

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Geração Elétrica Distribuída com Base na Biomassa de Tucumã

Por,
Robinson Velloso Neto

Brasília, 19 de Dezembro de 2011

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Geração Elétrica Distribuída com Base na Biomassa de Tucumã

POR,

Robinson Velloso Neto

Banca Examinadora

Prof. Carlos Alberto Gurgel Veras, UnB/ENM
(Orientador)

Prof. Augusto César de Mendonça Brasil, UnB/FGA

Prof^a. Thaís Maia Araújo, UnB/FGA

Brasília, 19 de Dezembro de 2011

*Dedico esse projeto a minha família
Meus pais Robinson e Heloise, minhas irmãs
Fernanda e Nathália.
Meus avôs, avós, tios e tias*

Agradecimentos

Agradeço a Deus, minha família e minha namorada, os maiores e melhores alicerces que eu poderia ter.

Ao professor Carlos Alberto Gurgel, por ter me dado a chance de trabalhar neste projeto e por todo o aprendizado e experiência passada.

Ao aluno de mestrado Diego Cambraia Alencar, por todo apoio dado e compartilhamento de conhecimento.

Aos demais alunos do laboratório, por todo o apoio e companheirismo.

Ao professor Jorge Luiz Almeida, ex-coordenador de graduação do ENM

A todos funcionários e professores do departamento de Engenharia Mecânica.

A todos meus queridos amigos, que sempre estiveram ao meu lado durante todos os momentos, felizes e tristes, no decorrer do meu curso.

Robinson Velloso Neto

RESUMO

O objetivo deste projeto é analisar o desempenho da biomassa do tucumã como combustível renovável a ser utilizado em pequena escala, provendo eletricidade a comunidades isoladas da região rural amazônica onde a rede elétrica convencional não alcança possibilitando a melhoria na qualidade de vida, geração de emprego e maior conforto das populações espalhadas pela floresta amazônica. Os ensaios foram realizados na bancada de gaseificação do LEA-UnB.

Palavras-chave: *Biomassa, Gaseificação, Óleo Vegetal, Tucumã, Diesel.*

ABSTRACT

The purpose of this project is to analyze the performance of the tucumã biomass as a renewable fuel option to be used in small scale unit, providing electricity to isolated communities in the remote areas in the Amazon region where the conventional electrical grid does not reach, thus enabling the improvement of the local quality of life. The experiments took place on the gasification laboratory in LEA-UnB.

Keywords: *Biomass, Gasification, Vegetable Oil, Tucumã, Diesel.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 GASEIFICAÇÃO.....	6
2.2 USO DO ÓLEO VEGETAL COMO COMBUSTÍVEL	8
2.3 O TUCUMÃ (<i>Astrocaryum aculeatum</i>)	11
3 MÉTODOS E ENSAIOS.....	16
3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA	16
3.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS	19
3.3 ENSAIOS REALIZADOS.....	20
4 RESULTADOS E ANÁLISES	24
4.1 TABELAS	24
4.2 GRÁFICOS.....	26
4.3 FOTOS	29
5 CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
ANEXOS.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica. Fonte:Atlas de Energia Elétrica do Brasil – ANEEL (2002).....	1
Figura 1.2: Carros alemães (Volkswagen) movidos a gás de gaseificação na época da 2ª Guerra Mundial. Fonte: http://ww2.whidbey.net/jameslux/2gassm.jpg	4
Figura 2.1: Esquemas dos gaseificadores de leito fixo: (a) “downdraft” (b) “updraft” . Fonte: CANTÃO (2007).....	7
Figura 2.2: Exemplo de kit de conversão para utilização de óleo vegetal em motores diesel. Fonte: VoilPower - http://voilpower.com	10
Figura 2.3: Palmeira de Tucumã (<i>Astrocaryum aculeatum</i>). Fonte: http://www.vivaterra.org.br/palmeiras_nativas.htm	11
Figura 2.4: Exemplares do fruto do tucumã. Fonte: INPA – http://www.inpa.gov.br ...	12
Figura 2.5: Cachos de tucumã pendurados na palmeira. Fonte: INPA – http://www.inpa.gov.br	13
Figura 3.1: Esquema da bancada de ensaios de gaseificação do LEA-UnB	16
Figura 3.2: Ilustração de um separador ciclônico semelhante ao usado na bancada. Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_cicl%C3%B4nico	17
Figura 3.3: Esquema da alimentação do motor diesel da bancada de testes.....	18
Figura 3.4: Foto da bancada experimental de gaseificação.	22
Figura 3.5: Foto da balança de precisão e dos reservatórios de óleo vegetal (direita) e óleo diesel (esquerda).....	23
Figura 3.6: Foto da bancada de resistências e do computador utilizado para coleta de dados.....	23
Figura 4.1: Gráfico comparativo do débito do diesel e do óleo vegetal (SVO) de tucumã.	26
Figura 4.2: Gráfico comparativo do débito do diesel e do óleo diesel com gás de síntese (SG).	27
Figura 4.3: Gráfico comparativo do débito do óleo de tucumã e do óleo de tucumã (SVO) com gás de síntese (SG)	28
Figura 4.4: Biomassa no reator do gaseificador no início do quarto ensaio (a) após 15 minutos (b) e no final do mesmo ensaio (c)	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tabela das características físico-químicas dos óleos vegetais e seus respectivos craqueados, fonte: <i>IHA (2010)</i>	14
Tabela 3.1: Ensaio realizados para o projeto e matéria prima utilizada.	22
Tabela 4.1: Dados obtidos do ensaio com óleo diesel.....	24
Tabela 4.2: Dados obtidos do ensaio com óleo de tucumã (SVO)	24
Tabela 4.3: obtidos do ensaio com óleo diesel e gás de síntese do tucumã.	25
Tabela 4.4: obtidos do ensaio com óleo e gás de síntese do tucumã.	25

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Químicos

C	Átomo de Carbono
CH ₄	Molécula de Metano
CO	Molécula de Monóxido de Carbono
CO ₂	Molécula de Dióxido de Carbono
H ₂	Molécula de Gás Hidrogênio
H ₂ O	Molécula de Água
O ₂	Molécula de Oxigênio

Unidades de Medida

°C	Unidade de Medida de Temperatura, Grau Celsius
K	Unidade de Medida de Temperatura, Kelvin
kg	Unidade de Medida de Massa, Kilo grama
kW	Unidade de Medida de Potência, Kilo Watts
kWh	Unidade de Energia Elétrica Consumida
m ²	Unidade de Medida de Área, metro quadrado
mm	Unidade de Medida de Comprimento, milímetros
MW	Unidade de Medida de Potência, Mega Watts
mm ² /s	Unidade de Medida de Viscosidade, milímetros quadrados por segundo

Siglas

LEA-UnB	Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI	Poder Calorífico Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
US\$	Dólar – moeda dos Estados Unidos

1 INTRODUÇÃO

O uso da energia elétrica se tornou essencial para o desenvolvimento humano com o decorrer dos anos. A eletricidade foi fundamental para que grandes invenções fossem realizadas revolucionando o mundo e a sociedade. A invenção da lâmpada por Thomas Edison melhorou a qualidade de vida e abriu a possibilidade de trabalhar nos períodos noturnos. O motor elétrico revolucionou as indústrias. O telefone, a televisão e o rádio revolucionaram a comunicação. Da primeira lâmpada até o último carro elétrico, a energia elétrica mudou por completo o modo de vida humano em vários aspectos, melhorando a qualidade de vida. Apesar do grande avanço que a energia elétrica promoveu à sociedade ainda temos cerca de um terço da população mundial que ainda não tem acesso à energia elétrica.

Cerca de 90% da energia elétrica provém de geração hidráulica, por meio de usinas hidroelétricas, o que supre bem a maioria do país, e é uma fonte renovável de energia. Assim o problema a ser resolvido é o das localidades mais isoladas, que se situam longe das linhas de transmissão existentes.

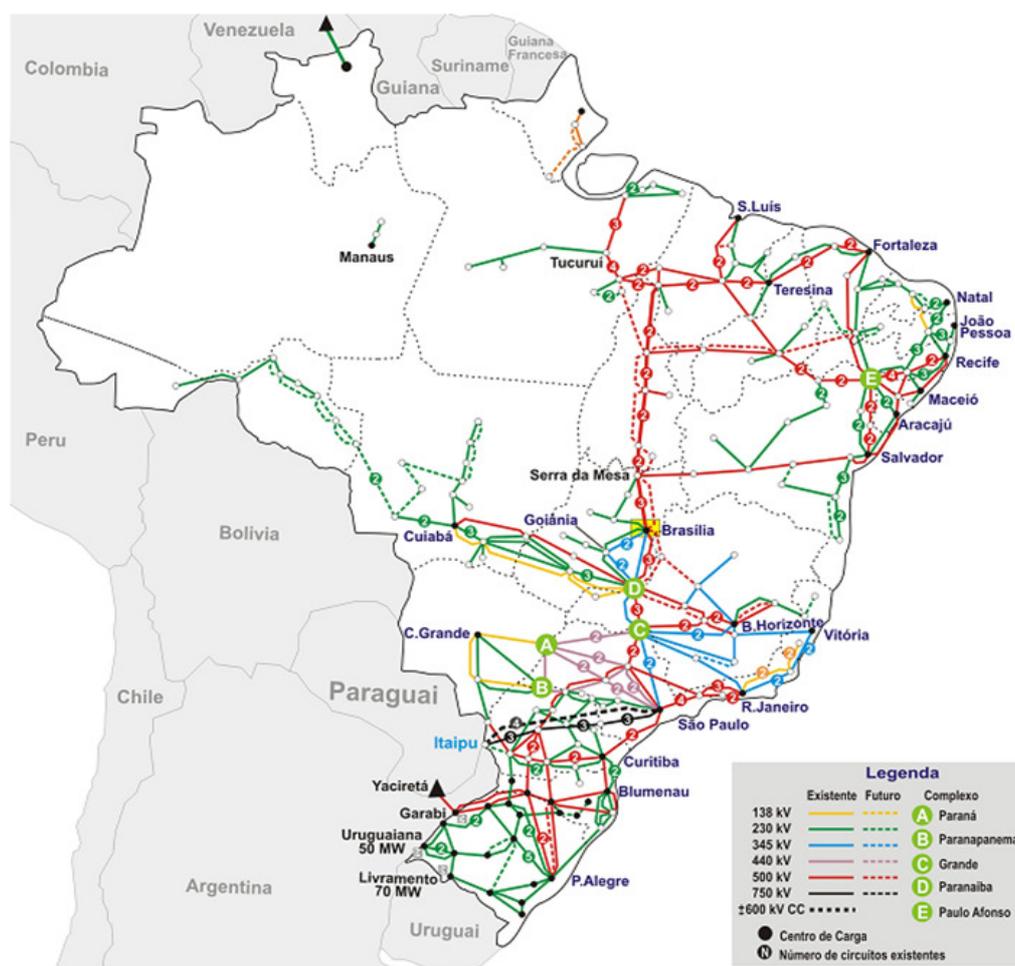


Figura 1.1: Mapa do sistema nacional de transmissão de energia elétrica. *Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil – ANEEL (2002)*

No Brasil o pior índice de eletrificação é na zona rural da região amazônica. A figura 1.1 mostra o do sistema de transmissão de energia elétrica, pelo mapa é possível observar que a região amazônica não é abastecida via linhas de transmissão, e construir linhas de transmissão que cheguem até cada pequena cidade ou comunidade é impossível.

Segundo VERAS et al., (2009), para o governo brasileiro, o fornecimento de eletricidade é agora uma obrigação do estado para com todos cidadãos. Alguns programas específicos foram estabelecidos para garantir um mínimo de eletricidade em comunidades isoladas assim como foi feito para zonas rurais nos arredores de cidades. O programa Luz para Todos tinha com sua meta original o fornecimento de eletricidade para mais de 10 milhões de pessoas, no intervalo de tempo de cinco anos, começando no ano de 2003. Um custo inicial de US\$ 4,5 bilhões foi estimado para o programa. O trabalho foi iniciado com a extensão das linhas de transmissão centralizadas para áreas menos remotas, onde o custo não era proibitivo, e por fornecimento gerado localmente em áreas mais remotas. Com a execução do projeto, foram achadas muitas comunidades remotas sem eletricidade além das iniciais fazendo o projeto mais desafiador. Como consequência, o prazo para conclusão da proposta inicial do projeto foi estendido para 2010.

HENRIQUES e MORALES (2005) disseram que, mais de 1 milhão de domicílios na Amazônia (mais de 4 milhões de pessoas) situam-se em localidades isoladas sem acesso à energia elétrica. Em geral estão em pequenas vilas de pescadores ocultas na floresta, a qual só se chega de barco.

CARTAXO e JANUZZI (2000) falaram sobre a região amazônica. A geração a diesel continua sendo o mais significativo vetor da matriz energética para toda a região. O uso racional de energia e as fontes alternativas ainda são legados a segundo plano pelo planejamento energético regional.

O fornecimento de energia elétrica localizada proporciona melhorias nos padrões de vida das para as comunidades isoladas da região, inserção social e exercício da cidadania. A falta de energia elétrica na região impossibilita que atividades econômicas e geradoras de empregos e renda sobrevivam. A solução adotada para suprir a demanda de eletricidade das pequenas comunidades foi a utilização de sistemas isolados de diesel-geradores, esta, porém não têm funcionado perfeitamente, dado a dificuldade de aquisição e transporte do combustível para as comunidades. Assim existe espalhados pela região um grande número de grupos diesel-geradores desativados por falta de combustível e manutenção.

Aproveitar os recursos naturais renováveis da região é uma solução que pode ser empregada nos sistemas diesel-geradores já existentes, utilizando a biomassa como combustível. O suprimento energético feito pelo aproveitamento dos recursos naturais locais proporciona criação de empregos,

qualificação da mão-de-obra local, fixação da população no campo e uma valorização da biomassa local.

Essas condições impõem soluções específicas e individualizadas baseadas nas condições dos recursos naturais do local, que abrangem uma larga gama de opções de biomassa disponível.

A biomassa é caracterizada como toda a matéria orgânica de origem animal ou vegetal que pode ser utilizada na produção de energia. O uso de biomassa para gerar energia teve seu início nos primórdios da civilização, quando o homem aprendeu a dominar o fogo, convertendo biomassa em calor e luz e assim podendo progredir dominando os minerais, minérios e metais. No século XIX com o desenvolvimento da tecnologia a vapor a biomassa passou a ter papel primordial para obtenção de energia mecânica, perdendo esse papel posteriormente com o uso dos combustíveis fósseis. Após a crise do petróleo na década de 70 a importância do uso da biomassa se tornou evidente, com o mundo olhando para alternativas ao petróleo.

A conscientização sobre o desenvolvimento sustentável veio em 1987, com o relatório de Brundtland elaborado pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, que define desenvolvimento sustentável como “o desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitat naturais.”(Relatório de Brundtland 1987).

Esse conceito reforça a idéia do uso correto da biomassa como fonte de energia, pois como é um recurso renovável ele satisfaz a intenção de não esgotar os recursos para que gerações futuras possam fazer bom uso deles também.

A utilização da biomassa em diesel-geradores pode ser feita em duas frentes, uma com a queima de biomassa sólida em gaseificadores ligados a diesel-geradores, reduzindo o consumo de óleo diesel, a outra é feita utilizando óleos vegetais, podendo ser usados diretamente com o óleo vegetal *in natura* ou em forma de biodiesel, substituindo o uso do diesel. Para aproveitar ao máximo a oferta de biomassa, podemos utilizar as duas opções combinadas, ou seja, um diesel-gerador alimentado com óleo vegetal ou com biodiesel como chama piloto auxiliado pelo gás combustível gerado por um gaseificador queimando biomassa.

O uso de gaseificadores foi primeiramente datado no início do século 19, quando se fez uso de destilação seca de material orgânico para uso em iluminação pública. Através dos anos, novos tipos de gaseificadores foram sendo desenvolvidos, passando pelos dispositivos portáteis operados durante os períodos de guerra em veículos, os gasogênios, e a partir destes que os gaseificadores de biomassa

foram desenvolvidos. No Brasil o estudo mais profundo sobre gaseificadores teve seu início entre as décadas de 80 e 90, e vem ganhando mais ênfase recentemente.



Figura 1.2 Carros alemães (Volkswagen) com o gasogênio na época da 2ª Guerra Mundial. *Fonte:* <http://ww2.whidbey.net/jameslux/2gassm.jpg>

Em 1999 DE BARI et al. Estudou a gaseificação em pequena escala de biomassa de restos agrícolas, como cascas de amêndoas e restos de madeira.

O uso de óleos vegetais como combustível data desde os primeiros motores de ciclo diesel, já que o primeiro motor a diesel, do final do século 19, funcionou com óleo de amendoim. Apesar do crescente uso do biodiesel, o mesmo ainda demanda um processo muito elaborado para transformação do óleo vegetal em biodiesel, assim o uso do óleo vegetal direto é mais conveniente para as comunidades isoladas em questão.

Na região amazônica há uma abundância em espécies de biomassa que podem ser cultivadas para servir prioritariamente à geração de energia. O tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) é uma palmeira oleaginosa amplamente encontrada na região Amazônica cujo fruto contém uma amêndoa que pode ser usada para extração de óleo vegetal e parte de seu corpo (endocarpo) pode ser utilizada no processo de gaseificação, assim tendo ambas as opções no mesmo fruto.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho da biomassa do tucumã em sistemas de geração de eletricidade para comunidades isoladas. Utilizando um gerador elétrico a diesel em modo duplo combustível, fazendo uso do óleo vegetal de tucumã como combustível piloto, substituindo o diesel, e alimentando o diesel-gerador com o gás de síntese gerado no gaseificador a partir da queima da biomassa de tucumã.

O foco secundário deste projeto é avaliar a cadeia produtiva do tucumã, para saber se o uso do mesmo pode ser considerado uma alternativa sustentável no longo prazo, avaliando a capacidade de produção de biomassa através do cultivo da palmeira de tucumã nas comunidades onde a geração de eletricidade vai ser feita pelo uso de sua biomassa. Em curto prazo o método para obtenção do fruto é via extrativismo, visto que a palmeira é nativa da região e é encontrada com relativa facilidade. O reaproveitamento do endocarpo que é descartado quando a polpa é consumida também pode ser uma boa fonte de biomassa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GASEIFICAÇÃO

O gaseificador é um reator químico onde ocorrem várias reações químicas e físicas. O objetivo da gaseificação é transformar o máximo da biomassa em gases. Isso implica em transformar não só os voláteis e água em gases e vapor, mas converter o carbono fixo em gases. A gaseificação tem as seguintes etapas: secagem, pirólise, combustão e redução.

Secagem é o processo de retirada de umidade da biomassa com adição de calor, que faz a água evaporar. Pirólise é a decomposição da biomassa através de calor com baixas taxas de oxigenação, que acarreta na produção de gases inflamáveis.

Na secagem e pirólise temos três fases, a evaporação da água, a decomposição dos carboidratos (hemi-celulose, celulose, lignina), que ocorre entre 250°C e 300°C, e a produção de alcatrão e ácidos leves, que ocorre entre 350°C e 400°C. Os produtos dessas etapas são: gases condensáveis (alcatrão e ácidos), gases não condensáveis (CO, CO₂, H₂, CH₄ e O₂) e carvão vegetal.

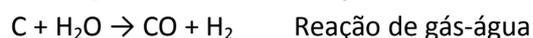
O carvão vegetal residual pode ser convertido em gases pelo processo de gasificação, que é um processo que requer energia para que o um átomo de oxigênio seja transferido de uma molécula de carbono para o carvão, assim caracterizamos o processo como endotérmico. Essa energia térmica necessária é provida pela combustão de parte da biomassa. As reações químicas são combinações de oxigênio do ar com carbono e o hidrogênio.

Segundo RENDEIRO e NOGUEIRA (2008) as reações são classificadas em heterogêneas, gás-sólido, e em homogêneas, gás-gás. As reações heterogêneas são:

- Combustão: reações de oxidação de carbono e exotérmicas



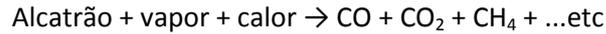
- Gasificação: reações de redução de carbono e endotérmicas



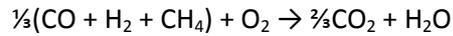
As reações homogêneas são:



Craqueamento do alcatrão:



Destacando também a oxidação de parte dos produtos da pirólise:



Como a preferência é produzir o máximo de CO e H₂, os redutores preferenciais são CO₂ e H₂O e não oxigênio, já que o mesmo produz CO₂ enquanto os anteriores produzem CO.

Existem algumas configurações diferentes de gaseificador, as mais utilizadas são: gaseificadores de leito fixo e gaseificadores de leito fluidizado. Onde grande maioria dos gaseificadores encontrados para comercialização é do tipo de leito fixo.

Gaseificadores de leito fixo são utilizados em plantas de capacidade de até 25MW, porém seu melhor rendimento está nas plantas de até 10MW. Este grupo de gaseificador é dividido em dois tipos, os “downdraft”, que o fluxo de gás é de cima para baixo, e os “updraft” que o fluxo de gás é feito de baixo para cima. Em ambos os tipos o movimento da biomassa dentro do reator é de cima para baixo, provocado pela gravidade.

Os gaseificadores de leito fixo do tipo “downdraft” são mais indicados para o uso combinado com motores à combustão interna, pois o gás é captado por baixo, após a zona de redução, o que produz menos vapor de alcatrão, que pode ser maléfico aos motores. Porém a desvantagem em relação ao tipo “updraft” é que este produz gases com menos particulados, já que os gases são captados acima da zona de secagem.

Nos gaseificadores de leito fixo o processo de gaseificação tem quatro zonas bem definidas, como já foi citado anteriormente, secagem, pirólise, combustão (também conhecida como oxidação) e gaseificação (redução).

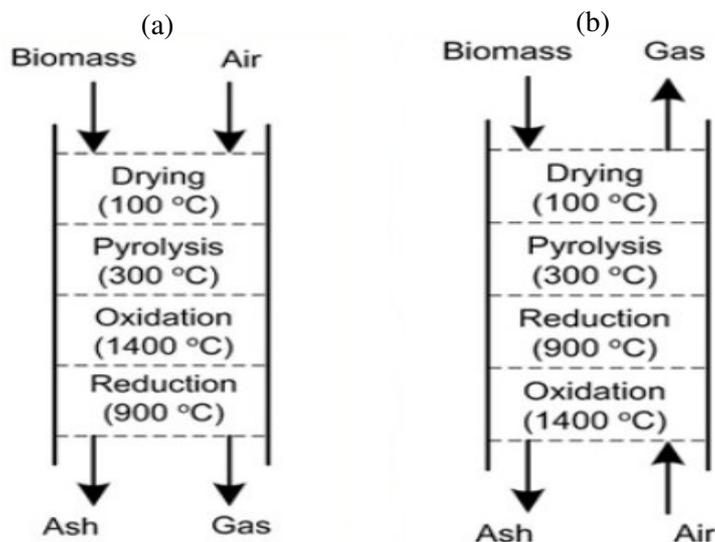


Figura 2.1: Esquemas dos gaseificadores de leito fixo: (a) “downdraft” (b) “updraft”. Fonte: CANTÃO (2007)

Na figura 2.1 temos as quatro zonas definidas de um gaseificador de leito fixo downdraft (a) e de um gaseificador updraft (b). As diferenças entre os dois esquemas são, a direção do fluxo de ar, e a disposição das fases de oxidação (combustão) e redução (gaseificação).

Na zona de secagem temos uma faixa de temperatura ao redor dos 100°C. Na zona de pirólise temos uma faixa de temperatura entre 200°C e 600°C, nessa faixa de temperatura é possível queimar até 70% da massa.

Na zona de oxidação (combustão) temos temperaturas acima de 800°C, podendo chegar e passar dos 1300°C. Na zona de redução (gaseificação) temos temperaturas entre 600°C e 800°C.

2.2 USO DO ÓLEO VEGETAL COMO COMBUSTÍVEL

A utilização de óleo vegetal “in natura” como combustível é indicada no caso das comunidades isoladas, onde as grandes usinas hidrelétricas ou a instalação de linhas de transmissão são impraticáveis. Assim, a utilização de óleos vegetais “in natura”, localmente produzidos, tornou-se uma alternativa na medida em que novas tecnologias permitiram sua viabilidade técnica. COELHO *et al.*, (2004)

SINGH *et al.*, (2005) do Instituto de Pesquisa em Energia Renovável Sadar Patel na Índia, investigou a operação de um motor ciclo diesel utilizando um mix de diesel com óleo refinado de farelo de arroz em modo duplo de combustível.

RAMADHAS *et al.*, (2006) do Instituto Nacional de Tecnologia de Calicute na Índia, estudou a operação de motores diesel em modo duplo combustível utilizando combustíveis renováveis, utilizando óleo de semente seringueira, como biomassa líquida.

A extração do óleo vegetal pode ser feita de duas maneiras, por prensagem mecânica e por solventes derivados do petróleo. Em ambos os casos busca-se maximizar o aproveitamento, obtendo assim uma quantidade máxima de óleo vegetal de boa qualidade.

Na extração por prensagem mecânica, os líquidos e os sólidos são separados pela aplicação de forças de compressão. Geralmente alguns tratamentos prévios, como descascamento e despulpamento, aquecimento e redução de tamanho, são feitos para o melhor aproveitamento do processo. Como resultantes deste processo temos o óleo e a torta, como são chamados os restos sólidos. Esse processo é muito usado nas indústrias alimentícias e de bebidas, e é muito utilizado por sua simplicidade.

Na extração por solvente é utilizado um solvente derivado do petróleo e consiste em duas etapas, uma de dissolução e outra de difusão. Este tipo é mais eficaz do que o de prensagem, porém mais complexo. Existe ainda um processo que primariamente utiliza a prensagem mecânica, e posteriormente a extração por solvente, que é feita para extrair o restante de óleo que não foi retirado pela prensagem.

O processo mais indicado para as pequenas comunidades isoladas é o processo de prensagem mecânica, já que o processo de extração por solvente é mais complexo e mais caro e requer especialização da mão-de-obra.

O alto custo do óleo diesel e a grande dificuldade de fornecimento para as comunidades isoladas também favorecem a escolha pelo óleo vegetal. Outro fator que impulsiona o uso do óleo vegetal como combustível é o apelo ambiental, pois ao utilizar um combustível de origem renovável, não há aumento na emissão de carbono na atmosfera, pois o mesmo carbono lançado no ar é recapturado pela vegetação, fechando o ciclo.

Os óleos vegetais possuem a temperatura ambiente uma viscosidade superior à do diesel, o que impossibilita seu uso direto em motores a diesel. Assim há duas soluções:

1. Redução da viscosidade através de um processo químico.

Utilizando o processo de transesterificação, que acaba por transformar o óleo vegetal em biodiesel, com a vantagem de poder ser misturado ao diesel, ou ser usado puro, em motores sem necessidade de alterações. O processo, porém é complexo para ser feito em localidades remotas sem especialização e encarece muito o produto final

2. Redução da viscosidade através do aquecimento do óleo vegetal.

Operando o motor a diesel com óleo vegetal, ainda requer o uso do diesel para a partida e aquecimento do motor e do óleo vegetal, que após atingir uma temperatura na qual sua viscosidade seja comparável à do diesel passa a ser utilizado efetivamente com combustível, substituindo inteiramente o óleo diesel.

O uso de óleo vegetal em motores diesel é vantajoso, pois o custo do óleo vegetal é menor do que o do biodiesel, o processo é mais simples requerendo menos conhecimentos complexos em química e infraestrutura simplificada facilitando a produção local do próprio óleo nas comunidades. Outras vantagens são a menor produção de fuligem e o fato dos óleos serem isentos de enxofre, se comparado com os combustíveis fósseis, é um agente que polui menos.

O modo de operação de motores diesel com óleo vegetal consiste no uso de dois combustíveis líquidos, o diesel comum e o óleo vegetal que irá substituí-lo posteriormente, pois o motor ainda precisa ser ligado utilizando o diesel, pois tanto o motor como o óleo vegetal necessita de aquecimento

prévio, para ter uma operação segura, que não danifique o motor dado a diferença de viscosidade do óleo vegetal.

Em 2010 FARIA et al., citou FONSECA (2007) sobre viscosidade do óleo de dendê em diferentes temperaturas, dendê a 60°C tem um viscosidade de 20,68 mm²/s e a 100°C a viscosidade do óleo cai para 8,32 mm²/s, muito semelhante á do diesel a 25°C que é de 8,325 mm²/s. O que pode ser uma boa base para o uso de outro óleos vegetais.

Apesar do uso de óleo vegetal direto em motores diesel necessitar de adaptações, as mesmas são simples, com baixo custo financeiro e simples operação, não exigindo maiores cuidados além do habitual. Essas adaptações são encontradas no mercado em forma de kits de conversão e já são amplamente comercializados no mercado europeu.

Os kits consistem basicamente de: um segundo tanque de combustível para o óleo vegetal, linhas de combustível, bomba de combustível, unidade de aquecimento do combustível vegetal (que pode ser antes do injetor ou no tanque de óleo vegetal), um filtro de combustível (que pode ser integrado ao aquecedor) e uma válvula de fluxo do retorno.

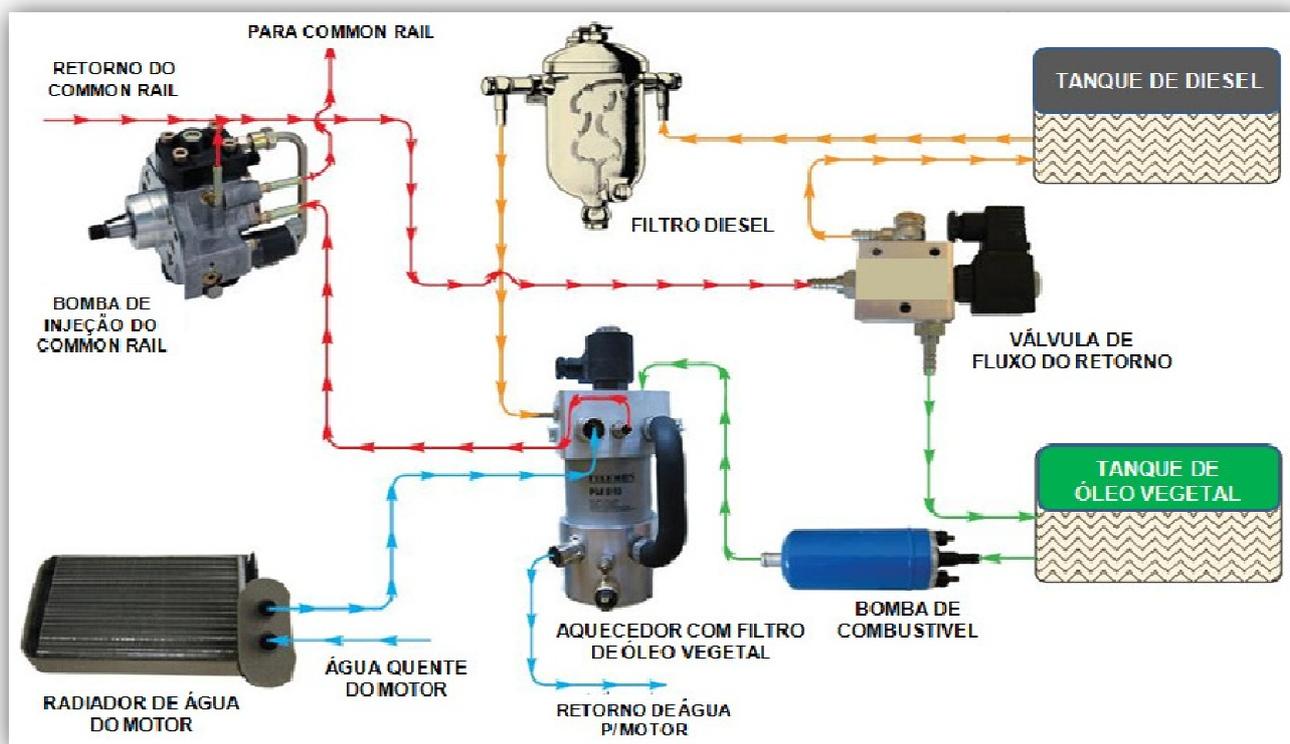


Figura 2.2: Exemplo de kit de conversão para utilização de óleo vegetal em motores diesel. *Fonte: VoilPower - <http://voilpower.com/>*

2.3 O TUCUMÃ (*ASTROCARYUM ACULEATUM*)

O tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) é uma palmeira de crescimento monopodial, ou seja, que cresce verticalmente, arborescente e monóica. Conhecido como tucumã-do-amazonas, é nativo da região amazônica, e encontrado nos estados do Amazonas, Acre, Rondônia, Roraima, Pará e Mato Grosso, além de também estar presente na Colômbia, Venezuela, Peru, Bolívia e Guianas. Ocorre em floresta de terra firme, vegetação secundária, savanas, pastagens e roçados, sendo excepcionalmente tolerante a solos pobres e degradados.

A palmeira de tucumã pode chegar a 20 metros de altura, com caule coberto de espinhos negros, gera um fruto com polpa amarela com tons avermelhados. Com florescimento de agosto a novembro e frutificação de novembro a maio.

É atualmente explorada por seu palmito e frutos que são comestíveis, pelo óleo de seu fruto e de suas sementes, suas folhas de onde se extrai a fibra de tucum, usada em redes e cordas e sua madeira é usada para fazer biojóias.

Também conhecido pelos nomes: acaiúra, acuiuru, coqueiro-tucumã, tucum, tucumã-açu, tucumã-arara, tucum-açu, tucumai-da-terra-firme, tucumãí-uaçu, tucumã-piririca, tucumã-purupuru e tucum-do-mato.



Figura 2.3: Palmeira de Tucumã (*Astrocaryum aculeatum*). Fonte: http://www.vivaterra.org.br/palmeiras_nativas.htm

A palmeira do tucumã é conhecida por ser uma planta de crescimento agressivo, com resistência ao fogo, sendo capaz de rebrotar após queimadas. As sementes demoram até dois anos para germinar, crescem lentamente e começa a frutificação a partir do oitavo ano. É uma espécie resistente a doenças e de alta produtividade, o que a torna em uma boa opção para o uso de extração de óleo vegetal.

Em grandes cidades da região o fruto é apreciado na culinária, onde a polpa é consumida em natura ou em forma de suco e até mesmo de sorvete, representando uma atividade econômica significativa. O óleo extraído da semente pode ser consumido em cozinha e para fins cosméticos. A polpa é altamente nutritiva, contendo altos níveis de beta-caroteno (52mg a cada 100g de polpa).



Figura 2.4: Exemplos do fruto do tucumã. *Fonte: INPA – <http://www.inpa.gov.br>*

Um fruto pesa em média 30 g, sendo 34% de seu peso atribuído à polpa. Uma árvore adulta pode produzir até 50 kg de frutos por ano, a média é de 25 kg por árvore no decorrer de um ano, que corresponde a 1,5 kg de óleo proveniente da amêndoa. Em um hectare pode ser plantadas 400 touceiras com 3 estirpes cada, totalizando 1200 árvores por hectare (fonte: http://www.amazonoil.com.br/produtos/oleos/tucuma_polpa.htm), o que daria 1800 kg de óleo de tucumã por hectare por ano. Utilizando apenas a amêndoa para extração do óleo. Se for considerado o uso a polpa para extração do óleo esse valor pode chegar até 4500 kg. Com a vantagem que o tucumã não necessita de replantio como o dendê, por exemplo.



Figura 2.5: Cachos de tucumã pendurados na palmeira. *Fonte: INPA – <http://www.inpa.gov.br>*

Escolhemos o tucumã como biomassa, pois no mesmo fruto, temos biomassa para gaseificar e para extração de óleo combustível. A extração do óleo de tucumã pode ser feita de várias maneiras. Uma delas é através de prensagem mecânica, outra é através do uso de solventes derivados do petróleo, como a extração sólido-líquido com hexano utilizando aparelhagem Soxhlet. Também é utilizado um método híbrido, que conta com os dois métodos juntos, primeiramente a prensagem mecânica, e posteriormente a extração com solvente, para retirar o restante do óleo que não foi retirado durante a prensagem.

A maneira mais fácil de ser feita é a prensagem, pois não requer os conhecimentos avançados do método de extração com solvente, ficando mais prático para ser usado em comunidades isoladas, apesar de ter menor rendimento, em torno de 20%, se comparado ao outro método, cujo rendimento fica em torno de 40%.

A extração pode ser feita com o fruto todo, pois sua polpa também é fonte do óleo vegetal, além de ser apreciada na culinária local, que pode ser outra atividade econômica a ser explorada pelas comunidades que usarem o cultivo do tucumã para obter biomassa.

2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO ÓLEO DE TUCUMÃ

Para avaliarmos o desempenho do óleo de tucumã precisamos saber suas características, como sua viscosidade e seu poder calorífico inferior que será usado nos cálculos de rendimento e de consumo específico.

No trabalho de IHA (2010), uma dissertação de mestrado sobre “Produção e análises de bio-óleo e biodiesel utilizando oleaginosas que possam contribuir para o aumento da matriz energética renovável brasileira” defendido em 2010 no instituto de Química da Universidade de Brasília, o autor analisa uma série de óleos vegetais que posteriormente foram convertidos em biodiesel, entre eles está caracterizado o óleo vegetal de tucumã.

Apesar de o trabalho citado ter um propósito diferente deste, podemos fazer uso dessas informações neste trabalho, já que o autor utilizou as informações do óleo vegetal como base na comparação com o biodiesel posteriormente desenvolvido com o óleo em questão.

Encontramos as informações na tabela da dissertação de IHA (2010), que é mostrada a seguir.

Tabela 2.1: Tabela das características físico-químicas dos óleos vegetais e seus respectivos craqueados, fonte: IHA (2010)

Propriedades físico-químicas	Tucumã		Nabo forrageiro		Andiroba		Macaúba		Diesel de petróleo	Métodos	
	Óleo	Craqueado	Óleo	craqueado	Óleo	Craqueado	Óleo	Craqueado			
Viscosidade cSt ou mm ² /s	30,55	4,51	26,70	2,11	38,4	4,87	41,93	3,96	2 a 5	ASTM D445	
Densidade Kg/m ³	15 °C	-	-	909,20	842,00	-	-	919,30	852,10	-	
	20 °C	-	895,40	905,10	836,80	-	864,33	918,80	848,10	820 a 880	NBR 7148
Ponto de fulgor °C	-	33	-	61	-	66	-	35	38 min	ASTM D93	
Entupimento a frio °C	-	17	-	2	-	22	-	2	10 máx	ASTM D6371	
Poder calorífico MJ/Kg	29,37	37,54	37,54	47,74	37,56	38,03	34,12	38,67	-	ASTM D240	
Índice de acidez mgKOH/góleo	11,42	179,87	37,15	118,16	36,14	143,15	112,02	133,60	Anotar	AOCS Cd 3d-63	
Corrosão ao cobre	-	1a	-	1a	-	1a	-	1a	1	ASTM D130	
Resíduo de carbono % m/m	3,38	0,87	9,54	0,3	1,5	0,67	2,7	0,4	0,25	ASTM D189	
Destilação °C	10 %	-	132,40	-	99,40	-	105,70	-	148,30	Anotar	ASTM D86
	50 %	-	279,00	-	229,80	-	282,70	-	279,40	245 a 310	
	90 %	-	322,7	-	345,70	-	347,90	-	349,90	360	
Índice de cetano	-	-	-	40,61	-	-	-	44,49	46	ASTM D4737	

A partir da tabela 2.1, temos que o poder calorífico inferior (PCI) encontrado para o óleo de tucumã é de 29,37 MJ/kg, sendo assim o mais baixo dentre os óleos pesquisados na dissertação, se aproximando ao óleo de macaúba. Também podemos observar que o índice de acidez é relativamente baixo se comparado a os demais óleos vegetais da tabela.

Com o PCI do óleo de tucumã e sabendo o PCI do óleo diesel, podemos agora comparar os rendimentos de cada combustível, através de cálculos que serão explicados mais adiante.

3 MÉTODOS E ENSAIOS

O Laboratório de Energia e Ambiente (LEA-UnB) localizado no bloco G da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília no campus Darcy Ribeiro, é equipado com um gaseificador downdraft que alimenta um motor ciclo diesel capaz de operar em modo duplo de combustível.

Já foram realizados estudos com diversos tipos de biomassa como, coquinho de macaúba, cascas de árvore, caroço de açaí, babaçu, cama de frango, etc. Dentre esses estudos AMARAL e NEITZKE (2008), que estudaram o uso do coquinho de macaúba no gaseificador e óleo vegetal no modo duplo combustível, obtiveram uma redução de 85% no consumo do óleo vegetal, produzindo 8kW de energia.

Este projeto visa estudar o uso do endocarpo do tucumã no gaseificador, juntamente com o uso do óleo extraído da semente que se encontra no interior do mesmo, para substituição do óleo diesel como combustível piloto.

3.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA

A bancada de ensaios que se encontra no LEA-UnB, é formada por um gaseificador downdraft alimentando um motor diesel capaz de operar em modo de duplo combustível, este conectado a um gerador elétrico de 12,5kW.

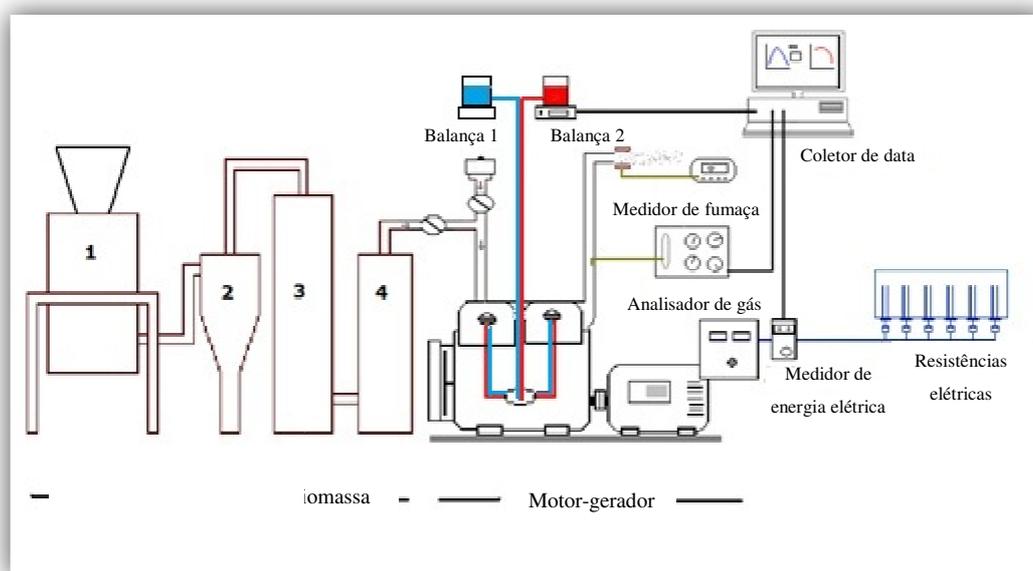


Figura 3.1: Esquema da bancada de ensaios de gaseificação do LEA-UnB. *Fonte: VERAS et al., adaptado, 2010*

A figura 3.1 demonstra o esquema da bancada do laboratório. O equipamento número 1 é o reator, onde a biomassa sofre o todo o processo de gaseificação, em seguida os gases gerados vão através de uma tubulação para o equipamento 2, o separador ciclônico, que tem como função eliminar o alcatrão e os gases de cadeia longa gerados no reator, deixando que somente o gás de síntese e o metano passem adiante. O separador funciona através da centrifugação dos gases vindos do reator. Os gases de cadeia longa e os particulados, como são mais pesados acabam por colidir com as paredes ao descerem pelo caminho helicoidal no interior do separador e não conseguem subir de volta ao chegarem no final do caminho e saem pela parte inferior do separador.

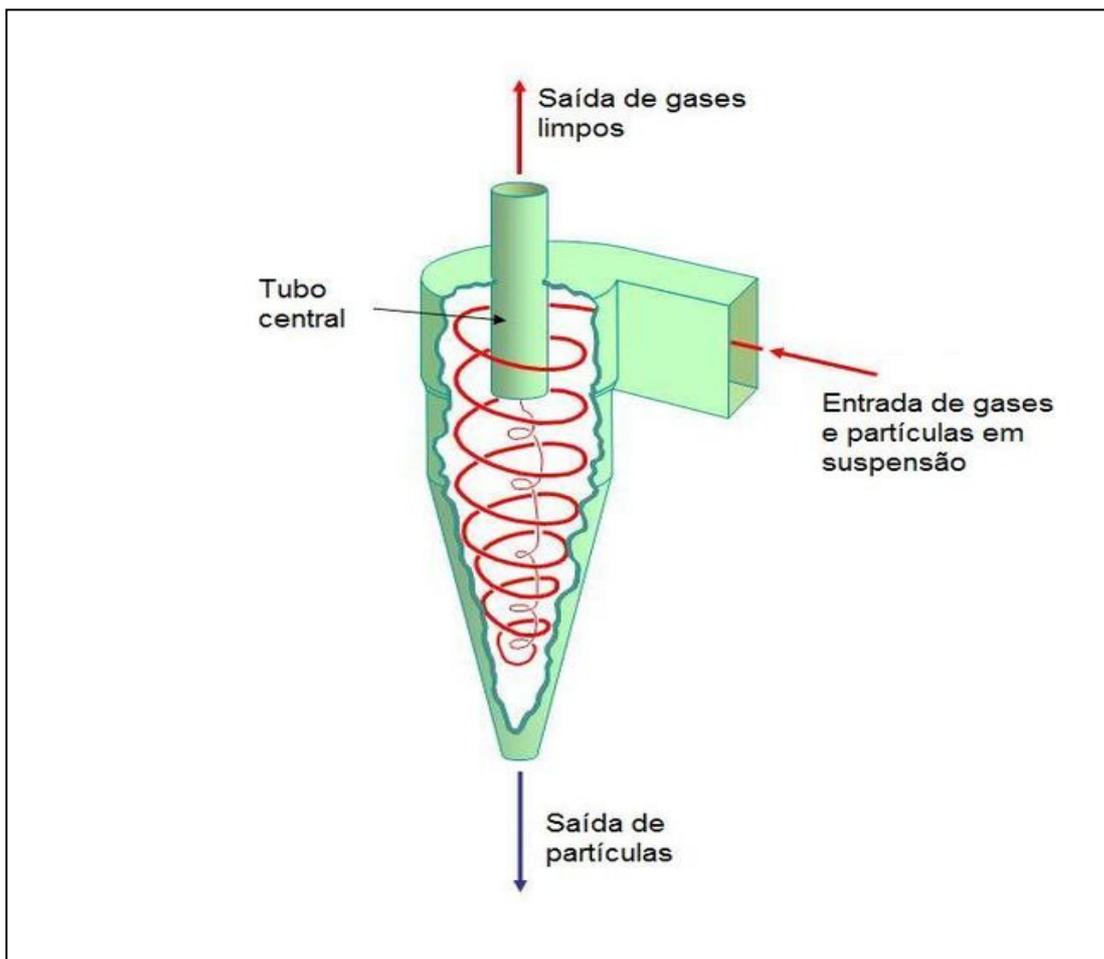


Figura 3.2: Ilustração de um separador ciclônico semelhante ao usado na bancada. *Fonte:* [http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_ciclônico](http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_cicl%C3%B4nico)

Após sair do separador ciclônico os gases seguem para o equipamento 3, que é um trocador de calor do tipo casca e tubo, onde o gás que está a uma temperatura elevada, transfere calor para a água que circula por fora da tubulação de gás em sentido ascendente. Ao resfriar o gás ele se comprime, alterando sua massa específica que fica maior, assim tem-se uma quantidade maior de combustível no volume de gás que entra no motor, comparando ao gás sem ser resfriado. No fundo do trocador de calor existe um tanque que os condensáveis e o alcatrão restante.

Saindo do trocador de calor o gás segue para o equipamento 4, o filtro que retira as impurezas restantes, que não foram eliminadas anteriormente. Depois de passar por essas quatro etapas, o gás recebe ar atmosférico vindo de uma válvula com filtro e segue para alimentar o motor juntamente com outro combustível, diesel, biodiesel ou óleo vegetal puro, como mostrado na figura 3.3.

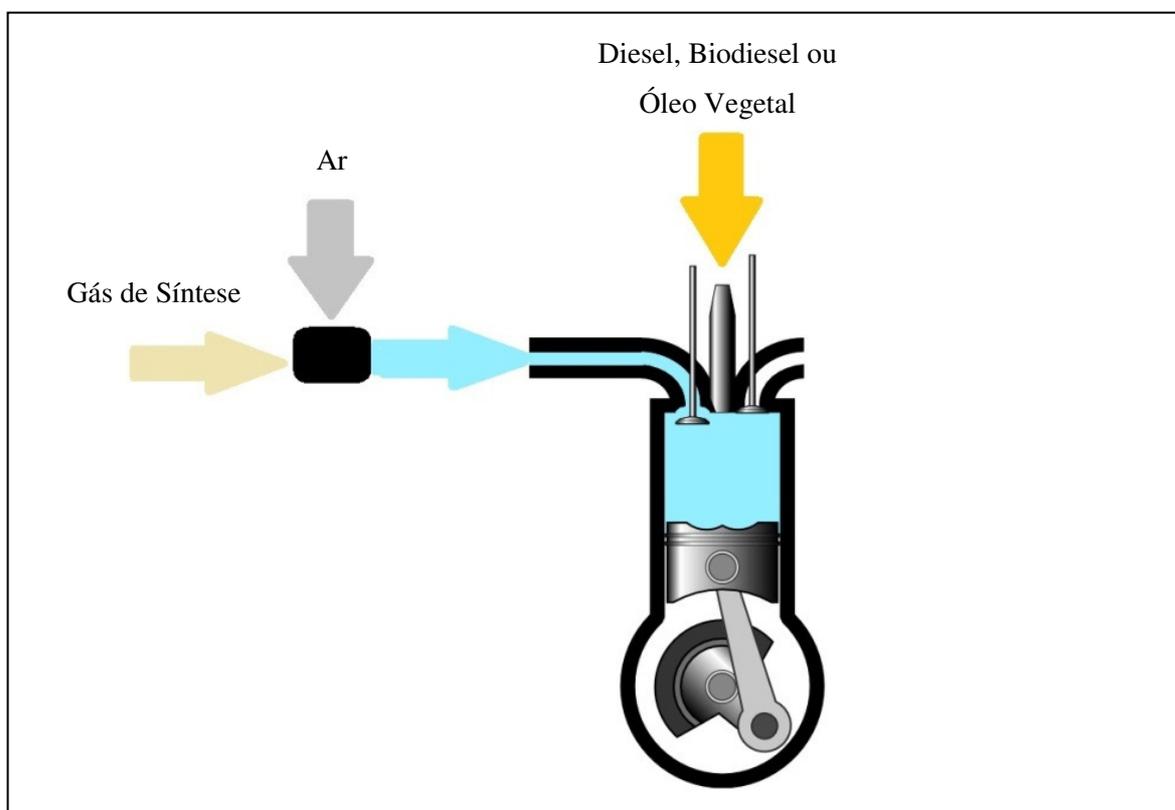


Figura 3.3: Esquema da alimentação do motor diesel da bancada de testes.

Ainda na bancada de ensaios, temos o gerador elétrico da marca Heimer Brazil Ltd. modelo GEHK-18, 220 volts e de frequência de 60Hz, capaz de produzir 12,5kW a um rotação de trabalho de 1800 rpm, que é acoplado ao motor diesel estacionário.

O motor diesel estacionário é da marca Kirloskar modelo DM-20, possui dois cilindros, com duas válvulas para cada cilindro, 1884 cm³ de cilindrada, 100 mm de curso, 120 mm de diâmetro, possuindo uma taxa de compressão de 17:1, refrigerado a água, naturalmente aspirado, sendo capaz de gerar 23 cv (16,9 kW) a 1800 rpm.

Pertence também à bancada um conjunto eletrônico, composto por um computador um medidor de energia elétrica da marca Landis+Gyr, duas balanças de precisão da marca Toledo modelo Ohaus Adventurer (uma para o diesel e outra para o óleo vegetal) e uma série de resistências elétricas. O computador recebe e processa os dados enviados pelo medidor de energia. As resistências elétricas estão ligadas ao medidor de energia elétrica e ao gerador elétrico, elas são responsáveis pelo consumo da energia elétrica gerada pelo gerador.

3.2 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Os ensaios ocorrem na bancada previamente descrita, do LEA-UnB da maneira descrita a seguir. Primeiramente é feita uma inspeção visual de toda a bancada, checando se todas as juntas de tubulação e dos aparelhos estão corretas, se não há parafusos soltos, e se a parte elétrica da bancada está em ordem. Verificamos também se o software do sistema de aquisição de dados está funcionando perfeitamente.

Após essa checagem inicial, liga-se o motor somente com o diesel, e pesa-se a biomassa que será utilizada no reator do gaseificador. Antes de começar a gaseificação levantam-se dados do motor funcionando somente com diesel para base de comparação e checa-se a perda de pressão na tubulação do gaseificador ao inserir a argila expandida no reator. A massa inicial de combustível é registrada assim como a energia informada no medidor, a bancada de resistência é ligada e temos o início do ensaio. É necessário ajustar o débito do motor e verificar se o mesmo está constante, a rotação do motor deve estar entre 57 e 63 Hz, e a tensão gerada deve estar constante no valor de 380 V, tensão essa que é trifásica. Essas verificações devem ser feitas a cada aumento de carga da bancada de resistências que são ligadas de acordo com a potência que se deseja extrair do motor.

A argila expandida é utilizada, pois é refratária e ajuda a manter o calor dentro do reator, e evita com que haja entupimentos na grelha localizada no inferior do reator.

Com o motor ligado e sendo alimentado ainda pelo diesel, é iniciada a combustão no reator do gaseificador, auxiliada geralmente por uma estopa embebida em óleo diesel e inserindo-a no meio da biomassa. A válvula do que regula a passagem do gás de síntese deve estar aberta, para que o fluxo de ar do gaseificador esteja liberado. Repete-se o procedimento de ajuste do débito e aumento da carga da

bancada de resistência, e novos dados são gerados e armazenados no computador. No término desta etapa registra-se a massa final do combustível e a energia final apontada pelo medidor.

Para o ensaio do óleo vegetal, o processo é semelhante, porém antes da tomada de dados, a troca de combustível tem que ser feita. Como o óleo vegetal necessita de um pré-aquecimento antes que seja utilizado como combustível, para que sua viscosidade seja mais próxima do diesel possível, a troca de combustível é feita após um tempo, com o motor ligado no diesel primeiro, e após o aquecimento, a linha de alimentação de diesel é fechada e a do óleo aberta. O óleo passa, antes de entrar no motor, por uma resistência elétrica que o aquece logo antes de ser injetado.

Com o motor operando com óleo vegetal podemos fazer a aquisição de dados da mesma maneira anteriormente descrita, com a opção de utilizar ou não o gaseificador. Ambas as opções devem ser realizadas, a fim de comparar o consumo do óleo vegetal com e sem a ajuda do gás de síntese.

É necessário obter o consumo específico de diesel e de óleo vegetal, em g/kWh. Temos:

$$n_e = \frac{P_e}{\dot{m}_D \times PCI} \quad (1)$$

n_e é a eficiência efetiva do motor, P_e é a potência efetiva em kW, \dot{m}_D é o consumo em g/h e PCI é poder calorífico do óleo diesel ou do óleo vegetal.

Assim o consumo específico é dado por:

(2)

$$C_e = \frac{\dot{m}_D}{P_e} = \frac{1}{n_e \times PCI}$$

Como já citado anteriormente o PCI do óleo vegetal de tucumã é de 29,37 MJ/kg, e o do óleo diesel é conhecido pelo valor de 42,67 MJ/kg.

3.3 ENSAIOS REALIZADOS

Os ensaios ocorreram na bancada do LEA-UnB. Primeiramente foi feita um inspeção de toda a bancada, checando se todas as juntas de tubulação e dos aparelhos estão corretas, se não haviam parafusos soltos, e se a parte elétrica da bancada estava em ordem. Verificamos também se software do sistema de aquisição de dado estava funcionando perfeitamente.

Para isso foi realizado um ensaio simples, primeiramente utilizando óleo diesel como combustível piloto. Como o sistema de aquisição de dados funcionou perfeitamente e o motor não apresentou falhas, aproveitou-se a oportunidade para colher os dados do motor operando somente com o diesel para base de comparação, assim todos os outros ensaios tiveram base nesse primeiro, o qual foi utilizado seis níveis de carga na bancada de resistências, correspondentes a 1,8kW, 2,5kW, 4,2kW, 6,0kW, 8,25kW e 10,15kW, sendo essa uma combinação que se mostrou satisfatória dada às condições do conjunto de diferentes resistências presentes na bancada.

Após a checagem inicial do sistema e da coleta de dados realizada o próximo ensaio realizado foi para conferir o sistema de duplo combustível do grupo gerador, para esta etapa utilizamos diesel comum e óleo vegetal de cozinha (de soja), o qual já sabia que funcionaria e que não entupiria as linhas de alimentação do motor. Neste ensaio foi preciso aquecer o óleo vegetal, ainda que o mesmo se encontre em um estado viscoso aceitável, para garantir o funcionamento completo do sistema.

Diferentemente do ensaio com apenas o diesel, nesta não foi feita a coleta de dados, pois não é caso de estudo desse projeto.

O próximo passo foi a realização do ensaio com o óleo de tucumã (SVO) como combustível piloto, porém ainda sem o uso do gaseificador. Para o pré-aquecimento do sistema, ligou-se o motor com diesel e depois foi realizada a troca para o óleo vegetal de cozinha utilizado no ensaio anterior, com a intenção de dar fim ao mesmo e logo em seguida já dar início ao uso do óleo de tucumã, previamente aquecido em banho-maria com a ajuda de uma resistência elétrica.

Para a checagem do gaseificador foi utilizando um saco de 3 kg de carvão vegetal comum, somente para aferir se o sistema estava em condições de operação não desperdiçando a biomassa a ser testada. Os dados levantados com o carvão vegetal não foram utilizados como base de comparação. O combustível piloto utilizado nessa ocasião foi o óleo diesel.

Com todos os sistemas checados e testados, prosseguimos com a realização de mais um ensaio, dessa vez com o diesel como combustível piloto, e a biomassa sólida do tucumã como combustível sólido do gaseificador. Neste ensaio os dados foram coletados para posterior comparação, sempre utilizando a mesma metodologia dos anteriores, com a mesma sequência de carga utilizada anteriormente. Foi consumida uma massa de aproximadamente 5 kg de biomassa nessa etapa.

Para finalizar realizou-se o último ensaio, com o óleo *in natura* de tucumã como combustível piloto e a biomassa sólida como combustível do gaseificador. Os dados dessa etapa foram coletados, diferenciados somente pela ausência da última tomada de dados, referente à potência de carga de 10,15kW, pois nesse estágio a biomassa disponível já estava completamente exaurida e o conjunto já não tinha mais poder calorífico para a tomada de dados.

Ao total foram realizados seis ensaios, conforme a tabela abaixo descreve:

Tabela 3.1: Ensaios realizados para o projeto e matéria prima utilizada.

Ensaios	Propósito	Material utilizado
6/dez	Verificação do sistema de coleta de dados e coleta de dados para comparação	Óleo Diesel (aprox. 2L)
7/dez	Verificação do sistema de duplo combustível	Óleo Diesel (aprox. 500 mL) e Óleo Vegetal de Cozinha (2,7 Litros)
7/dez	Coleta de dados	Óleo Diesel (aprox. 500 mL) e Óleo de Tucumã (1 Litro)
14/dez	Verificação do sistema de gaseificação	Óleo Diesel (aprox. 2 Litros) Carvão Vegetal (3 kg)
16/dez	Coleta de dados	Óleo Diesel (aprox. 2 Litros) e Biomassa de Tucumã (aprox. 5 kg)
17/dez	Coleta de dados	Óleo de Tucumã (aprox. 1,5 Litro) e Biomassa de Tucumã (aprox. 6 kg)

Gastaram-se no total, aproximadamente 11 kg de biomassa de tucumã e 2,5 litros de óleo vegetal de tucumã. Também podemos contabilizar um gasto de 2,7 litros de óleo vegetal de cozinha, o equivalente a três garrafas normalmente comercializadas, 3 kg de carvão vegetal comum, e mais de 5 litros de óleo diesel.



Figura 3.4: Foto da bancada experimental de gaseificação.

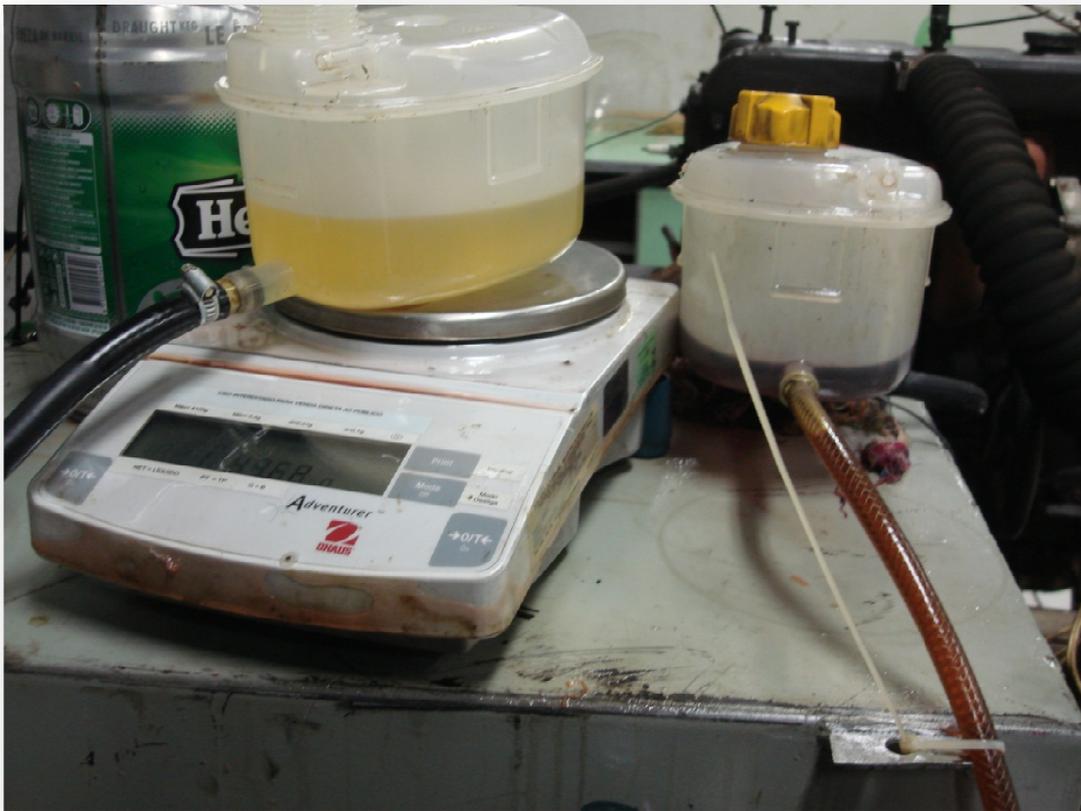


Figura 3.5: Foto da balança de precisão e dos reservatórios de óleo vegetal (direita) e óleo diesel (esquerda).



Figura 3.6: Foto da bancada de resistências e do computador utilizado para coleta de dados.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 TABELAS

Concluídos os ensaios, obtivemos várias informações sobre o comportamento da biomassa em estudo, e agora devemos analisá-los corretamente.

No primeiro ensaio, realizado no dia 06/12, onde só foi usado o óleo diesel como combustível piloto, colhemos os seguintes dados:

Tabela 4.1: Dados obtidos do ensaio com óleo diesel

Carga (kW)	Potencia média (kW)	C_e (g/kWh)	Débito (g/s)	Eficiência
1,8	1,821	933,30	0,472	9,18%
2,5	2,169	846,42	0,510	10,12%
4,2	4,263	482,11	0,571	17,77%
6	5,850	372,29	0,605	23,02%
8,25	8,417	334,46	0,782	25,62%
10,15	10,15	428,21	1,208	20,02%
Tempo de ensaio: 55min.				

No segundo ensaio, realizado no dia 07/12, onde só foi usado o óleo de tucumã (SVO) como combustível piloto, colhemos os seguintes dados:

Tabela 4.2: Dados obtidos do ensaio com óleo de tucumã (SVO)

Carga (kW)	Potencia média (kW)	C_e (g/kWh)	Débito (g/s)	Eficiência
1,8	1,853	1072,59	0,552	11,41%
2,5	2,448	874,73	0,592	14,07%
4,2	4,325	511,83	0,615	23,92%
6	5,943	464,57	0,767	26,35%
8,25	8,591	464,32	1,109	26,35%
10,15	10,073	470,83	1,315	26,05%
Tempo de ensaio: 20min.				

Analisando as tabelas 4.1 e 4.2 podemos ver também que o consumo específico C_e do diesel foi inferior ao do óleo de tucumã, dado seu menor poder calorífico. Ambos os combustíveis tiveram seu melhor rendimento na faixa de potência de 8,5 kW, onde com o diesel tivemos uma eficiência de 25,62% e de 26,35% com o óleo de tucumã.

No terceiro ensaio para coleta de dados, realizado no dia 15/12, utilizando óleo diesel como combustível piloto com o auxílio do gás de síntese (SG) proveniente da queima da biomassa do tucumã, obtivemos os seguintes dados:

Tabela 4.3: Dados obtidos do ensaio com óleo diesel e gás de síntese do tucumã.

Carga (kW)	Potencia média (kW)	C_e (g/kWh)	Débito (g/s)	Eficiência
1,8	1,407	545,65	0,212	15,80%
2,5	2,505	346,67	0,234	25,48%
4,2	3,981	222,48	0,246	38,53%
6	6,059	346,14	0,582	24,78%
8,25	8,134	346,12	0,782	24,76%
10,15	10,022	598,88	1,667	14,31%
Tempo de ensaio: 35min.				

No último ensaio, realizado no dia 16/12, utilizando óleo de tucumã como combustível piloto com o auxílio do gás de síntese (SG) proveniente da queima da biomassa do tucumã, obtivemos os seguintes dados:

Tabela 4.4: Dados obtidos do ensaio com óleo e gás de síntese do tucumã.

Carga (kW)	Potencia média (kW)	C_e (g/kWh)	Débito (g/s)	Eficiência
1,8	1,792	625,65	0,311	19,60%
2,5	2,159	530,63	0,318	23,09%
4,2	4,276	408,36	0,485	30,00%
6	5,896	416,04	0,681	29,45%
8,25	7,817	507,01	1,100	24,17%
Tempo de ensaio: 28min.				

No último ensaio tornou-se inviável a última tomada de dados correspondente a potência de 10,15 kW, pois a biomassa já tinha perdido toda sua umidade e o gás de síntese produzido começou a atrapalhar mais do que ajudar, pois o ajuste do débito foi ao máximo e ainda assim não foi possível chegar aos níveis exigidos de rotações (entre 57 e 63 Hz) e de voltagem (380 V).

Comparando as tabelas 4.3 e 4.4, o rendimento do mostrou um acréscimo ao utilizar o gás de síntese gerado pela biomassa, podemos notar esse acréscimo principalmente nas três primeiras faixas de carga utilizadas, já nas demais faixas o gás, devido ao seu baixo poder calorífico não pode ajudar muito, chegando a supostamente atrapalhar o rendimento dos combustíveis líquido.

4.2 GRÁFICOS

Com as tabelas podemos comparar o desempenho do grupo gerador com diferentes fontes de energia. Ao observar as tabelas, podemos averiguar que o óleo de tucumã alcançou uma eficiência maior do que a do diesel, tanto nos ensaios sem gaseificação quanto os com o processo auxiliar.

A partir desses dados pudemos levantar as curvas de débito do combustível líquido, que são apresentadas a seguir:

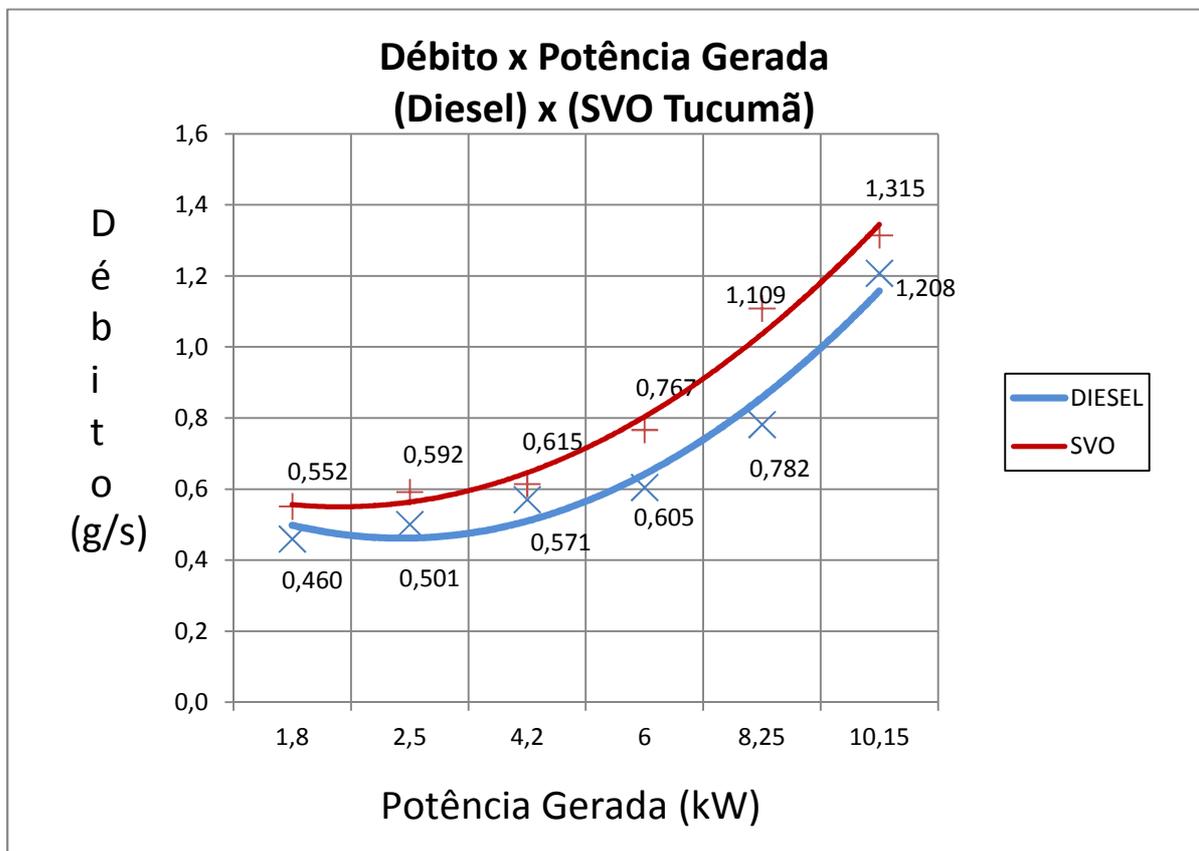


Figura 4.1: Gráfico comparativo do débito do diesel e do óleo vegetal (SVO) de tucumã.

No gráfico acima podemos observar a diferença no consumo de combustível líquido. Como esperado, o consumo do óleo vegetal de tucumã (SVO) foi maior do que o consumo de óleo diesel em todos os pontos, pois o PCI do óleo vegetal é menor do que o PCI do diesel. Para melhor interpretação dos dados foi adicionada uma linha de tendência que reflete de maneira mais progressiva o

comportamento do débito de cada combustível, assim podemos ter uma idéia melhor da diferença entre eles.

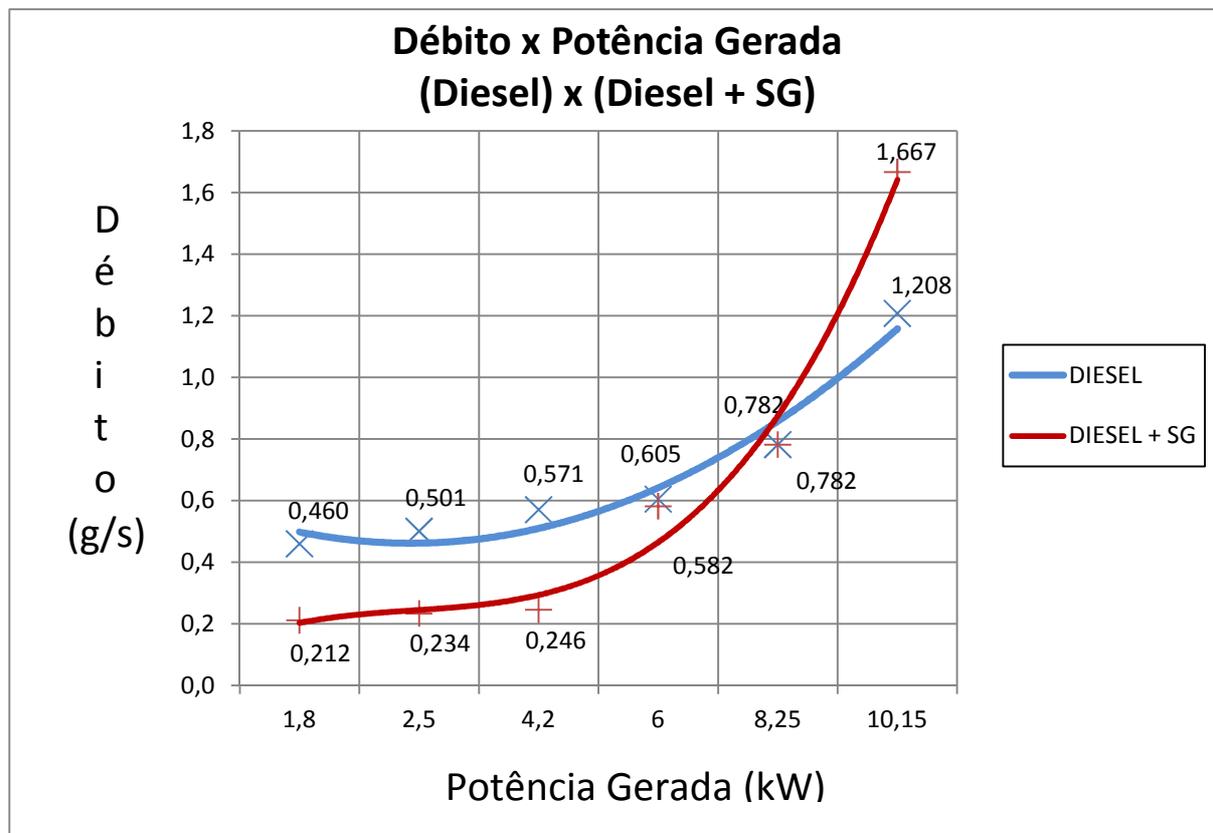


Figura 3.2: Gráfico comparativo do débito do diesel e do óleo diesel com gás de síntese (SG).

Analisando a figura 4.2 podemos ver que o débito de diesel caiu em mais nas três primeiras faixas de potência. A redução média nas três primeiras faixas foi de 54,6%. Porém nas últimas três faixas isso não ocorreu, nas faixas de 6 kW e 8,25 kW o débito foi praticamente o mesmo, e na última o débito do diesel combinado com o gás de síntese foi maior, fato que deve estar relacionado com a qualidade da biomassa para ser gaseificada, pois a mesma já se encontrava sem umidade, cessando a produção de H_2 e CO . Tal fato foi constatado ao jogar um pouco de água no reator e verificar um momentâneo acréscimo na rotação do motor, dado a volta momentânea da produção de H_2 e CO .

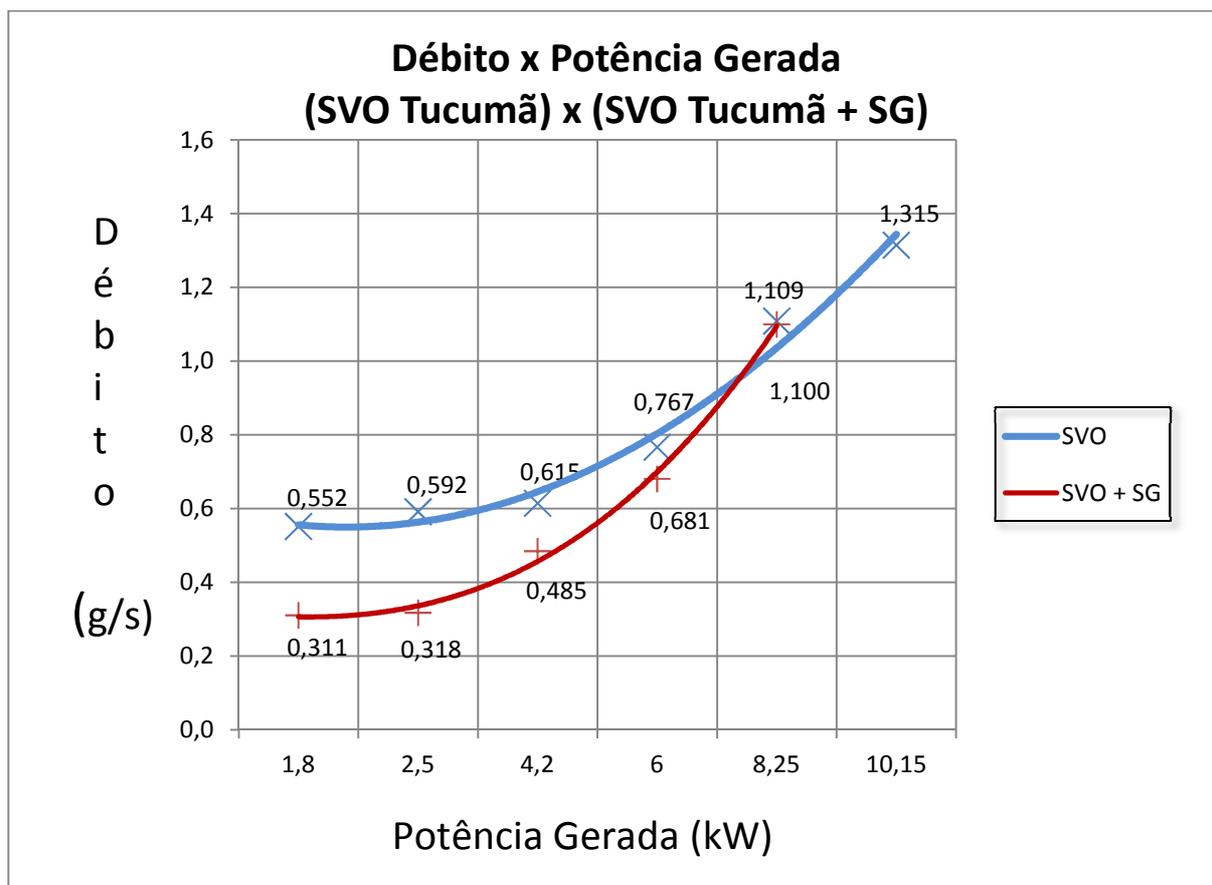


Figura 4.3: Gráfico comparativo do débito do óleo de tucumã e do óleo de tucumã (SVO) com gás de síntese (SG).

O gráfico na figura 4.3 apresenta uma relação semelhante ao gráfico da figura 4.2, porém a curva vermelha representa o débito do óleo de tucumã (SVO) com a adição do gás de síntese (SG) e a curva em azul o débito somente com o óleo de tucumã (SVO). Podemos perceber que o débito do óleo com o auxílio do gás de síntese é menor nas quatro primeiras faixas de potência, sendo em média 30,6% menor do que o débito sem o gás, porém na quinta faixa os débitos se igualaram o que indica que o gás de síntese não está sendo eficaz como anteriormente. A sexta faixa de potência não foi aferida pois o débito chegou ao máximo sem que as condições necessárias (rotação entre 57 e 63 Hz e voltagem de 380V) fossem satisfeitas e optou-se pelo final do ensaio já que a biomassa se esgotou.

4.3 FOTOS



(a)



(b)



(c)

Figura 4.4: Biomassa no reator do gaseificador no início do quarto ensaio (a) após 15 minutos (b) e no final do mesmo ensaio (c)

Nas figuras 4.4 (a) (b) e (c) pode-se observar a biomassa em três momentos distintos, a diferença de tempo entre (a) e (b) é de apenas 5 minutos. Podemos inferir que o coquinho do tucumã utilizado como biomassa se mostrou ter muito pouca umidade, pois a zona de secagem se acaba rapidamente e a zona de pirólise vem à tona e começa a queimar a biomassa antes do momento ideal. No final do ensaio a biomassa já aparentava ser um corpo líquido e não mais sólido, com um aspecto gelatinoso. Por isso ocorre a anomalia que podemos observar nos gráficos das figuras 4.3 e 4.2.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo mostrou uma vasta gama de informações sobre a possibilidade da geração de eletricidade distribuída em pequena escala, baseada na biomassa de tucumã. Tanto o óleo como a biomassa sólida do tucumã foram ensaiados isoladamente e conjuntamente, assim abrangendo todas as possibilidades de seu uso propostas inicialmente.

O óleo vegetal de tucumã se mostrou adequado para substituir o óleo diesel em pequena escala, pois apesar de seu menor poder calorífico o óleo teve um rendimento muito próximo ao do diesel, suprimindo a demanda de energia de maneira satisfatória.

A biomassa sólida, o coquinho do tucumã, cumpriu parcialmente com seu objetivo, não durando o suficiente para promover o efeito desejado. Devido a sua pouca umidade a fase de secagem é facilmente passada e sua gaseificação se dá de maneira muito rápida, de modo que seu controle se torna bem difícil. No começo o gás produzido se mostra eficaz, mas conforme a umidade acaba seu desempenho fica prejudicado, prejudicando também o rendimento do combustível líquido.

Ao final pode-se dizer que os futuros investimentos nessa biomassa deverão se concentrar em achar um controle melhor da gaseificação da biomassa, talvez através de uma geometria diferente do reator, e um estudo mais aprofundado no desempenho e nas emissões do óleo vegetal, com olhos voltados também a possíveis danos ao motor utilizado, o que requer um prazo maior de estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, P.R & NEITZKE, G. Geração de Energia Elétrica por Gaseificação de Biomassa e Queima Direta de Óleo Vegetal em Motor do Ciclo Diesel, 2008.

Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. ed. – Brasília : ANEEL, 2002.

BARBOSA, B.S., KOOLEN, H.H.F., BARRETO A.C., SILVA, J.D., FIGLIUOLO, R., NUNOMURA,S.M. Aproveitamento do Óleo das Amêndoas de Tucumã do Amazonas na Produção de Biodiesel. 2009

BEDOYA, I.D., ARRIETA, A.A., CADAVID, F.J., Effects Of Mixing System And Pilot Fuel Quality On Diesel-Biogas Dual Fuel Engine Performance. 2008

CANTÃO, M. Produção de Hidrogênio a Partir de Biomassa. 2007

CARTAXO, E.F., JANUZZI, G.M., Fornecimento de serviço de energia elétrica para comunidades isoladas da Amazônia: um estudo de caso. 2000

COELHO, S.T., SILVA, O.C., VELÁZQUEZ, S.M.S.G., MONTEIRO, M.B.C.A., SILOTTO, C.E.G. Utilização de Óleo de Palma “In Natura” Como Combustível em Grupos Geradores A Diesel. 2004

DE BARI, I., BARISANO, D., CARDINALE, M., MATERA, D., NANNA, F., VIGGIANO, D., Air Gasification of Biomass in a Downdraft Fixed Bed: A Comparative Study of the Inorganic and Organic Products Distribution. 1999

DIAS, M.S.C. Uso de Pequenos Gaseificadores para Geração de Energia Elétrica e Bombeamento D’água em Localidades Remotas. 2004

FARIA, I.D., PEIXOTO, M., MORAIS, P., SOUZA, R.B.L., A Utilização de Óleo Vegetal Refinado como Combustível – Aspectos Legais, Técnicos, Econômicos, Ambientais e Tributários. 2010

FERREIRA, S.A.N., GENTIL, D.F.O., Extração e Embebição de Sementes de Tucumã (*Astrocaryum Aculeatum*). 2006

HENRIQUES, M., MORALES, M.E. Panorama geral do uso da energia elétrica na região norte, 2005

IHA, O. K. Produção e Análises de Bio-óleo e Biodiesel Utilizando Oleaginosas que Possam Contribuir para o Aumento da Matriz Energética Renovável Brasileira, 2010

RAMADHAS, A.S., JAYARAJ, S., MURALEEDHARAN, C., Dual Mode Fuel Operation in Diesel Engines Using Renewable Fuels: Rubber Seed Oil and Coir-pith Producer Gas. 2006

RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M., Combustão e Gasificação de Biomassa, Soluções Energéticas para a Amazônia, Programa Luz para Todos. Ministério de Minas e Energia – 1ª Edição Ano: 2008

SINGH, R.N., SINGH, S.P., PATHAK, B.S., Investigation on Operation of CI Engine Using Producer Gas and Rice Bran Oil in Mixed Fuel Mode. 2005

VERAS, C. A. G., NIETZKE, G., RODRIGUES, A. C., RODRIGUES, P. A. Small scale electricity generation from simultaneous burning of straight vegetable oil and syngas in compression ignition engine, ECOS 2009

VERAS, C. A. Gurgel. Notas de Aula de Gaseificação de Biomassa e Carvão, 2009/1.

Sites:

<http://pt.wikipedia.org/wiki/Separador_ciclônico>

<<http://www.inpa.gov.br>> – INPA

<http://www.amazonoil.com.br/produtos/oleos/tucuma_polpa.htm>

<<http://voilpower.com/>> - VoilPower

<http://www.vivaterra.org.br/palmeiras_nativas.htm>

ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Tabela A.1: Dados obtidos no primeiro ensaio (Diesel).	35
Anexo II	Tabela A.2: Dados obtidos no segundo ensaio (SVO Tucumã).	36
Anexo III	Tabela A.3: Dados obtidos no terceiro ensaio (Diesel + Gás de Síntese).	37
Anexo IV	Tabela A.4: Dados obtidos no quarto ensaio (SVO Tucumã + Gás de Síntese).	38

ANEXO I

Tabela A.1: Dados obtidos no primeiro ensaio (Diesel).

DADOS DE ENTRADA									SAÍDA		Eficiência	CEC	
QUADRO ELÉTRICO						CONSUMO COMBUSTÍVEL		Intervalo de tempo	Potência [kW]				
Carga	Inicial			Final			Débito (g/s)*			Δt [s]			
	Tempo (t1)			Tempo (t2)									
	hh	mm	ss	Medida [W.h]	hh	mm	ss	Medida [W.h]					
1.8	21	37	22	446969	21	39	52	446988	0,472	150	1,822	9,19	932,60
	21	37	22	446969	21	41	4	446998	0,472	222	1,807	9,12	940,34
	21	37	22	446969	21	42	1	447005	0,472	279	1,792	9,04	948,21
	21	37	22	446969	21	44	26	447024	0,472	424	1,863	9,40	912,08
2.5	21	49	45	447200	21	50	33	447229	0,510	48	2,175	10,15	844,14
	21	49	45	447200	21	51	6	447249	0,510	81	2,178	10,17	843,06
	21	49	45	447200	21	52	2	447282	0,510	137	2,155	10,06	852,07
4.2	21	56	1	447496	21	57	5	447572	0,571	64	4,275	17,83	480,84
	21	56	1	447496	21	58	2	447639	0,571	121	4,255	17,74	483,15
	21	56	1	447496	21	59	6	447715	0,571	185	4,262	17,77	482,35
6.0	22	5	49	448325	22	6	46	448417	0,605	57	5,811	22,87	374,84
	22	5	49	448325	22	7	50	448522	0,605	121	5,861	23,07	371,60
	22	5	49	448325	22	8	38	448601	0,605	169	5,879	23,14	370,45
8.25	22	15	2	449288	22	16	7	449439	0,782	65	8,363	25,46	336,62
	22	15	2	449288	22	17	3	449572	0,782	121	8,450	25,73	333,18
	22	15	2	449288	22	18	8	449724	0,782	186	8,439	25,69	333,61
10.15	22	22	39	450388	22	23	35	450548	1,208	56	10,286	20,27	422,80
	22	22	39	450388	22	24	34	450707	1,208	115	9,986	19,68	435,49
	22	22	39	450388	22	25	33	450881	1,208	174	10,200	20,10	426,35

ANEXO II

Tabela A.2: Dados obtidos no segundo ensaio (SVO Tucumã).

DADOS DE ENTRADA									SAÍDA		Eficiência	CEC	
QUADRO ELÉTRICO				CONSUMO COMBUSTÍVEL		Intervalo de tempo		Potência [kW]					
Carga	Inicial			Final					Débito (g/s)*	Δt [s]			
	Tempo (t1)		Medida [W.h]	Tempo (t2)		Medida [W.h]							
	hh	mm	ss		hh	mm	ss						
1.8	21	10	33	453993	21	10	57	454005	0,552	24	1,800	11,09	1104,00
	21	10	33	453993	21	11	21	454018	0,552	48	1,875	11,55	1059,84
	21	10	33	453993	21	11	37	454026	0,552	64	1,856	11,44	1070,55
	21	10	33	453993	21	12	1	454039	0,552	88	1,882	11,60	1056,00
2.5	21	13	35	454087	21	13	51	454099	0,592	16	2,700	15,51	789,33
	21	13	35	454087	21	14	15	454113	0,592	40	2,340	13,44	910,77
	21	13	35	454087	21	14	39	454128	0,592	64	2,306	13,25	924,10
4.2	21	16	32	454223	21	16	56	454252	0,615	24	4,350	24,06	508,97
	21	16	32	454223	21	17	12	454271	0,615	40	4,320	23,89	512,50
	21	16	32	454223	21	17	28	454290	0,615	56	4,307	23,82	514,03
6.0	21	20	18	454522	21	20	42	454562	0,767	24	6,000	26,61	460,20
	21	20	18	454522	21	21	6	454601	0,767	48	5,925	26,28	466,03
	21	20	18	454522	21	21	22	454627	0,767	64	5,906	26,19	467,50
8.25	21	23	12	454831	21	23	44	454907	1,109	32	8,550	26,22	466,95
	21	23	12	454831	21	24	0	454946	1,109	48	8,625	26,45	462,89
	21	23	12	454831	21	24	24	455003	1,109	72	8,600	26,38	464,23
10.15	21	26	38	455190	21	27	5	455261	1,315	27	9,467	24,49	500,07
	21	26	38	455190	21	27	24	455322	1,315	46	10,330	26,72	458,26
	21	26	38	455190	21	28	4	455439	1,315	86	10,423	26,96	454,18

ANEXO III

Tabela A.3: Dados obtidos no terceiro ensaio (Diesel + Gás de Síntese).

DADOS DE ENTRADA									SAÍDA			Eficiência	CEC
QUADRO ELÉTRICO									CONSUMO COMBUSTÍVEL	Intervalo de tempo	Potência [kW]		
Carga	Inicial			Medida [W.h]	Final			Medida [W.h]	Débito (g/s)*				
	Tempo (t1)				Tempo (t2)								
hh	mm	ss	hh	mm	ss	hh	mm	ss					
1.8	21	47	0	455846	21	47	32	455857	0,212	32	1,238	13,90	616,73
	21	47	0	455846	21	47	49	455865	0,212	49	1,396	15,68	546,74
	21	47	0	455846	21	48	5	455873	0,212	65	1,495	16,79	510,37
	21	47	0	455846	21	48	24	455881	0,212	84	1,500	16,85	508,80
2.5	21	53	8	456021	21	53	24	456035	0,234	16	3,150	32,05	267,43
	21	53	8	456021	21	54	20	456066	0,234	72	2,250	22,89	374,40
	21	53	8	456021	21	54	45	456078	0,234	97	2,115	21,52	398,21
4.2	22	0	17	456319	22	0	41	456346	0,246	24	4,050	39,20	218,67
	22	0	17	456319	22	1	5	456372	0,246	48	3,975	38,47	222,79
	22	0	17	456319	22	2	10	456442	0,246	113	3,919	37,93	226,00
6.0	22	5	20	456689	22	5	44	456726	0,582	24	5,851	23,94	358,09
	22	5	20	456689	22	6	9	456762	0,582	49	6,012	24,59	348,50
	22	5	20	456689	22	6	54	456825	0,582	94	6,314	25,83	331,83
8.25	22	11	41	457340	22	12	5	457391	0,782	24	8,156	24,83	345,17
	22	11	41	457340	22	12	37	457459	0,782	56	8,045	24,49	349,93
	22	11	41	457340	22	13	2	457510	0,782	81	8,201	24,97	343,28
10.15	22	21	47	458747	22	22	12	458806	1,667	25	9,894	14,13	606,55
	22	21	47	458747	22	23	0	458925	1,667	73	9,997	14,28	600,30
	22	21	47	458747	22	24	4	459082	1,667	137	10,175	14,53	589,80

ANEXO IV

Tabela A.4: Dados obtidos no quarto ensaio (SVO Tucumã + Gás de Síntese).

DADOS DE ENTRADA									SAÍDA		Eficiência	CEC	
QUADRO ELÉTRICO							CONSUMO COMBUSTÍVEL	Intervalo de tempo	Potência [kW]				
Carga	Inicial			Final			Débito (g/s)*			Δt [s]			
	Tempo (t1)	Medida [W.h]		Tempo (t2)	Medida [W.h]								
	hh	mm	ss		hh	mm	ss						
1.8	22	11	6	459703	22	11	58	459727	0,311	52	1,662	18,17	673,83
	22	11	6	459703	22	12	34	459748	0,311	88	1,841	20,13	608,18
	22	11	6	459703	22	13	1	459761	0,311	115	1,816	19,86	616,64
	22	11	6	459703	22	13	20	459772	0,311	134	1,854	20,27	603,97
2.5	22	16	49	459887	22	17	5	459897	0,318	16	2,250	24,07	508,80
	22	16	49	459887	22	17	30	459911	0,318	41	2,107	22,54	543,25
	22	16	49	459887	22	18	2	459930	0,318	73	2,121	22,68	539,86
4.2	22	23	34	460141	22	23	50	460158	0,485	16	4,314	30,25	404,73
	22	23	34	460141	22	24	23	460194	0,485	49	4,195	29,42	416,21
	22	23	34	460141	22	24	55	460224	0,485	81	4,320	30,30	404,17
6.0	22	30	17	460604	22	30	41	460641	0,681	24	5,986	29,90	409,56
	22	30	17	460604	22	31	5	460679	0,681	48	6,002	29,98	408,46
	22	30	17	460604	22	31	53	460756	0,681	96	5,700	28,47	430,11
8.25	22	35	4	461088	22	35	31	461132	1,100	27	7,951	24,59	498,05
	22	35	4	461088	22	36	5	461197	1,100	61	7,996	24,72	495,25
	22	35	4	461088	22	39	11	461477	1,100	247	7,504	23,20	527,72