caroço do açaí.

Caroço de açaí	Poder calorífico (kJ/kg)
Ghesti (2012)	18141,00
Santos (2011)	17962,95

## 2.4. PRODUTOS DA GASEIFICAÇÃO

Os produtos da gaseificação são compostos pelo gás, alcatrão, cinzas e água, sendo o gás o produto de maior interesse, por ser possível utilizá-lo como combustível em motores de combustão ou fontes de calor para caldeiras. Mas para se obter os resultados propostos no trabalho foi necessário quantificá-los.

O volume de gás foi determinado utilizando a metodologia proposta por Tiangco, que coletando dados experimentais foi possível equacioná-los até se obter a quantidade de gás produzido. Para se determinar a composição do gás de síntese resultante da gaseificação foi realizado uma comparação utilizando o Software ComGas. Pela composição dos gases pode-se determinar o valor agregado do produto da gaseificação e eficiência do processo.

O alcatrão foi definido na reunião do protocolo de medição do alcatrão EU/IEA/US-DOE em Bruxelas (1998) que alcatrão é um hidrocarboneto de maior peso molecular que o benzeno (Maniatis & Beenackers, 2000). Porém, para cada tipo de gaseificador e de biomassa essa cadeia carbônica pode sofrer variações.

## 2.5. METODOLOGIA DE TIANGCO

A metodologia foi desenvolvida para definir a taxa específica de gaseificação ( $\psi$ ) ideal do gaseificador de pequena escala, para se obter a maior eficiência do gás. Essa taxa é uma razão entre o consumo de biomassa do gaseificador (kg/h) e área da secção do reator, com um valor de  $\psi$  compreendido entre 100 e 400 kg/m<sup>2</sup>.s. No trabalho feito por Tiangco, foram realizados testes com reatores de diversos diâmetros utilizando casca de arroz como biomassa. Foi comprovada nos testes que com a variação da taxa específica de gaseificação se alterava a eficiência do gás, e assim, foi criado um equacionamento para se calcular a eficiência do gás frio a partir desta taxa. Relacionando eficiência e taxa específica de gaseificação, Tiangco chegou a um valor de aproximadamente 200 kg/m<sup>2</sup>.h considerado com a maior eficiência de um reator de pequena escala.

Alguns parâmetros necessários para execução deste trabalho foram obtidos durante a realização dos testes. Da maneira que o gaseificador foi montado os dados que diretamente puderam ser obtidos foram de temperatura, massa de biomassa, alcatrão, cinzas e água, além do tamanho da coluna de biomassa consumida no reator e o tempo em que isso ocorreu. Entretanto, a vazão de ar não foi possível ser mensurada com os equipamentos disponíveis pelo laboratório de gaseificação. Entretanto, com o uso do método de Tiangco et al (1996) é possível se obter a massa de ar consumida durante o processo de gaseificação com a finalidade de se encontrar a razão de equivalência em que operou o gaseificador. O cálculo de

cada variável foi realizado de modo a obter uma continuidade, relacionando os parâmetros entre si.

## 2.6. SOFTWARE COMGAS

O software é uma ferramenta de simulação da composição do gás gerado em dois tipos de reação, combustão ou gaseificação. Conhecendo-se os seus dados de entrada tais como composição elementar da biomassa, teor de umidade e poder calorífico. Foram realizados cálculos de equações das reações químicas. Assim determinou-se a composição do gás em relação a razão de equivalência. E com o auxílio desse software foi possível verificar se de fato ocorreu a gaseificação nos testes realizados e qual foi a composição do gás produzido.

### 3. APARATO EXPERIMENTAL

Para realização dos testes de gaseificação do caroço de açaí, foi construído um aparato em escala laboratorial, em que três testes completos foram conduzidos. O conjunto consistiu de um reator de tubo de quartzo conectado a um condensador para coleta do alcatrão.

O gaseificador tipo cocorrente foi composto de um reator de tubo de quartzo de 16 mm de diâmetro e 3mm de espessura, devido à capacidade em suportar altas temperaturas e transparência para a observação das zonas de gaseificação. O leito do reator era composto de uma tela de material metálica, capaz de suportar altas temperaturas, e que foi dimensionada com o mesmo diâmetro do reator. O reator não foi acoplado a nenhum dispositivo que consumisse os gases produzidos, como um motor de combustão interna. Os gases produzidos foram conduzidos para um condensador para a captura do alcatrão.

O ar do gaseificador do tipo cocorrente, geralmente injetado pela parte superior, nesta montagem utilizou-se um efeito Venturi. Ou seja, o gás foi puxado pela canalização, entrando pelo topo do reator e indo até a área de coleta de gás. Para gerar esse efeito utilizou-se um aspirador de pó que possuía a função de compressor. Um diagrama esquemático do conjunto reator e condensador é apresentado na Fig. (6).

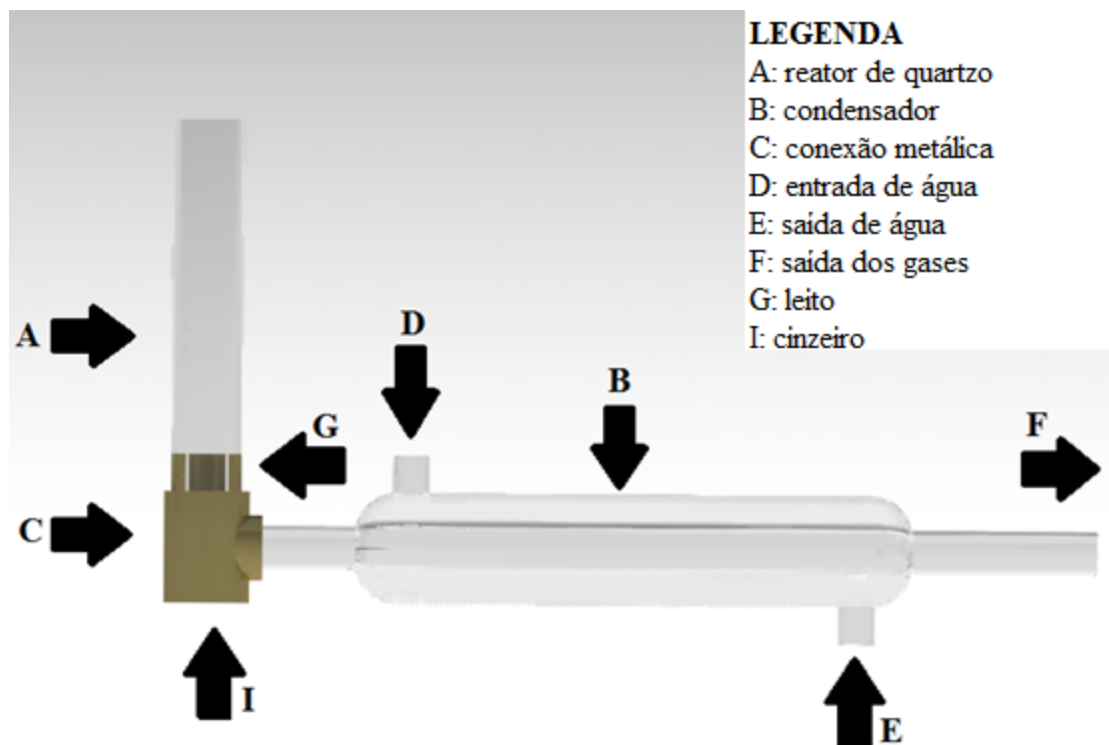


Figura 6. Representação do sistema de gaseificação.

O reator de quartzo, indicado pela letra (A) na Fig. (6) com o leito posicionado (G), direcionado a um condensador de vidro (B) foi conectado por uma conexão metálica de ferro (C). Esta conexão além de conectar o reator com o condensador tem a função de estocar as cinzas provenientes da combustão (I). Foi estabelecido que a conexão fosse de ferro para suportar as temperaturas elevadas dos gases produzidos na gaseificação, além de associar o baixo custo a função estática do sistema em virtude de sua maior massa em relação ao reator.

O condensador foi escolhido para capturar alcatrão, porque a troca de calor ocasionada pela diferença de temperatura entre do fluido de passagem e do alcatrão presente no gás, pois este condensa a temperatura ambiente. Indicado pelas letras (D) na entrada e (E) na saída, o fluido, no caso a água, resfriou o gás contaminado, condensando o alcatrão nas paredes do condensador.

Na saída do condensador foi deixada uma mangueira de silicone para coleta de gás para possíveis análises, indicada em (F) na Fig. (6).

Um sistema composto por uma conexão em “Y” foi adotado para que o acesso a entrada do reator ficasse livre, permitindo uma alimentação de combustível simplificada. Além disso, foi definida essa configuração para que o alcatrão condensável presente no gás não fosse diretamente para o aspirador de pó, na função de sucção do ar, o que ocasionaria sua deterioração com o tempo e imprimindo maior custo ao experimento. Utilizando materiais de baixo custo como conexão em Y de PVC, *Silver Tape*® e cola para materiais de PVC, conseguiu-se adaptar às mangueiras de saída do condensador e do aspirador de pó conforme é observado na Fig. (7).

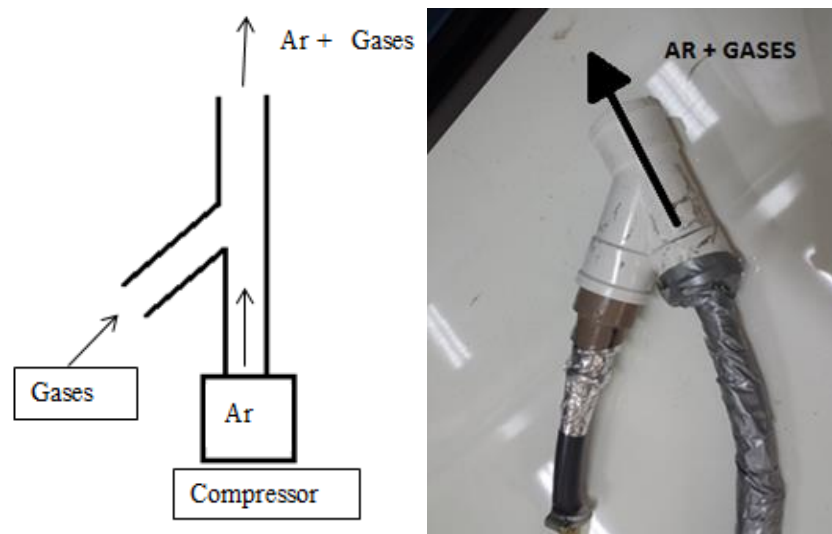


Figura 7. Tubo em Y montado baseando-se no efeito Venturi.

Foi utilizado um compressor de ar ligado a conexão em “Y”, representado Fig. (7), junto à saída do condensador, a jusante do reator, permitindo a admissão de ar no sistema devido à diferença de pressão criada nesta conexão, pelo efeito Venturi. O sistema gera fluxo de ar utilizando o recalque do compressor para manter uma pressão negativa no ponto de saída do reator. Assim, esse sistema facilita a extração dos gases e impede que os gases passem pelo compressor, prejudicando seu funcionamento.

#### 4. METODOLOGIA

O método a ser utilizado como referência foi o artigo científico de Tiangco et al (1996), que consiste na determinação da melhor taxa específica de gaseificação para reatores de gaseificação cocorrente de pequena escala. Partindo dessa taxa, Tiangco descreve uma metodologia com a finalidade de determinar o diâmetro do reator de gaseificação. Porém, como neste trabalho a dimensão do gaseificador foi definida previamente, o desenvolvimento foi inverso, ou seja, os parâmetros foram calculados utilizando os dados de secção do reator.

Com o uso do método de Tiangco et al (1996), determinou-se a eficiência do gás produzido no processo de gaseificação e com o software ComGas determinou-se a razão de equivalência. Entretanto, para determinação desses parâmetros foi necessário obter experimentalmente os dados de velocidade de processamento de biomassa e consumo de biomassa, utilizando o reator projetado. Ao final dos procedimentos, os resultados obtidos nos testes experimentais foram comparados aos resultados de Tiangco utilizando a taxa específica de gaseificação ideal, ou seja, de maior eficiência, sugerida pelo modelo.

Nos experimentos, utilizando o gaseificador, puderam ser obtidos dados de temperatura, massa de biomassa, alcatrão, cinzas e água, além da altura da coluna de biomassa consumida no reator e o tempo em que isso ocorreu. A massa de ar consumida foi determinada com o uso do método de Tiangco, com a finalidade de se encontrar a razão de equivalência em que operou o gaseificador.

O cálculo de cada variável foi realizado de modo a obter uma continuidade, relacionando os parâmetros entre si.

A sequência de obtenção e a definição dos parâmetros são mostradas nos subitens subsequentes.

##### 4.1. VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO DA BIOMASSA

A velocidade com que a biomassa é consumida é conhecida como velocidade de processamento da biomassa ( $v_{pb}$ ) e pode ser obtida pela Eq. (1), em que  $x$  é a altura da coluna de biomassa consumida no reator em metros (m) e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo do decaimento da biomassa, em segundos (s).

$$v_{pb} = \frac{x}{\Delta t} \quad [m/s] \quad (1)$$



Esse parâmetro foi obtido por meio da medição da distância entre as marcações que foram feitas no tubo de quartzo e o tempo médio de decaimento da biomassa entre as marcações.

#### 4.2. TAXA DE CONSUMO DA BIOMASSA

A taxa de consumo de biomassa é necessária para conhecer a altura do leito que se encontra a cada zona de reação da gaseificação e analisar a influência sobre a velocidade do escoamento. Pode ser calculada com a Eq. (2) ,

$$\dot{m}_{cb} = v_{pb} \times \rho_{ap} \left[ \frac{kg}{s \cdot m^2} \right] \quad (2)$$

Em que  $\dot{m}_{cb}$  é a taxa de consumo da biomassa,  $v_{pb}$  é a velocidade de processamento da biomassa em metros por segundo (m/s) e  $\rho_{ap}$  é a massa específica aparente em (kg/m<sup>3</sup>). O  $\rho_{ap}$  é determinado conhecendo-se a massa total que foi gaseificada em quilogramas (kg) e o volume ocupado no reator (m<sup>3</sup>). Este volume foi determinado, pois se mediu a altura que a massa ocupa no reator e a área da secção transversal era conhecida. A massa foi obtida pesando-se a biomassa que foi usada nos testes.

#### 4.3. TAXA ESPECÍFICA DE GASEIFICAÇÃO

A taxa específica de gaseificação ( $\psi$ ) foi proposta por Tiangco para estabelecer um padrão numérico na construção do gaseificador de pequeno escala. É definido por Tiangco como a quantidade de biomassa consumida pela área da secção do reator. A taxa específica de gaseificação, ( $\psi$ )  $\left[ \frac{kg}{m^2 \cdot h} \right]$ , para valores que define um bom regime de gaseificação está compreendida entre  $100 \leq \psi \leq 400$ .

Considera-se a taxa de consumo de biomassa em horas. Assim, tem-se a Eq. (3),

$$\psi = 3600 \dot{m}_{cb} \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot h} \right] \quad (3)$$

#### 4.4. PODER CALORÍFICO INFERIOR DO COMBUSTÍVEL

O poder calorífico inferior do combustível ( $PCI_b$ ) é um parâmetro que é obtido experimentalmente e cada biomassa possui um PCI específico, que quantifica o valor de energia disponível em uma quantidade de massa. No caso do caroço de açaí foi utilizado o valor de 18.141 kJ/kg obtido por Ghesti et al (2012).

#### 4.5. FLUXO MÁSSICO DE COMBUSTÍVEL

O fluxo mássico de combustível ( $\dot{m}_b$ ) é definido pela quantidade de massa total inserido no gaseificador em função do tempo. Pode ser determinado obtendo-se a massa que foi consumida por um determinado tempo em horas conforme Eq. (4),

$$\dot{m}_b = \frac{m_{cons}}{t_{bio,cons}} \left[ \frac{kg}{h} \right] \quad (4)$$

Utilizando-se a Velocidade de processamento de biomassa ( $v_{pb}$ ), onde se tem a variação de biomassa pelo tempo, e conhecendo o volume da biomassa pode ser determinado o consumo de massa pelo tempo.

#### 4.6. ENERGIA DO COMBUSTÍVEL

A energia do combustível determina a quantidade de energia, por parte do combustível, que entra no reator por tempo. É obtida pelo uso da Eq. (5), em que  $\dot{q}_b$  é o fluxo de energia (W), o  $PCI_b$  é o poder calorífico inferior do combustível (MJ/kg) e  $\dot{m}_b$  é o fluxo mássico da biomassa (kg/h).

$$\dot{q}_b = \dot{m}_b PCI_b \quad [W] \quad (5)$$

#### 4.7. EFICIÊNCIA

A eficiência do gás é um importante parâmetro para determinar a quantidade de energia do combustível permaneceu disponível no produto da gaseificação (gás). Uma vez obtido o valor da energia do combustível ( $\dot{q}_b$ ), foi possível obter a eficiência do gás ( $\eta_g$ ) utilizando a Eq.(6), sendo uma equação proposta por Tiangco. Esta utiliza na sua formulação o Poder Calorífico Inferior e a taxa específica de gaseificação para determinar a eficiência.

$$\eta_g = \frac{1}{PCI_b} \left( 17,8627 - \frac{930,7079}{\psi} - 0,0231\psi \right) \quad (6)$$

#### 4.8. ENERGIA DO FLUXO DE GÁS

A energia do fluxo de gás determina a quantidade de energia produzida no reator em forma de gás. É determinada a energia de fluxo do gás ( $\dot{q}_g$ ) com a Eq. (7), calculada pelo produto do fluxo de energia da biomassa ( $\dot{q}_c$ ) e a eficiência ( $\eta_g$ ) da energia da biomassa que permaneceu no gás.

$$\dot{q}_g = \dot{q}_b \eta_g \quad [W] \quad (7)$$

#### 4.9. PODER CALORÍFICO INFERIOR DO GÁS

O poder calorífico inferior do gás ( $PCI_g$ ) é definido como a quantidade de calor produzido por uma determinada quantidade de combustível, no caso o gás, quando entra em combustão. Foi determinado com o uso da Eq. (8),

$$PCI_g = 5,9417 - 8,2893 \times 10^{-3} \psi \quad [MJ/m^3] \quad (8)$$

#### 4.10. FLUXO VOLUMÉTRICO DE GÁS

O fluxo volumétrico de gás é definido como a quantidade, em volume, de gás produzido no reator em um período de tempo. É possível calcular o fluxo volumétrico do gás ( $\dot{V}_g$ ), com o poder calorífico inferior do gás definido, utilizando a Eq. (9).

$$\dot{V}_g = \frac{\dot{q}_g}{PCI_b} \quad [m^3/h] \quad (9)$$

#### 4.11. MASSA DE GÁS

É a quantidade total de massa de gás produzido na gaseificação, variável importante para se realizar o balanço de massa do sistema. A massa de gás é obtido utilizando a Eq. (10),

$$m_g = \frac{PCI_b \times m_b \times \eta_g}{PCI_g} \quad [kg] \quad (10)$$

#### 4.12. MASSA DE AR

O balanço de massa é definido como o somatório das massas dos reagentes ( $\sum m_{reagentes}$ ) é igual ao somatório da massa dos produtos ( $\sum m_{produtos}$ ), ambos com unidades equivalentes (kg). A aplicação desta equação na gaseificação de biomassa pode ser expressa pela Eq. (11),

$$m_b + m_{ar} = m_{gás} + m_{alcatrão} + m_{cinzas} + m_{H_2O} \quad (11)$$

Em que ( $m$ ) é a massa e subíndices correspondem às substâncias envolvidas no processo, sendo b para a biomassa.

Nesta equação de balanço de massa, os reagentes são biomassa, medida em laboratório, e ar, que é a variável a ser descoberta. Os produtos das reações são compreendidos como o gás de síntese, calculado pela metodologia explicada anteriormente, o alcatrão, as cinzas e água, medidas em laboratório. A massa de ar tem sua importância na

determinação da razão ar-combustível do gaseificador, que leva à determinação da razão de equivalência da mistura ar-combustível.

#### 4.13. RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA

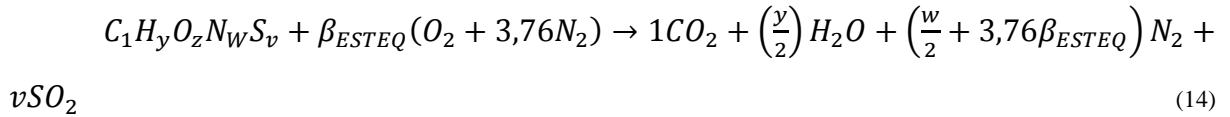
A razão de equivalência é um parâmetro estabelecido pela razão ar-combustível real sobre a razão ar-combustível estequiométrica. A relação ar-combustível é uma fração entre a massa de ar ( $m_{ar}$ ) e a massa de combustível ( $m_{comb}$ ), consumidas no processo como pode ser vista na Eq. (12).

$$\Theta = \frac{m_{ar}}{m_{comb}} \quad (12)$$

A razão de equivalência é definida pela Eq. (13).

$$\Phi = \frac{\left(\frac{m_{comb}}{m_{ar}}\right)_{REAL}}{\left(\frac{m_{comb}}{m_{ar}}\right)_{ESTEQUIOMÉTRICO}} \quad (13)$$

A vazão do ar é que controla a razão da combustão na gaseificação. Na prática, processos que envolvem combustão asseguram excesso de ar, com o objetivo de forçar a combustão completa mesmo em casos de deficiência na mistura, e manter o baixo nível de emissão de CO. Para a relação ar-combustível estequiométrica da gaseificação, foi necessário uma avaliação da composição da biomassa pela análise elementar, levando-se em consideração a fração mássica dos elementos e suas respectivas massas moleculares. Pela Eq. (15) tem-se a composição química da reação em relação com os coeficientes molares de cada elemento. Fixando o coeficiente do carbono como 1 para x, a composição química dos outros elementos foi obtida em função do coeficiente do carbono e assim com os menores índices possíveis utilizando a Eq. (16). Nesta equação foi utilizada a composição percentual dos elementos apresentados na Tab. (5), massas moleculares de cada elemento e a massa de biomassa ( $m_b$ ). Obtida a fórmula química da biomassa, conseguiu-se calcular a massa de biomassa estequiométrica. A Eq. (15) é utilizada para encontrar a massa de ar estequiométrica a partir dos coeficientes da composição química da biomassa. Com as massas de ar e biomassa estequiométricas chegou-se na razão ar-combustível estequiométrica. Como já foi dito anteriormente, com a razão ar-combustível real e estequiométrica, pode se obter a razão de equivalência da gaseificação.



$$\beta_{ESTEIQ} = 1 + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} + v \quad (15)$$

$$x = 1, y = \frac{H*m_b}{C*MM_H}, z = \frac{O*m_b}{C*MM_O}, w = \frac{N*m_b}{C*MM_N}, e v = \frac{S*m_b}{C*MM_S} \quad (16)$$

Para reações de gaseificação utiliza-se a razão de equivalência, ou seja, uma fração de quantidade estequiométrica de ar aplicado. Melhores resultados são obtidos com razões de equivalência de aproximadamente 0,25. Razões inferiores são indicativos de predominância de pirólise, com produção de um gás mais rico, porém com mais alcatrão. Razões superiores a 0,25 são indicativos de combustão excessiva, com produção de um gás mais fraco (Oliveira, 1982).

#### 4.14. SOFTWARE COMGAS

O software ComGas foi proposto por Itai (2011) e simula as reações de gaseificação e plotando gráficas a respeito dos resultados obtidos. Para realizar tal tarefa o software exige dados como PCI, análise elementar e teor de umidade da biomassa e intervalos de razão de equivalência que se desejam submeter à simulação.

Utilizando resultados do Software ComGas pode-se estimar a composição do gás obtido para a razão de equivalência calculada com a metodologia sugerida por Tiangco.

Na simulação o processo foi considerado adiabático. Inicialmente seleciona-se a opção “Análise Elementar” no campo sinalizado e ilustrado na Fig. (8), onde são inseridos os dados da Tab. (5) da análise elementar. Também são informados dados de poder calorífico da biomassa, apresentado na Tab. (6), e do teor de umidade, na Tab. (5). Só são preenchidos os campos selecionados, após selecionar a opção “Definir PCS” em “Propriedades do Combustível”.

Figura 8. Opções de inserção de dados provenientes de análise elementar utilizando o software ComGas.

Selecionando a opção “espécies”, a janela ilustrada pela Fig. (9) abrirá e o usuário deverá desmarcar todas as opções do campo de combustão e marcar todas as reações de gaseificação conforme indicado.

Figura 9. Seleção dos campos de gaseificação no software ComGas.

Fecha-se a janela de seleção das reações de gaseificação para retornar a tela inicial do software. Ainda na tela do ComGas, na área ilustrada pela Fig. (10) selecionam-se os campos “C/Oxd.” e “Tabela”. Estes dados apenas seleciona a razão entre combustível (caroço de açaí) e oxidante (ar).

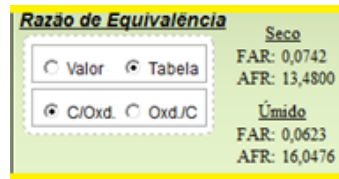


Figura 10. Seleção das opções no Software ComGas.

Após estes procedimentos, selecionam-se as opções “Tabela 1” e “Tabela 2” mostradas na Fig. (11). Ao escolher a primeira opção, foi gerada a janela representada na Fig. (12).

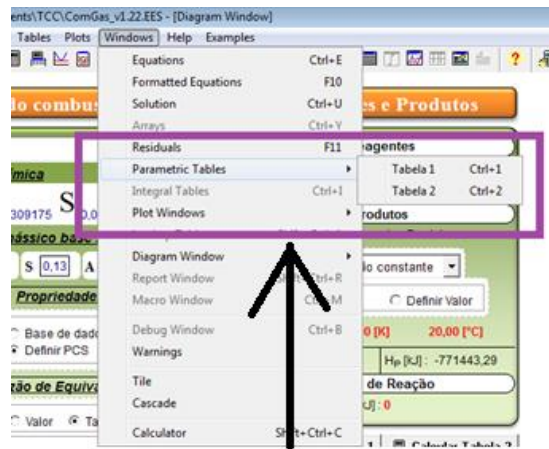


Figura 11. Comandos no ComGas.

Nessa tela, indicada na Fig.(12), foi selecionado os intervalos de razão de equivalência ( $\Phi$ ) do gráfico que foi gerado pelo software. Repetiu-se o processo para a “Tabela 2”.

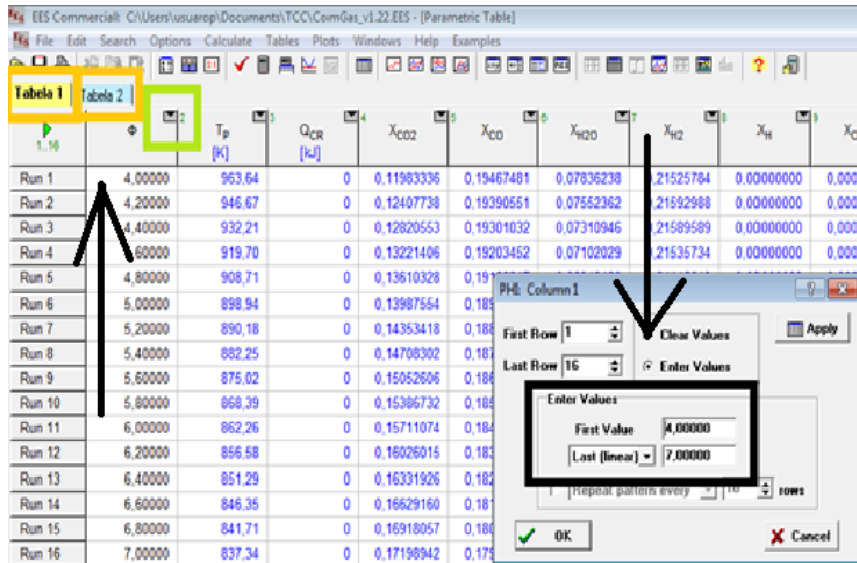


Figura 12. Janela de seleção dos intervalos de razão de equivalência desejados no software ComGas.

Essa série de comandos foi necessária para informar ao software os dados necessários para serem realizadas as equações das reações e os intervalos dos gráficos resultantes da simulação. Para obter os resultados, selecionou-se ao final dos procedimentos descritos a opções, “Calcular Tabela 1”, “Calcular Tabela 2” e “Visualizar Gráfico”, nessa ordem. Ao realizar estes comandos, é gerado a tela com os gráficos das frações mássicas e molares da gaseificação.



## 5. OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR E COLETA DE DADOS

Com a configuração final do gaseificador definida para operação, diversos testes foram conduzidos para a coleta dos dados. A Figura (13) mostra a montagem do gaseificador.

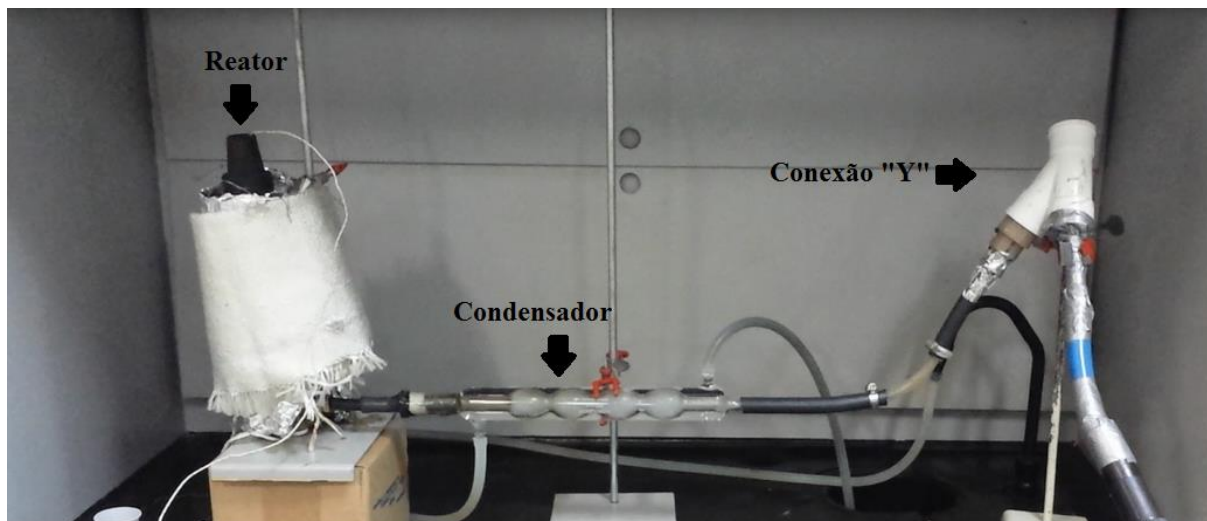


Figura 13. Configuração do sistema de gaseificação.

Antes da montagem do sistema o reator e o condensador eram pesados em uma balança analítica com precisão de 0,005 gramas. Então era feito a pesagem do carvão (utilizado para a ignição do gaseificador) e o caroço de açaí triturado usado nos experimentos, dividido em 5 amostras diferentes.

Após a montagem do sistema, a ignição do processo era dada com carvão, em brasa, adicionado no reator. Nesse momento era acionado o compressor (aspirador de pó), para iniciar o fluxo de ar no sistema e manter o carvão em combustão, assim como o fluxo de água no condensador, para trocar de calor com os gases do produto. Após 1 minuto de operação, eram adicionados 5 gramas iniciais. Passados 4 minutos, alimentou-se o gaseificador como 1 grama. Este processo de adição de biomassa foi repetido a cada 4 minutos até que o montante final de 10 gramas fosse totalmente inserido no reator. A adição de biomassa garantia sempre o leito do gaseificador tinha 5 gramas em seu leito.

Adicionado à biomassa, era feita uma medição da altura da coluna de biomassa e após 4 minutos era refeita essa medição, para determinação da velocidade de processamento do açaí. A cada 2 minutos, fez-se medições de temperatura do leito, utilizando-se um termopar.

O compressor era mantido em operação até que toda a biomassa fosse consumida por completo. Ao final da operação, o compressor era desligado e esperava-se o reator esfriar. Após o resfriamento o sistema era desmontado, e o reator e condensador eram pesados

novamente, e assim era determinado a quantidades de cinzas, alcatrão e água geradas, pela diferença entre a pesagem inicial e final do sistema.

Antes de reiniciar a operação, era feito o desmonte de todo sistema e verificado as condições das mangueiras e conexões. O reator, o cinzeiro e o condensador eram lavados com água e detergente, para garantir que vestígios de cinzas, alcatrão ou qualquer outra substância impregnada neles fosse removida. Após a lavagem, todas as partes eram secadas, para que a água da lavagem não compromettesse os dados de pesagem do sistema.

Foram conduzidos três testes completos, e antes de cada um, era necessário realizar todos esses procedimentos descritos anteriormente.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos dados obtidos durante os experimentos e dos dados calculados seguindo a metodologia sugerida por Tiangco, necessários para avaliar a qualidade do processo e do gás. Seguindo a metodologia anteriormente apresentada, foram obtidas informações para que se pudesse obter o valor da razão de equivalência que é o parâmetro que determinará a composição do gás produzido.

A velocidade de processamento da biomassa ( $V_{pb}$ ) foi obtida utilizando-se a Eq. (1) e as informações da variação de comprimento da coluna de biomassa no reator em um determinado período de tempo. O resultado foi uma variação de 1,5 centímetros a cada 4 minutos, obtendo assim uma velocidade de processamento de  $6,25E-05$  (m/s).

A taxa de consumo da biomassa ( $\dot{m}_{cb}$ ), de  $3,75E-02$  (kg/m<sup>2</sup>. s), calculada utilizando a Eq. (2), define a quantidade de massa consumida por segundo no reator, e estabelece o regime em que este está trabalhando. A massa específica aparente ( $\rho_{ap}$ ) do caroço de açaí de 0,6 gramas por centímetro cúbico foi encontrada verificando-se que a massa de 10 gramas ocupava um volume de  $1,67E-05$  m<sup>3</sup>, chegando ao valor.

Conhecendo-se esse parâmetro foi possível calcular a taxa específica de gaseificação ( $\psi$ ) por meio da Eq. (3), utilizada para determinar o regime ideal de trabalho do gaseificador segundo Tiangco. A taxa específica de gaseificação calculada foi de 135 (kg/m<sup>2</sup>. h) e se encontra dentro do intervalo de 100 a 400 que foi definido haver gaseificação.

Com o valor da taxa específica de gaseificação e do PCI da biomassa ( $PCI_b$ ), de 18.141 (kJ/kg), a eficiência pode ser obtida pela Eq. (6). O resultado foi uma eficiência do gás ( $\eta_g$ ) de 43,7% configurando um resultado próximo do esperado.

O valor do PCI do gás ( $PCI_g$ ) também foi obtido utilizando a taxa específica de gaseificação, na equação Eq. (8). A determinação do PCI do gás é importante para encontrar a massa de gás ( $m_{gás}$ ) produzida pela equação Eq. (10), onde as variáveis de eficiência do gás, PCI da biomassa e do gás e a massa da biomassa ( $m_b$ ) necessárias na equação, foram calculadas anteriormente.

A massa do gás produzido encontrada foi de 16,28 gramas, e com este valor foi possível realizar o balanço de massa do sistema e, determinar a massa de ar ( $m_{ar}$ ) adicionada ao processo, já que não foi possível determinar instrumentalmente durante os testes realizados.

A massa de ar foi, então, obtida utilizando-se da Eq. (11). O valor da biomassa consumida ( $m_b$ ) foi de 10 gramas e, depois de pesados reator e condensador, o valor da massa

de alcatrão, cinzas e água ( $m_{alcatrão} + m_{cinzas} + m_{H_2O}$ ) totalizou 5,78 gramas. O resultado para massa de ar foi de 12,06 gramas.

Para melhor visualizar os resultados obtidos foi construída a Tab. (7) em que são apresentados os valores dos parâmetros calculados.

Tabela 7. Resumo dos resultados obtidos.

Variável		Valor	Unidade
Massa de biomassa	$m_b$	1,00E-02	kg
Volume de biomassa		1,67E-05	m <sup>3</sup>
Massa específica aparente	$\rho_{ap}$	8,28E-02	m
Consumo da biomassa adicionada na coluna	x	1,50E-02	m
Tempo de consumo da biomassa adicionada	$\Delta t$	6,67E-02	h
Velocidade de processamento de biomassa	$v_{pb}$	6,25E-05	m/s
Taxa de consumo de biomassa	$\dot{m}_{cb}$	3,75E-02	kg/m <sup>2</sup> .s
Taxa específica de gaseificação	$\psi$	135,05	kg/m <sup>2</sup> . h
Poder calorífico inferior da biomassa	$PCI_b$	18,14	MJ/kg
Eficiência do gás	$\eta_g$	43,7%	%
Poder calorífico inferior do gás	$PCI_g$	4,82	MJ/kg
Massa de gás	$m_g$	1,62E-02	kg
Massa de alcatrão, cinzas e água	$m_{alcatrão} + m_{cinzas} + m_{H_2O}$	5,78E-03	kg
Massa de ar	$m_{ar}$	1,206E-02	kg

Nota-se que foi obtida uma eficiência de 43,7%. Este resultado está um pouco abaixo do valor esperado, mas bem próximo do valor encontrado por Tiangco, isto pode ser verificado na Fig. (14), que traz os dados encontrados por Tiangco e foi plotado o valor encontrado de 43,7%.

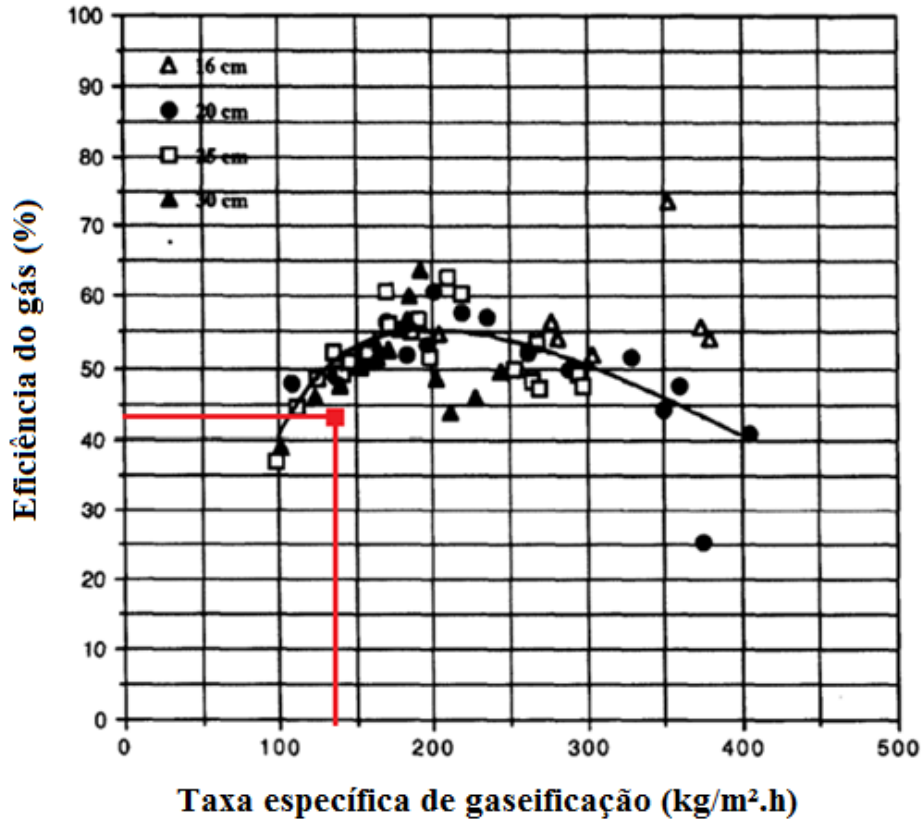


Figura 14. Comparação com os resultados de Tiangco no gráfico  $\eta_g$  versus  $\psi$

A baixa eficiência pode ser explicada pela perda de calor pelo reator, pois este não teve um isolamento térmico efetivo porque um dos objetivos do trabalho era visualizar por completo a dinâmica do reator.

Ao longo dos testes realizados as medidas de temperatura do leito se mantiveram na faixa de 500 a 800 °C, muito próximo da faixa ideal de 600 a 950 °C.

### 6.1. RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA

A vazão de ar na gaseificação é uma variável que, como dito anteriormente, delimita se a reação no interior do reator tende a ser uma gaseificação ou combustão. Utilizando a metodologia de Tiangco para determinar a massa de gás produzido e a massa do combustível medida em laboratório, obtém-se uma relação real ar-combustível de 1,206.

Para a relação ar-combustível estequiométrica, utilizou-se a metodologia de Itai (2011). A fração mássica foi comparada em duas fontes diferentes, Ghesti (2012) e Santos

(2011) sobre a mesma biomassa. As massas moleculares são obtidas por tabela periódica para os elementos em questão. Utilizando da Eq. (16) acha-se a relação entre as massas de ar e combustível, pelo cálculo de suas massas moleculares utilizando as fórmulas químicas encontradas. Dessa maneira, tem-se a Tab. (8) para explicitar os resultados obtidos.

Tabela 8. Razão de equivalência para  $\psi = 135 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ .

	<b>Relação ar-combustível estequiométrica</b>	<b>Razão de equivalência</b>
<b>Ghesti</b>	7,100	0,1699
<b>Santos</b>	5,976	0,1387

A combinação de dados obtidos nos experimentos, aliado aos dados obtidos pela metodologia proposta por Tiangco, permite realizar análises comparativas aos resultados do próprio para avaliar se de fato houve gaseificação nos experimentos. Tiangco realizou diversas combinações entre taxa específica de gaseificação, diâmetro do reator e razão ar-combustível, obtendo assim um intervalo de resultados que permitiu compará-los com resultados do presente trabalho. Para a taxa de gaseificação de  $135 \text{ kg/m}^2\text{h}$  foi encontrado um valor de 1,206 para a razão ar-combustível.

A Fig (15) apresenta a faixa de resultados obtidos por Tiangco, sendo que o resultado encontrado no trabalho está bem próximo. Devido a este motivo, pode-se afirmar a semelhança entre os resultados, apesar da diferença entre o tamanho do reator utilizado, e que de fato ocorreu a gaseificação no experimento.

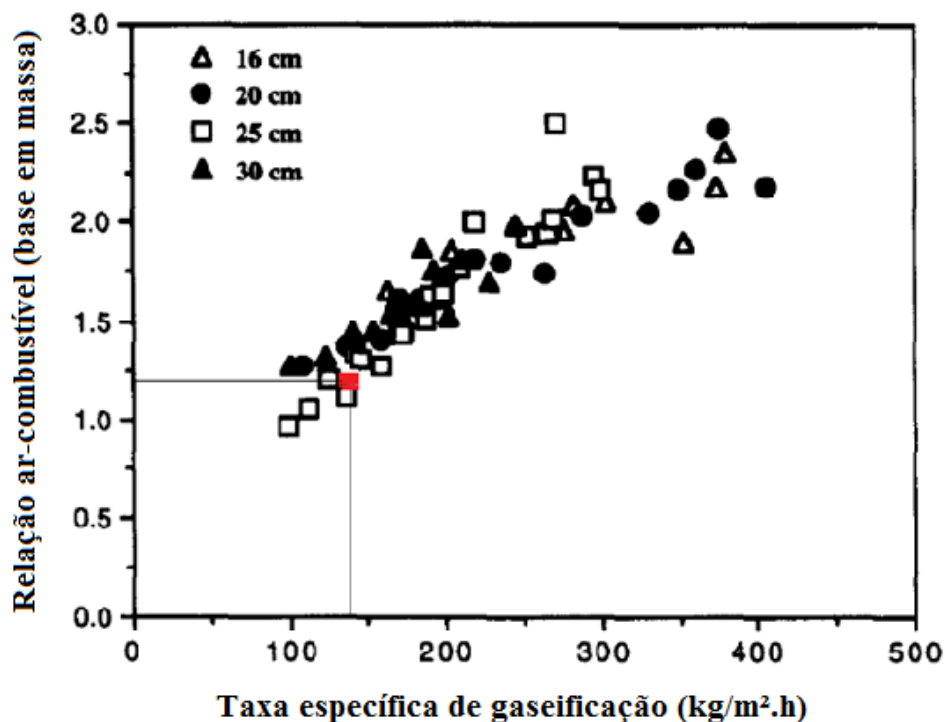


Figura 15. Gráfico Relação ar-combustível versus  $\psi$ .

## 6.2. RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA EM RELAÇÃO AO SOFTWARE COMGAS

Realizando os procedimentos descritos no software têm-se como resultado válido os dados apresentados na Fig. (16) que ilustram graficamente as frações molares dos elementos contidos no gás de síntese. Tais resultados foram obtidos com base nos valores de análise elementar de acordo com Ghesti, que resultou numa razão de equivalência de 5,88. A análise elementar proposta por Santos, não apresentou resultados com alguma interpretação utilizando o software, desde modo, foi desconsiderado das discussões.

O software correlaciona a composição elementar e teor de umidade da biomassa com a razão de equivalência, identificando assim as quantidades dos reagentes da reação, e por meio de equações das reações químicas foi calculado as concentrações dos elementos no gás de síntese. Assim foi possível estimar a composição do gás, como pode ser visto nas curvas resultantes e plotadas na Fig. (16).

A eficiência do gás pode ser explicada também por sua composição. Utilizando a simulação do programa ComGas, foi possível ter uma ideia da composição do gás pela razão de equivalência de 5,88 encontrado nos resultados, como pode ser visto na Fig. (16).

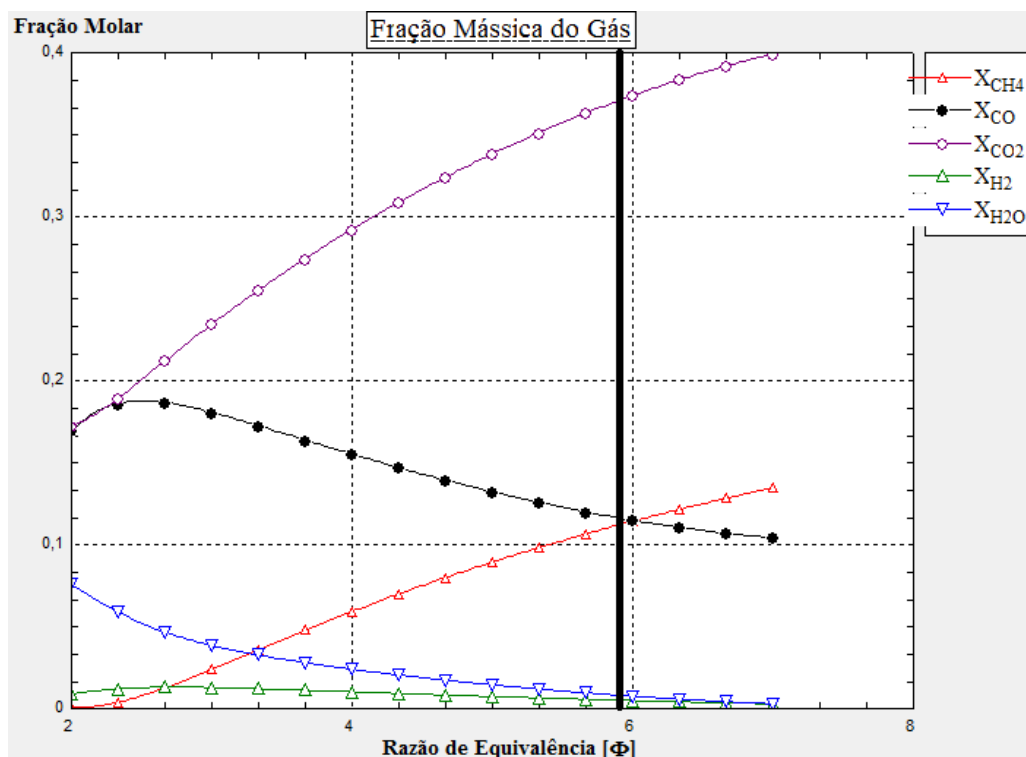


Figura 16. Gráfico de composição dos gases com razão de equivalência de 5,88.

Os pontos maiores quadrados no gráfico indicam as frações de cada elemento do gás, definindo assim sua composição. O baixo teor de hidrogênio ( $H_2$ ) e monóxido de carbono ( $CO$ ) é uma indicação de um gás pobre produzido, o que explica a baixa eficiência do gás. Um motivo desta composição pobre foi devido ao alto valor da razão de equivalência. Para se aproximar da relação ideal de gaseificação, entre 2,5 e 4, seria necessário um aumento da quantidade de ar. Este aumento na quantidade de ar resultaria em maior temperatura na zona de combustão, e conseqüentemente, um maior rendimento do craqueamento na zona de combustão.

### 6.3. MELHORIAS

Segundo a Tiangco, a taxa específica de gaseificação ideal se aproxima de 200 kg/(m<sup>2</sup>. h), pois é a que apresenta maior rendimento. Para melhorar a taxa específica de gaseificação no experimento realizado deveria ser aumentada a velocidade de processamento de biomassa e assim seriam obtidos os dados da Tab. (9), calculados da mesma maneira que os resultados expostos na Tab. (8). Na Tabela (9) foram expostos apenas os resultados que apresentaram alteração nos valores em relação a Tab. (8). Porém, alterando a velocidade de processamento, uma maior quantidade de biomassa seria consumida no mesmo intervalo e acarretando em



mudança nos valores das massas de alcatrão, água e cinzas em virtude da mudança de regime de operação.

Tabela 9. Resultados para  $\psi = 200 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ .

Variável		Valor	Unidade
<b>Velocidade de processamento da biomassa</b>	$v_{pb}$	0,333200	m/h
<b>Consumo da biomassa adicionada na coluna</b>		0,022213	m
<b>Tempo de consumo das 10 gramas</b>		0,248682	h
<b>Taxa específica de gaseificação</b>	$\psi$	200,000000	kg/(m <sup>2</sup> .h)
<b>Eficiência do gás</b>	$\eta_g$	47,8%	%
<b>Massa de gás</b>	$m_g$	0,020049862	kg

## 7. CONCLUSÕES

Utilizando o gaseificador que foi construído, foi possível obter dados de consumo da biomassa em relação ao tempo e as massas dos produtos da gaseificação. Aliando esses dados à metodologia proposta por Tiangco foram obtidas todas as variáveis necessárias para se realizar o balanço de massa do sistema, e assim calcular a razão ar-combustível. Este valor foi necessário para se determinar a composição do gás pelo software ComGas.

Com os resultados obtidos, foi comprovado que processo de gaseificação ocorreu, apesar da baixa eficiência do gás devido à sua composição pobre por causa do baixo teor de CO e  $H_2$ .

Considerando que a gaseificação foi realizada em aparato de escala reduzida os resultados se mostraram bastante satisfatórios, pois o interesse deste trabalho era compreender mais sobre o processo de gaseificação do que eficiência. Esta ainda poderia ser melhorada com alguns ajustes, como, por exemplo, um melhor controle da vazão do ar e um isolamento térmico mais efetivo.

## 8. REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS

- Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2008, 3ª Edição, ANEEL.
- Balanco Energético Nacional, 2013: Ano base 2012 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro, EPE.
- Basu, P., 2010, Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design.
- Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO), 2002, Estado da Arte da Gaseificação.
- Couto, L. C., Couto, L., Watzlawick, L. F., Câmara, D., 2004, “Vias de valorização energética da Biomassa”, Biomassa & Energia, v. 1, n. 1, p. 71-92.
- Dowson, J. E., Larter, A. T., 1907, “Producer gas”, Longmans, Green, and Co. Second Edition, 328p.
- Ghesti, G. F., Mello O. P. M., Rebouças, R. B., 2012, “Aproveitamento Energético do Caroço de Açaí Para Produção de Gás de Síntese e Redução dos Subprodutos Oriundos da Gaseificação”, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Goldman, B., Jones, N. C., 1939, “The modern portable gas producer, Theory, design, fuels, performance, utilization and economics”, Journal of the Institute of the Fuel, v.12 n63, p103-132.
- Higman, C., Burgt, M. V. D., 2003, “Gasification”, Elsevier Science, EUA.
- Hinrichs, R. A., Kleinbach, M., 2009, “Energia e Meio Ambiente”, Ed. CENCAGE Learning.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 2010, “Planta piloto do IPT na cidade de Piracicaba projeta capacidade para 400 mil toneladas por ano”, <<http://www.ipt.br/noticia/549.htm>>, acessado no dia 24/11/2013.
- Itai, Y., “Simulação Numérica da gaseificação de biomassa em leito fixo”, dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2011.
- Oliveira, J. L. de, 1982, “Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto”, Viçosa, MG.
- Padilha, J. L., Canto, S. A. E., Rendeiro, G., 2005, “Avaliação do Potencial dos caroços de açaí para geração de energia”, Biomassa & Energia, v. 2, n. 3, p. 231-239.
- PUC- Rio, 1998, Capítulo 5 Gaseificação, Certificação Digital número 0511123/CA.
- Reed, T., Das, A., 2010, Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems.
- Sánchez, C. G. (Org.), 2010, “Tecnologia da Gaseificação de biomassa”, Campinas – SP, Editora Átomo.
- Santos, R. E. de J., 2011, “Estudo experimental de um reator de gaseificação em um leito fixo de açaí”, dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará, Belém-PA.
- Siemens, C. W., 1889, “The scientific works of C. William Siemens, A collection of papers and discussions”, Vol I, London: John Murray, Albermale St. 614p.
- Silva, I. T., Almeida, A. da C., Monteiro, J. H. A., Silva, I. M. O. da, Rocha, B. R. P da, 2004, “Uso do caroço de açaí como possibilidade de desenvolvimento sustentável do meio rural. Da agricultura familiar de eletrificação rural no Estado do Pará”, Universidade Federal do Pará, An. 5 Enc. Energia Meio Rural.
- Stassen, H. E., 1995, “Small-Scale biomass Gasifiers for Heat and Power A global review”, World Bank Technical Paper Number 296 Energy Series, The World Bank Washington, D.C. .
- Tecnologia da Combustão, Conteúdo do capítulo 7, 2002, Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- Tiangco, V.M., Jenkins, B.M., Goss, J. R., 1996, “Optimum specific gasification rate for static bed rice hull gasifiers”, Biomass and Bioenergy 11(1):51-62.
- Xavier, D. J. C., Sousa, R. C. R., Seye, O., Bacellar, A. A., Santos, E. C. S., Freitas, K. T., Rodrigues, M., Morais, M. R.,Guimarães, E. L., 2006, “O beneficiamento do açaí no projeto modelo de negócio de energia elétrica em comunidades isoladas na Amazônia – NERAM”, Universidade Federal da Amazonas, An. 6 Enc. Energ. do Meio Rural 2006.