

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Gustavo Papa de Figueiredo

**Geração de Energia Elétrica e Água Potável a partir dos
Resíduos da Produção de Açai**

Projeto de Graduação

Projeto Final de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Sérgio Leal Braga

Coorientador: Florian Alain Yannick Pradelle

Rio de Janeiro

Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de ter estudado em uma universidade de primeira linha, referência nacional na área de engenharia mecânica, oferecendo programas de domínio adicional e intercâmbio com as mais conceituadas universidades do mundo.

Agradeço aos meus pais, ao meu irmão e à minha namorada que sempre me apoiaram e incentivaram a perseverar na caminhada para obter o grau de bacharel em engenharia mecânica.

Agradeço à SoEnergy International, empresa na qual trabalhei como estagiário e trainee, por todo o apoio e conhecimentos adquiridos nas áreas de geração de energia térmica e renovável, cumprindo com a missão de levar energia para as comunidades isoladas do estado do Pará.

RESUMO

Geração de Energia Elétrica e Água Potável a partir dos Resíduos da Produção de Açaí

Uma solução de gaseificação, geração e dessalinização foi projetada utilizando os resíduos da produção de açaí da comunidade produtora da Ilha das Cinzas, Gurupá/PA com o intuito de reduzir o descarte inapropriado dos caroços do açaí que constituem em média 79% em peso do fruto in natura. Foi realizado um balanço térmico do processo de gaseificação para precisar a energia disponível no gás de síntese produzido a partir da biomassa, chegando a um poder calorífico inferior de 3,05 MJ/Nm³ para o *syngas* e 14,16 MJ/kg para o substrato. A solução visa a produção de gás de síntese de composição média de 10,3% de CO, 12% de H₂, 1,35% de CH₄ e 55,23% de N₂ a ser utilizado como combustível em um motor de combustão interna acoplado a um gerador de eletricidade de 45 kW de potência nominal, obtendo-se 26 kW apenas operando com o combustível proposto em carga máxima. A energia gerada é suficiente para suprir a demanda energética do povoado produtor, obtendo uma eficiência de conversão termoquímica de biomassa em energia elétrica de 12%. Reaproveitando ainda os gases de exaustão do motogerador, foi projetada uma central de dessalinização da água do estuário do Rio Amazonas para produção de água potável para a comunidade isolada de água encanada, cujos trocadores de calor foram dimensionados calculando-se as áreas de troca térmica e seus coeficientes globais de troca térmica, tanto para o evaporador ($A_e = 0,6 \text{ m}^2$ e $U = 400 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) como para o condensador ($A_c = 0,9 \text{ m}^2$ e $U = 400 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Da mesma forma, os calores de troca térmica foram determinados para cada trocador de calor: 31 kW para o evaporador e 27 kW para o condensador. Dadas as condições mínimas de operação determinadas em 1,6 kg/h de substrato para a gaseificação e geração, estudou-se as janelas de oportunidade de aplicação da solução para os períodos de safra e entressafra através da estocagem dos resíduos excedentes produzidos nos períodos de elevada produção.

Palavras-chave: Biomassa; Energias Renováveis; Gaseificação; Geração; Dessalinização.

ABSTRACT

Electric Power Generation and Potable Water Production from Açaí Crops Waste

A gasification, power generation and desalination solution have been designed using açaí crops waste of Ilha das Cinzas production community, from Gurupá/PA aiming to reduce the inappropriate disposal of the seeds that in average are 79% in mass of the fruit. A thermal balance of the gasification process has been developed to determine the gas energy produced from the biomass, achieving a lower heating value of 3,05 MJ/Nm³ for the syngas and 14,16 MJ/kg for the biomass. The solution aims the production of natural gas with average composition of 10,3% of CO , 12% of H_2 , 1,35% of CH_4 e 55,23% of N_2 being used as a fuel for an internal combustion engine connected to an electric generator of 45 kW nominal power, achieving 26 kW operating with the proposed fuel in full load. The power produced is sufficient to meet the local demand of açaí crops within the community with a thermochemical biomass conversion efficiency of 12%. Reusing the thermal energy from the exhaust gases from the engine, a desalination plant was designed to evaporate the water from Rio Amazonas estuary to produce drinking water for the isolated community, with the heat exchangers being designed from the global coefficient of heat exchange and the heat transfer area for the evaporator ($A_e = 0,6 \text{ m}^2$ e $U = 400 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$) and for the condenser ($A_c = 0,9 \text{ m}^2$ e $U = 400 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$). Moreover, the thermal power exchanged within the heat exchangers has been specified: 31 kW for the evaporator and 27 kW for the condenser. Given the minimum operating conditions being set for 1,6 kg/h of biomass for gasification and power generation, the viable periods for application of the proposal was set for both the harvest and off-season crops time through the storage of seeds during the surplus of production.

Key-words: Biomass; Renewable Energies; Gasification; Power Generation; Desalination.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	10
2.2	AÇAÍ.....	11
2.3	PROCESSO PRODUTIVO	14
2.4	BIOMASSA.....	16
2.5	BRIQUETAGEM.....	19
2.6	CICLOS TERMODINÂMICOS.....	21
2.7	CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DE BIOMASSA	23
2.8	MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA	29
2.9	PLANTAS DE DESSALINIZAÇÃO	31
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	36
4	METODOLOGIA	40
4.1	CENTRAL DE GASEIFICAÇÃO	40
4.2	CENTRAL DE GERAÇÃO	47
4.3	CENTRAL DE DESSALINIZAÇÃO.....	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Açaizeiro (Fonte: EMBRAPA).....	12
Figura 2-2: Descarte irregular de bigbags de caroços de açaí (Fonte: Menezes, 2018)	14
Figura 2-3: Açaí armazenado em cestos após colheita e separação manual (Fonte: Uol Notícias)	15
Figura 2-4: Máquina despulpadeira de açaí de fabricação Braesi (Fonte: Braesi)	15
Figura 2-5: Capacidade Instalada de Usinas à Biomassa no mundo (Fonte: IRENA, 2019). .	16
Figura 2-6: Exemplos de briquetes energéticos (Fonte: EMBRAPA).....	19
Figura 2-7: Briquetadeira Hidráulica de Pistão da fabricante Lippel, modelo BH100A (Fonte: Lippel).....	20
Figura 2-8: Briquetadeira de Extrusão por Parafuso da fabricante Lippel, modelo BEP 300 (Fonte: Lippel)	21
Figura 2-9: Diagramas P x v e T x s do Ciclo Padrão Otto (Van-Wylen, et al., 2003)	22
Figura 2-10: Diagrama T x s para um Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor (Van- Wylen, et al., 2003).....	23
Figura 2-11: Procedimento de conversão termoquímica de biomassa por gaseificação	26
Figura 2-12: Desenho esquemático de um gaseificador updraft (Fiuza, 2019)	27
Figura 2-13: Desenho esquemático de um gaseificador downdraft (Fiuza, 2019)	28
Figura 2-14: Eficiência dos procedimentos de remoção de particulados do syngas em função do tamanho de partícula	29
Figura 2-15: Motor de ignição por centelha a gás modelo 4006-23TRS da fabricante Perkins (Perkins, 2019).....	31
Figura 2-16: Dessalinização por destilação multi-estágio	33
Figura 3-1: Mapa da Ilha das Cinzas e sua localização no estado do Pará (Ribeiro, 2017)	37
Figura 3-2: Produtividade média mensal de açaizais localizados na Ilha das Cinzas (Ribeiro, 2017)	39
Figura 4-1: Fluxos térmico e mássico no gaseificador (Santos, 2011).....	41

Figura 4-2: Diagrama resultado do Balanço de Energia (Santos, 2011).....	45
Figura 4-3: Motor de combustão interna da fabricante MWM Série 229 (MWM, 2019)	48
Figura 4-4: Gráfico da rotação do motor e corrente gerada em função da carga aplicada (Figueiredo, 2012).....	50
Figura 4-5: Arranjo da central de dessalinização.....	52
Figura 5-1: Seção transversal do evaporador.....	56
Figura 5-2: Vista lateral em corte do condensador	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Mecanismos de mitigação de impurezas no syngas.....	29
Tabela 2: Produção mensal de frutos in natura de açaí das famílias ribeirinhas da Ilha das Cinzas (Ribeiro, 2017).....	38
Tabela 3: Resultados para o Método de Equilíbrio em um gaseificador downdraft (Santos, 2011)	43
Tabela 4: Parâmetros de operação do gaseificador downdraft (adaptado) (Santos, 2011).....	44
Tabela 5: Resultados do Balanço de Energia (Santos, 2011)	45
Tabela 6: Composição do syngas produzido (%mol/mol) (Santos, 2011).....	46
Tabela 7: Variação do teor de alcatrão medido nos experimentos (Santos, 2011)	47
Tabela 8: Resultados do monitoramento do grupo gerador (Figueiredo, 2012).....	49
Tabela 9: Aproximação da disponibilidade de biomassa disponível durante o ano	53
Tabela 10: Medidas e materiais a serem aplicados ao evaporador	56
Tabela 11: Medidas e materiais a serem aplicados ao condensador	57

1 Introdução

Recentemente, o Parlamento Europeu declarou emergência climática como uma forma de alertar não só a população europeia, mas de todo o mundo para uma maior atenção à natureza e aos impactos gerados por nós seres humanos no meio ambiente. Mais uma vez, governantes de países do primeiro mundo clamam pelo engajamento a favor da iniciativa individual para proteção e preservação do solo, da água e do ar em uma tentativa de anular ou pelo menos retardar ao máximo os efeitos e consequências da mudança climática em nosso planeta.

Um dos agentes poluidores de maior escala global atualmente é a emissão de gases poluentes na atmosfera, causada pelo uso excessivo de combustíveis fósseis para a locomoção terrestre, fluvial, marítima e aérea, para o processamento de químicos em plantas industriais, e geração de energia. Estes gases poluentes em grande concentração na atmosfera podem intensificar o efeito estufa, culminando em variações climáticas como verões mais quentes e invernos mais rigorosos, alterando o equilíbrio hídrico em locais naturalmente mais secos.

A emergência hídrica já é realidade em muitos países do planeta Terra, inclusive no Brasil. Regiões do semiárido que experenciam longos períodos de seca estão sofrendo com o aquecimento global que provoca períodos ainda mais curtos de chuva durante o ano, praticamente impossibilitando o desenvolvimento da agricultura local de subsistência e mão de obra familiar.

Muito se fala em formas alternativas de produzir energia para os mais diversos segmentos. O advento da tecnologia solar fotovoltaica e seu barateamento ao longo dos anos sustentado pelos incentivos fiscais e popularização de utilização para geração distribuída iniciou um caminho sustentável na área de geração de energia, bem como a utilização de aerogeradores que produzem energia através da força dos ventos. O grande problema dessas tecnologias é a sua intermitência de geração, e a impossibilidade de aplicação em locais que não são favorecidos com a incidência solar ou constância de ventos.

A geração à biomassa se mostrou uma fonte alternativa renovável de geração de energia, com custo de combustível significativamente inferior quando comparado aos combustíveis líquidos para geração de energia térmica. Sendo também muito aplicada para regiões onde existem elevadas quantidades de resíduos de produção agrícola com poder calorífico considerável, esta fonte é uma solução para regiões onde o sol e o vento não são tão incidentes.

Dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) mostram que dos 164 MW de capacidade instalada em 2019 para geração de energia em sistema interligado, a geração a biomassa contribui com 13 GW (8% da capacidade total instalada). Isto quer dizer oito vezes mais do que a capacidade solar fotovoltaica instalada, e quase a mesma capacidade da geração eólica. Se uma análise comparativa for feita apenas para fontes térmicas de geração, a biomassa é responsável por um terço da capacidade instalada se igualando a potência instalada que utiliza o gás natural como fonte energética, e superando a soma de todas as outras fontes térmicas expressivas (nuclear, derivados de petróleo e carvão) (Empresa de Pesquisa Energética, 2019).

Sendo assim, fica evidente que a transição energética é necessária para uma mudança de matriz energética sustentável e confiável devendo ser consideradas as mais diversas fontes alternativas às fósseis aproveitando os recursos que estados e países dispõem para viabilizar economicamente a proposta de soluções eficientes e renováveis.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Contextualização

O Brasil é notavelmente um país de grandes dimensões geográficas com variadas etnias, fruto de sequentes miscigenações, e extensas áreas verdes. Seu clima tropical úmido na maioria de seu território dita uma predominância de terras férteis principalmente nas regiões Norte e Centro-Oeste do país. Com uma bacia hídrica de dar inveja, o país conta com uma fauna e flora ainda desconhecida em sua grande parte.

Desde seu descobrimento pelos portugueses, o país sempre chamou atenção pela sua diversidade biológica e grande potencial agrícola. A Amazônia é a maior floresta do mundo cobrindo cerca de 5,7 milhões de quilômetros quadrados, e é retratada como o “pulmão do mundo” por renomados cientistas devido a sua capacidade de produção de oxigênio e captação de gás carbônico (Engels, 2017).

Este cenário de biodiversidade conduziu o desenvolvimento agrícola do país, sendo uma das principais participações do produto interno bruto brasileiro, gerando renda para muitos cidadãos rurais de todas as classes sociais, da pequena propriedade familiar até as grandes lavouras de soja para exportação.

A Região Norte do Brasil é composta pelos estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e Tocantins, contando com uma população de pouco mais de 18,4 milhões

de habitantes. O estado do Pará possui 8,6 milhões de residentes, sendo apenas 1,5 milhões na capital Belém. Nota-se uma pequena parcela populacional em centros urbanos, sendo a grande maioria instalada em vilarejos e pequenas cidades no interior no estado (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019).

Seguindo a tendência mundial de mudança da matriz energética, o Brasil está em grande vantagem. O país conta com regiões de grande incidência de ventos, além de estar posicionado em território equatorial/tropical viabilizando a geração solar-eólica que já está em grande desenvolvimento no Brasil e no mundo. Possuímos ainda uma enorme costa marítima, tornando possível também a geração por maré motriz que se encontra já em fases finais de pesquisa para obter viabilidade comercial. Mas principalmente, contamos também com mais de 60 milhões de hectares de terra fértil para produção de biomassa, seja pela cana-de-açúcar, óleos vegetais, resíduos florestais e agrícolas, tornando-nos o maior produtor de bioenergia do mundo (Sparovek, et al., 2016).

O Sistema Interligado Nacional (SIN) interliga os grandes polos geradores de energia elétrica às principais cidades do país. Hoje, todas as capitais federais (com exceção de Boa Vista, RR) estão interligadas pelo SIN. Mesmo assim, devido ao fato da grande dificuldade de construir linhas de transmissão causada devido a questões geográficas, grande parte das cidades do interior dos estados da Região Norte e Centro-Oeste não possuem quaisquer ligações com o SIN, tornando obrigatória a geração por sistemas isolados para suprir a demanda energética da área.

O modelo atual de geração nas pequenas localidades é feito por meio de termelétricas a óleo diesel, provocando uma grande poluição ambiental e gerando altos custos de importação e transporte do combustível para a região. A geração descentralizada de eletricidade a partir de recursos renováveis figura-se como uma alternativa local, viável e sustentável em termos econômicos e ambientais.

A necessidade de eletrificar as comunidades isoladas de uma forma limpa induz a necessidade de investimentos em estudos de alternativas energéticas. A geração de energia utilizando recursos abundantemente disponíveis na região é uma que deve ser considerada para alavancar o desenvolvimento socioeconômico da população local (Reis, et al., 2010).

2.2 Açaí

O açaí (*Euterpe oleracea*) é fruto do açaizeiro, tipo de palma cespitosa de até 25 metros, nativa da Venezuela, Colômbia, Equador, Guianas e Brasil, sendo abundantemente consumido

nos estados do Pará e Rio de Janeiro. É também exportado para diversos outros países nas Américas e Europa, mesmo que em menor escala. Sua produção envolve uma série de etapas de separação, preparação e congelamento, concentrada apenas no estado do Pará e porção dos estados do Amazonas e Amapá. Por ser uma produção de baixa dificuldade e baixo nível técnico, muitos produtores do açaí estão localizados em pequenos vilarejos espalhados pela região norte do país.

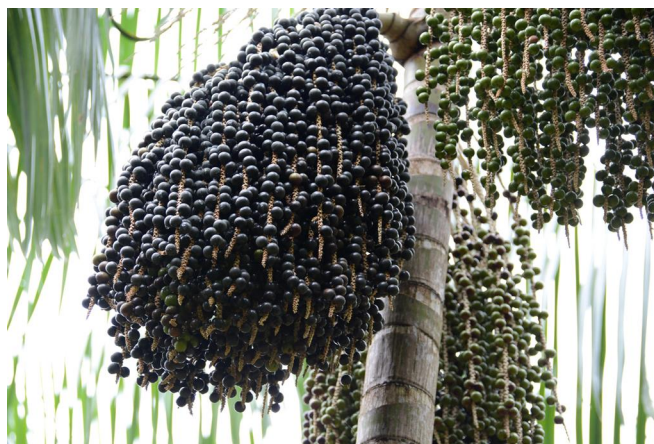


Figura 2-1: Açaizeiro (Fonte: EMBRAPA)

O fruto é hoje conhecido mundialmente e consumido diariamente nos municípios paraenses especialmente na região metropolitana de Belém, por constituir a base da alimentação cotidiana de sua população. A produção paraense cresce exponencialmente a cada ano. Em 2003, o estado produziu cerca de 112.676 toneladas de açaí, enquanto que em 2016 a quantidade produzida foi de 1.092.205 toneladas, quase dez vezes maior (IBGE, 2003-2016). Hoje o Pará é responsável pela produção de 95% de todo o açaí produzido em solo nacional, consumindo 60% da produção, exportando 35% para outros estados e 5% diretamente para o exterior, principalmente para os Estados Unidos (40% da exportação internacional). A produção do fruto em solo paraense chega a injetar US\$ 1,5 bilhões na economia do estado. A pluviosidade incidência solar são fatores determinantes para a produtividade do açaí, justamente presentes em abundância no estado do Pará, justificando sua alta produção comparada aos outros estados brasileiros. (Sauma, et al., 2019).

O Pará apresentou consumo per capita anual de 17,8 L de polpa, sendo que pessoas que ganhavam até um salário mínimo consumiam diariamente no período da safra do fruto (60,71%), e os consumidores que ganhavam de dois a quatro salários mínimos mantinham a frequência de consumir açaí de duas a três vezes por semana, alcançando um consumo familiar anual de 102,1 L de açaí (Bezerra, et al., 2016).

Esta produção em escala nacional e internacional que dispensa o emprego de máquinas complexas de elevado teor tecnológico, leva a popularização do plantio e colheita do fruto para áreas isoladas dos centros urbanos, dificultando a fiscalização pelos órgãos públicos nos quesitos de descarte correto dos resíduos de produção. Este fato ganha ainda maior relevância quando a parte comestível do açaí pode corresponder a mínimos 17% do fruto, sendo os 83% restantes composto pelo caroço.

Se faz necessário destacar diferenças entre “resíduo” e “rejeito”. Resíduo é qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede nos estados sólido ou semissólido. Já rejeitos são resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. Neste contexto, o caroço de açaí é um tipo de resíduo classificado quanto à origem, como resíduo de estabelecimento comerciais.

Atualmente, o conceito estabelecido pela Política Nacional de Resíduos Sólidos amplia o alcance do que pode ser considerado passível de reuso, e no que tange ao caroço de açaí após o despulpamento, este pode ser utilizado em diversas outras atividades para além da alimentação.

Existe um desafio referente à gestão da destinação final deste resíduo, uma vez que não existe uma política pública específica de gestão de resíduos sólidos para os municípios de interior, em especial para os caroços de açaí, considerando que se tratam de resíduos abundantes na região que requerem uma atenção especial por enquadrarem-se no reuso como insumo para atividades econômicas como por exemplo briquetes energéticos, peletes, fertilizante, dentre outras.

No entanto, é percebido uma ausência da governança ambiental direcionada a gestão dos caroços de açaí que deveriam visar sua destinação de forma adequada. Esta negligência gera problemas de caráter ambiental, econômico e financeiro além de alterar a paisagem natural, aumentar os problemas decorrentes de alagamentos e induzir a geração de pontos críticos de “lixo”.

Uma pesquisa realizada no município de Ananindeua no estado do Pará levantou os dados sobre a forma de descarte dos principais batedores de açaí cadastrados da região. Do total, 17% dos proprietários pagam para que carroceiros informais colem os caroços e

destinem em locais impróprios. A maior parte dos caroços gerados pelos estabelecimentos (71%) é coletada pelo serviço público de coleta domiciliar, sendo que alguns proprietários pagam diretamente aos funcionários da empresa terceirizada para realizar a coleta. Apenas 10% dos batedores de açaí realizam a coleta de forma adequada. A maioria dos proprietários disseram ter dúvidas sobre a legalização de descarte, mostrando-se interessados na regularização para destino próprio aos resíduos dos estabelecimentos. (Menezes, et al., 2018).



Figura 2-2: Descarte irregular de bigbags de caroços de açaí (Fonte: Menezes, 2018)

Um outro problema de industrialização e comercialização do açaí é sua característica altamente perecível. Entre a colheita e a confecção da polpa, o fruto não resiste por mais do que 72 horas. O mesmo acontece com o vinho de açaí, ainda que mantido sob refrigeração. Para sanar este problema, as indústrias da região submetem o suco concentrado à temperaturas de -22 a -25°C (Bacellar, et al., 2006).

2.3 Processo Produtivo

O processo produtivo da cadeia do açaí inicia-se com a colheita do fruto do açaizeiro. Tendo sido o fruto recolhido, faz-se a separação manual dos frutos do cacho, que são armazenados em cestos, paneiros, rasas ou caixas de plástico. Em seguida, os recipientes são transportados manualmente até o ponto de embarque, de onde barcos de pequeno e médio porte realizam o transporte até o centro de beneficiamento. Sendo os frutos do açaizeiro muito perecíveis, resistindo no máximo a 24 horas após a colheita, o tempo de transporte é de fundamental importância para o quesito logístico do processo produtivo.



Figura 2-3: Açai armazenado em cestos após colheita e separação manual (Fonte: Uol Notícias)

Chegando ao centro de beneficiamento, o açai é armazenado de forma a evitar esmagamentos, rompimento da casca e contaminação. O processo se inicia com a pré-lavagem, onde as matérias estranhas e impurezas (terra, pedras, insetos, etc.) presentes juntamente com o fruto são retiradas pela utilização de jatos de água. Em seguida o fruto é enxaguado em uma mesa de lavagem equipada com sistema de circulação de água. De posse do fruto limpo, ocorre a seleção manual em uma mesa de aço inox com tampo liso. De forma visual, são selecionados os frutos danificados e restos de matéria orgânica (gravetos e folhas) que não tenham sido retirados nas etapas de lavagem.

A etapa seguinte contempla a maceração, onde os frutos são depositados em recipientes com água à temperatura adequada. Neste momento há o amolecimento da casca e da polpa, com a finalidade de facilitar o processo de despulpamento. Neste procedimento, máquinas despulpadeiras separam a polpa (massa do fruto) do caroço, fibras e restos da casca.



Figura 2-4: Máquina despulpadeira de açai de fabricação Braesi (Fonte: Braesi)

A polpa é então homogeneizada sendo misturada para tornar-se um líquido de aspecto e sabor homogêneo, seguindo para o envasamento semiautomático em material plástico (polietileno linear), podendo ser submetido ou não a vácuo dependendo da duração de seu

transporte para o cliente final. Finalmente, o produto é congelado e estocado em câmara frigorífica à aproximadamente -25°C.

2.4 Biomassa

Assim como o petróleo, a biomassa é um hidrocarboneto que diferentemente dos combustíveis fósseis, conta com átomos de oxigênio em sua composição química. A presença deste elemento faz com que a biomassa demande menos oxigênio do ar, tornando-se um combustível menos poluente. Em contrapartida, este fato reduz a energia liberada no processo. Pode ser facilmente obtida através de resíduos florestais e procedimentos agrícolas, muitas vezes também sendo usada como adubos de plantações (Rendeiro, et al., 2008).

Aproximadamente 75% do uso das energias renováveis envolve o emprego da bioenergia, sendo mais da metade consistindo no uso tradicional de biomassa. Em 2015, a bioenergia foi responsável por 10% da energia consumida mundialmente, e sua fonte gerou 1,4% da geração mundial. Em 2018 a capacidade instalada de usinas que utilizam a biomassa sólida como fonte primária foi de 83 GW, 4,5% das fontes renováveis, um crescimento de 73% no período de 2010 a 2018.

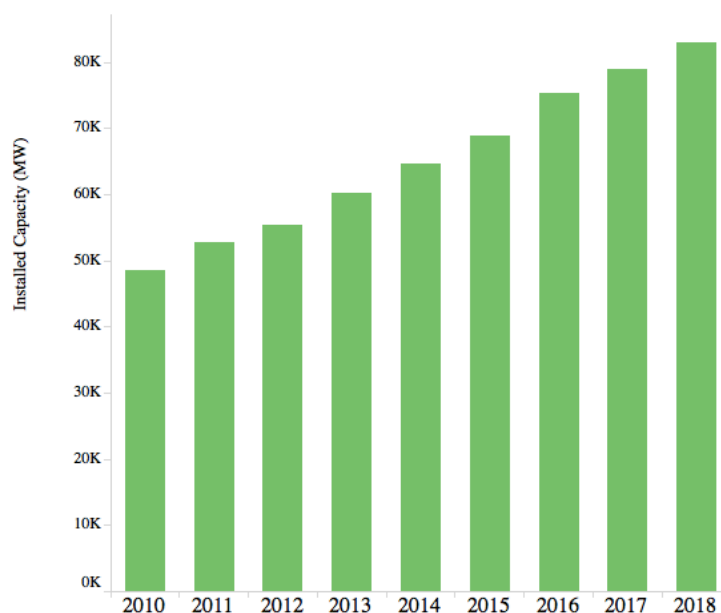


Figura 2-5: Capacidade Instalada de Usinas à Biomassa no mundo (Fonte: IRENA, 2019).

A biomassa tem um potencial significativo para alavancar o suprimento energético de países populosos como Brasil, Índia e China. Esta fonte pode ser queimada diretamente para finalidades de aquecimento ou indiretamente para geração de energia, através da sua

gaseificação para utilização de motores de combustão interna (International Renewable Energy Agency, 2019).

No Brasil, a energia gerada para o Sistema Interligado Nacional (SIN) pela biomassa foi suficiente para abastecer 12 milhões de residências ao longo de 2016, além de evitar a emissão de 10 milhões de toneladas de CO₂ (Accardo, 2018).

2.4.1 Teor de Umidade

O teor de umidade de uma biomassa possui grande importância para sua caracterização, e pode variar devido a uma série de fatores. Pode ser definido como a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa tanto na base úmida (ω_{bu}) quanto na base seca (ω_{bs}):

$$\omega_{bu} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{seca}} (\% bu)$$

$$\omega_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{seca}} (\% bs)$$

Onde m_{H_2O} é a massa de água contida na biomassa e m_{seca} é a massa de biomassa seca.

O teor de umidade das biomassas depende do seu histórico e proveniência. Por exemplo, biomassas originárias de produção agrícola possuem teor de umidade entre 15–30% bu. É importante notar que o poder calorífico da biomassa está intimamente ligado ao seu teor de umidade. Quanto menor seu teor de umidade, mais facilmente pode-se extrair energia através de sua gaseificação, aumentando a eficiência da queima para geração de energia.

2.4.2 Massa Específica

Deve-se deixar clara a distinção entre massa específica e massa específica aparente. Massa específica é a relação entre a massa contínua de biomassa pelo volume que essa massa contínua ocupa.

$$\rho = \frac{m_{bio}}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

O conceito de massa específica é aplicável somente se não há descontinuidades no preenchimento de volume por massa de matéria. Resíduos são repletos de descontinuidades, sendo mais aplicável o conceito de massa específica aparente.

Massa específica aparente é definida como a massa total de biomassa armazenada num volume, dividido pelo valor desse volume.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{granel}}{V} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Onde m_{granel} é a massa do montante de biomassa colocada aleatoriamente até encher o volume V.

Sendo assim, espera-se que a massa específica aparente seja sempre menor que a massa específica, pois os fragmentos amontoados deixam espaços vazios entre si, reduzindo a massa contida em um mesmo volume.

2.4.3 Densidade

Da mesma forma que são aplicadas para massa específica, existe também a densidade propriamente dita para a matéria sem descontinuidades e a densidade aparente para a matéria fragmentada. As densidades são adimensionais, pois são calculadas entre a razão da massa específica da biomassa em relação à da água à 25°C em 1 atmosfera (Rendeiro, et al., 2008).

$$d = \frac{\rho}{\rho_{H2O}}$$

$$d_{ap} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_{H2O}}$$

2.4.4 Velocidade Superficial

A velocidade superficial determina o desempenho de um reator de gaseificação sendo definida como a vazão volumétrica de gás produzido (m^3/s) dividido pela área da seção transversal do reator (m^2). O teor de alcatrão pode ser fruto de uma baixa velocidade superficial que causa pirólise lenta no gaseificador (Santos, 2011).

$$V_s = \frac{\dot{m}_{gas}}{A_{st}} [m/s]$$

2.4.5 Taxa de Consumo de Biomassa

A taxa de consumo de biomassa pode ser determinada através da multiplicação entre a velocidade de consumo de biomassa (m/s) e a densidade aparente (kg/m^3) (Santos, 2011).

$$\dot{m}_{cb} = V_{cb} \times \rho_{ap} \left[\frac{kg}{s \cdot m^2} \right]$$

2.4.6 Poder Calorífico Superior (PCS)

Poder Calorífico Superior é a energia interna por unidade de massa ou volume em um determinado combustível quando toda a água em fase líquida contida no mesmo e a água produzida durante sua combustão estão condensadas (Reis, et al., 2010).

2.4.7 Poder Calorífico Inferior (PCI)

Poder Calorífico Superior é a energia interna por unidade de massa ou volume em um determinado combustível quando toda a água em fase líquida contida no mesmo e a água produzida durante sua combustão são vaporizadas (Reis, et al., 2010).

2.5 Briquetagem

A briquetagem teve sua origem na Europa, ainda no início do século XX com objetivo de produzir um material com elevada energia associada por unidade de volume. Atualmente, praticamente todos os tipos de resíduos orgânicos (biomassa) podem ser reutilizados para a produção de energia, sendo a briquetagem uma técnica que está novamente sendo observada como uma ótima opção para a geração de energia através da biomassa.



Figura 2-6: Exemplos de briquetes energéticos (Fonte: EMBRAPA)

O processo de secagem da biomassa é uma das operações mais importantes a serem realizadas para uma boa efetividade de conversão de biomassa em briquetes energéticos, pois o valor ótimo de teor de umidade em base úmida para a fabricação dos briquetes é de 12% a 15%. Uma umidade mais elevada pode comprometer uma queima eficiente dos briquetes.

Após o silo de armazenagem, os resíduos são transferidos para um dosador, sendo briquetados em seguida. A briquetagem é realizada pela densificação através de elevadas pressões que provocam um aumento térmico da ordem de 100°C. A esta temperatura ocorre a plastificação das partículas pela lignina (macromolécula presente em plantas terrestres),

atuando como aglomerante. Os briquetes então assumem formas cilíndricas, possuindo dimensão ideal de 75 a 100 mm de diâmetro por 250 a 350 mm de comprimento.

A briquetagem feita através de prensa briquetadeira de pistão hidráulico acontece por meio de golpes produzidos sobre a biomassa por um pistão acionado hidráulicamente. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre e expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. O briquete deste processo tem densidade que pode variar entre 1.000 kg/m^3 a 1.300 kg/m^3 , poder calorífico inferior de 4.800 kcal/kg ($20,1 \text{ MJ/kg}$).

Diversos são os fabricantes de briquetadeiras de pistão hidráulico. O modelo BH100A da fabricante Lippel tem uma faixa de produção que pode variar entre $15 \text{ m}^3/\text{h}$ a $90 \text{ m}^3/\text{h}$, produzindo briquetes de 76 mm de diâmetro, variando seu comprimento para diferentes pressões aplicadas. A briquetadeira pesa cerca de 800 kg, e trabalha com motor de potência de 7,5 kW (10 cv) (Lippel, 2019).



Figura 2-7: Briquetadeira Hidráulica de Pistão da fabricante Lippel, modelo BH100A (Fonte: Lippel)

A briquetagem também pode ser feita através da extrusão de biomassa, obtendo-se um produto com até 5% de umidade em base úmida. Nesta forma de briquetagem a matéria prima é conduzida à uma matriz sofrendo intenso atrito e em câmara de pré-compressão, atingindo temperaturas acima de 250°C , fluidificando-a, dispensando o uso de aglomerantes artificiais. Posteriormente, o produto é submetido a elevadas pressões que tem por objetivo atingir a compactação desejada. No final do processo, o produto é naturalmente resfriado, solidificando-se e resultando em um briquete com elevada resistência mecânica. A lignina solidificada na superfície do briquete funciona como um tipo de blindagem contra umidade, apresentando

densidade que varia entre 1.200 kg/m³ a 1.400 kg/m³ e poder calorífico inferior de 4.900 kcal/kg (20,5 MJ/kg) (Reis, et al., 2010).

A marca Lippel também fabrica briquetadeiras utilizando o princípio de extrusão contínua promovida por rosca sem-fim, obtendo um briquete homogêneo de elevada densidade e resistência mecânica. Contando com uma capacidade de produção bem mais elevada quando comparada à briquetadeira de pistão hidráulico, de 150 m³/h a 400 m³/h, utiliza motor de 23 kW (30 cv) à diesel em rotação de 1800 rpm (Lippel, 2019).



Figura 2-8: Briquetadeira de Extrusão por Parafuso da fabricante Lippel, modelo BEP 300 (Fonte: Lippel)

A briquetagem é uma boa alternativa para se produzir combustíveis de forma mais econômica e sustentável, dispensando a utilização de combustíveis líquidos como a gasolina e o diesel para a geração termelétrica em determinadas aplicações. O transporte destes combustíveis é complexo, e mesmo que sua logística esteja instaurada na Região Norte, são altamente visados estando sujeitos a constantes furtos em rotas pouco movimentadas, enquanto os caroços de açaí são resíduos da produção agrícola de um dos frutos mais comercializados da região. Além disso, o processo de refino dos combustíveis líquidos requer uma operação especializada de elevado teor químico, enquanto a briquetagem se mostra uma alternativa de baixo custo e complexidade. Em compensação, seu poder calorífico é razoavelmente inferior quando comparado ao diesel (aprox. 43,2 MJ/kg)¹ e à gasolina (aprox. 40,2 MJ/kg)².

2.6 Ciclos Termodinâmicos

¹ Densidade do óleo diesel em condições ISO de 0,83 kg/l.

² Densidade da gasolina em condições ISO de 0,77 kg/l.

2.6.1 Ciclo Otto

O Ciclo Otto é o ciclo que se aproxima do motor de combustão interna de ignição por centelha, que pode usar combustíveis como a gasolina e o gás natural.

O ciclo se inicia com a admissão da mistura ar-combustível quando o pistão se move do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI). A segunda etapa do ciclo é definida pela compressão isentrópica da mistura ar-combustível quando o pistão se move do PMI para o PMS. O calor de ignição da centelha é transferido para o ar, a volume constante, enquanto o pistão está momentaneamente em repouso no ponto morto, ocorrendo a queima subsequente.

A etapa seguinte é constituída pela expansão isentrópica, responsável pela geração de energia que é transferida ao eixo de virabrequim. A última etapa é a exaustão dos gases produzidos durante a queima na etapa de explosão, reiniciando o Ciclo Otto.

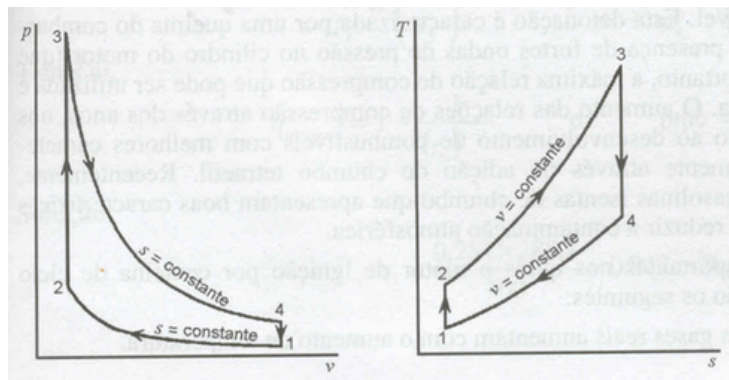


Figura 2-9: Diagramas $P \times v$ e $T \times s$ do Ciclo Padrão Otto (Van-Wylen, et al., 2003)

Admitindo que o calor específico da mistura ar-combustível é constante, determina-se o rendimento térmico do Ciclo Otto da seguinte maneira:

$$\eta_{\text{térmico}} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{(r_v)^{k-1}}$$

Onde:

- Q_H o calor recebido pelo sistema
- Q_L o calor cedido pelo sistema
- T_1 a temperatura da mistura no PMI na compressão
- T_2 a temperatura da mistura no PMS na compressão
- r_v a razão de compressão do cilindro

- k a relação entre os calores específicos à pressão constante e à volume constante (Van-Wylen, et al., 2003)

2.6.2 Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor

O Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor é essencialmente um ciclo Rankine inverso, substituindo-se a turbina por uma válvula de expansão. Opera com fluidos de trabalho que mudam de fase durante o ciclo, sendo sua escolha de grande importância para o correto funcionamento do mesmo.

O ciclo inicia-se com a compressão do fluido de trabalho em sua fase de vapor, atingindo as maiores temperaturas e pressões do ciclo. Em seguida o fluido segue para o condensador, onde o sistema cede o calor da compressão assumindo a fase líquida. A válvula de expansão funciona como uma perda de carga localizada para redução de pressão abrupta, tornando-se uma mistura bifásica líquida-vapor, além da redução de temperatura pelo efeito Joule-Thomson. O fluido é então conduzido para o evaporador, onde o sistema recebe calor assumindo novamente a fase de vapor, e assim reiniciando o ciclo no compressor.

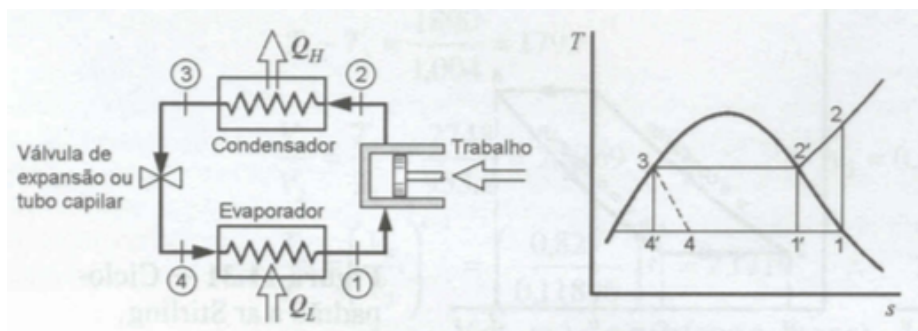


Figura 2-10: Diagrama $T \times s$ para um Ciclo de Refrigeração por Compressão de Vapor (Van-Wylen, et al., 2003)

A finalidade do ciclo de refrigeração é a transferência de calor Q_L , e através de uma medida de desempenho é possível averiguar a eficácia desta transferência relacionando-a com o trabalho necessário para comprimir o vapor no compressor:

$$COP = \frac{Q_L}{|W_c|}$$

É importante notar também que a determinação e caracterização das fontes frias e quentes dita se o ciclo é de refrigeração ou de uma bomba de calor, variando o foco do sistema de Q_L para Q_H . Seu coeficiente de desempenho pode ser igualmente determinado substituindo o numerador por Q_H (Van-Wylen, et al., 2003).

2.7 Conversão Termoquímica de Biomassa

A conversão termoquímica de biomassa é apenas uma das formas de conversão de biomassa em energia, sendo as outras físico-química e bioquímica. A conversão termoquímica inclui os processos de combustão, gaseificação e pirólise para que possam ser obtidos calor, combustíveis gasosos e combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, respectivamente. Os combustíveis líquidos e gasosos possuem um maior interesse econômico dado seu elevado teor energético, podendo substituir combustíveis de maior poder calorífico em aplicações como geração de energia e transporte.

Uma das vantagens da conversão termoquímica com relação à físico-química e a bioquímica é a sua diversidade de matéria-prima, constituindo uma gama de resíduos agrícolas e florestais. Seus gases podem ser convertidos em combustíveis e produtos químicos como substitutos de produtos químicos à base de petróleo (óleo diesel e gasolina, por exemplo).

São três os principais métodos de conversão termoquímica com aplicações em biomassa: pirólise, combustão e gaseificação.

2.7.1 Pirólise

A pirólise é uma forma de degradação da biomassa utilizando uma fonte quente externa na ausência de um agente oxidante. Gera produtos em três fases distintas: sólida, líquida e gasosa. Seu condensado em pirólise rápida possui alto teor de alcatrão, corrosivo em aplicações de máquinas térmicas, de elevado peso molecular. A fração sólida é composta por carbono e cinzas e a fração gasosa é o combustível de interesse neste estudo, sendo composto por H_2 , CO , CO_2 , CH_4 e outros hidrocarbonetos.

Os produtos do processo de pirólise dependem das condições na qual é realizada, como temperatura, taxa de aquecimento, tempo de reação, características da biomassa, entre outros. A conversão prévia da biomassa em um líquido através da pirólise é um artifício que facilita a obtenção de gás de síntese através da fonte renovável, demandando menores capacidades dos seus gaseificadores, onde suas tecnologias são menos maduras, obtendo maiores aplicações mais recentemente (Fiuza, 2019).

2.7.2 Combustão

A combustão é a conversão termoquímica na presença do ar de menor complexidade, sendo a mais direta e tecnicamente a mais simples. Porém, sua eficiência geral para geração de calor e potência é relativamente baixa, variando em uma faixa de 20% a 40%. Consiste em uma série de reações consecutivas, sendo elas heterogêneas e homogêneas. A combustão depende

das características de sua matéria prima e essencialmente do tamanho das partículas da matéria-prima, temperatura do processo e a porcentagem de oxigênio no ar.

Para a maximização da eficiência da combustão, deve-se ter ar em abundância e elevadas temperaturas para que a queima seja realizada de forma completa. Por outro lado, maiores serão as emissões de NO_x e CO_2 , tornando esta conversão termoquímica desafiadora no sentido ambiental. O que favorece a combustão no que diz respeito à gaseificação são os avanços tecnológicos de uma tecnologia já muito madura, sendo praticada desde quando se descobriu o fogo. Sua simplicidade também acarreta em menores custos de aplicação quando comparada a outras formas de conversão termoquímica (Fiuza, 2019).

2.7.3 Gaseificação

A gaseificação é uma conversão termoquímica de biomassa em uma mistura composta por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2), metano (CH_4) e outros hidrocarbonetos, chamada de syngas (*synthetic gas*) em um ambiente de redução, isto é, sem a presença de oxigênio. A gaseificação de biomassa reduz a razão carbono/hidrogênio resultando no aumento do poder calorífico, devido ao aumento da fração de H_2 (Fiuza, 2019).

Ocorrendo em uma faixa de temperatura de 800°C a 1200°C, as condições de temperatura, presença de oxigênio e teor de umidade da biomassa e suas características são significativos nos produtos da gaseificação e suas quantidades. Por esta razão, a seleção do gaseificador é fundamental para o regime de operação desejado e para que a composição do syngas seja a demandada, obtendo-se a maior eficiência possível no processo (Lora, et al., 2012).

Sendo assim, o syngas pode ser introduzido em motores de combustão interna ou em turbinas, depois do devido tratamento contra contaminantes. As partículas finas no gás são geralmente eliminadas pela promoção de ciclones ao final da gaseificação. A conversão termoquímica por gaseificação pode ser dividida em três macroprocessos: processo *upstream*, gaseificação e processo *downstream* (Kumar, et al., 2009).

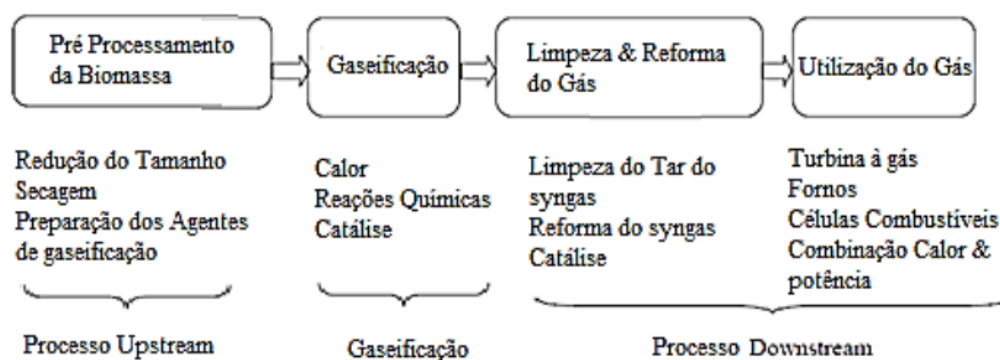


Figura 2-11: Procedimento de conversão termoquímica de biomassa por gaseificação

O processo *upstream* consiste em todas as atividades necessárias para a preparação da biomassa antes de ser introduzida no gaseificador, como redução de tamanho, pré-aquecimento, secagem e preparação dos agentes de gaseificação. Em seguida existe a gaseificação, onde a matéria-prima sofrerá uma série de reações químicas, catálise e receberá calor. Finalmente, o processo *downstream* é constituído pela reforma e limpeza do syngas através da remoção de alcatrões e compostos alcalinos, e da utilização do mesmo em inúmeras aplicações, como turbinas, motores de combustão interna, células combustíveis, fornos e etc (Lora, et al., 2012).

Os reatores de gaseificação podem ser classificados em diferentes tipos com relação ao transporte de fluidos ou sólidos através do reator. Os mais utilizados comercialmente são os gaseificadores de leito fixo, os gaseificadores de leito fluidizado e os gaseificadores de fluxo arrastados. O gaseificador de leito fixo pode ser caracterizado pela direção na qual o combustível e o agente gaseificador são introduzidos, sendo *updraft* (contracorrente) ou *downdraft* (cocorrente). Os reatores de leito vertical são amplamente utilizados pois possuem operação simplificada e fácil construção, sendo eficientes quando adotados combustíveis de elevada densidade e granulometria grosseira. Estes reatores têm aplicação em plantas de geração de pequeno e médio porte para recuperação de energia térmica de biomassas (Fiuza, 2019).

O tipo mais simples de gaseificador é o *updraft* (contracorrente), de fácil operação e elevada eficiência de conversão energética. Por outro lado, produz altas quantidades de alcatrão. A alimentação de material sólido é feita pela parte superior do gaseificador, que desce pela ação da força gravitacional, sendo consumida durante o processo. A entrada de ar é localizada na parte inferior do equipamento, como pode ser visto na figura abaixo.

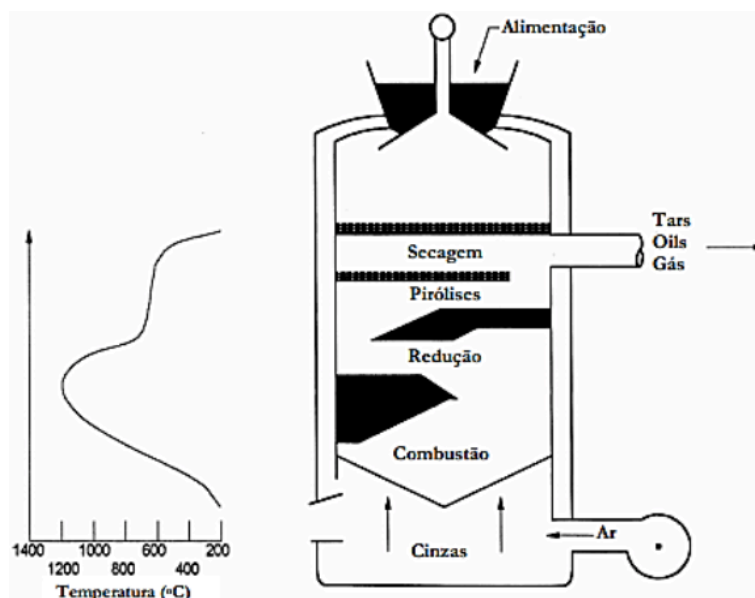


Figura 2-12: Desenho esquemático de um gaseificador *updraft* (Fiuza, 2019)

O combustível e o ar se movem em sentidos opostos, dando o nome ao gaseificador de contracorrente. A biomassa passa por uma zona de secagem para redução de seu teor de umidade, seguindo para a zona de pirólise sofrendo decomposição sendo então convertida em gases voláteis e carvão sólido que são transformados em CO e H_2 quando passam finalmente pela zona de redução. O calor é gerado pela queima do carvão decantado no fundo do reator, responsável por manter a temperatura dos processos de pirólise e secagem. Sua combustão também produz CO_2 e H_2O . Como dito anteriormente, o produto resultante do gás tem um alto teor de alcatrão pois o composto não tem a oportunidade de passar através da zona de combustão. Os gaseificadores *updraft* aceitam biomassa com teor de umidade relativamente alto, até 60% em base úmida (Fiuza, 2019).

Nos reatores de gaseificação *downdraft* (cocorrente) a alimentação também é feita através da parte superior do gaseificador, enquanto o elemento oxidante é introduzido a partir das laterais ou da parte superior. A principal diferença em relação aos reatores *updraft* é a ocorrência da combustão antes da redução, onde o alcatrão tem a oportunidade de uma melhor oxidação. Isto gera a corrente unidirecional de baixo para cima, como mostrado na figura abaixo (Fiuza, 2019).

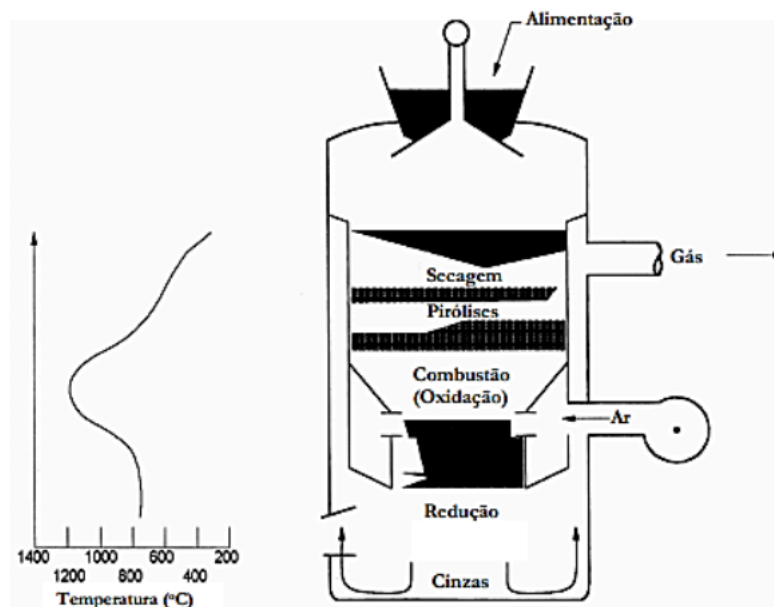


Figura 2-13: Desenho esquemático de um gaseificador downdraft (Fiuza, 2019)

A biomassa passa pelas zonas de secagem e pirólise, seguindo diretamente para a zona de combustão (oxidação). Isto faz com que o carvão no fundo do reator encontre o agente gaseificador primeiro, completando a sua combustão, produzindo H_2O e CO_2 e elevando a temperatura para aproximadamente $1000^{\circ}C$. Os gases secam e promovem a pirólise da biomassa que está descendo. Como consequência da configuração do gaseificador *downdraft*, vapores de pirólise permitem uma maior eficiência do craqueamento térmico do alcatrão (Baruah, 2013).

Independente do tipo de reator de gaseificação adotado, é necessária a limpeza do gás sintético produzido a partir da biomassa introduzida. As diferentes impurezas encontradas no syngas tem relação com a temperatura de gaseificação, o tipo de gaseificador e a biomassa utilizada. A tabela abaixo mostra as possíveis impurezas que podem ser encontradas no gás produzido por gaseificação de biomassa, e suas formas e mitigar os efeitos danosos que podem causar seja ao motor a combustão interna a ser utilizado posteriormente ou ao meio ambiente (Fiuza, 2019).

Tabela 1: Mecanismos de mitigação de impurezas no syngas

Impurezas	Fontes	Possíveis Problemas	Mecanismos de Controle e/ou Mitigação
Particulados	Cinza, Carbono, Material do Leito	Erosão, aglomeração e Incrustação, e poluição ambiental	Filtragem, Lavagem do Gás
Metais Alcalinos (sódio e/ou potássio nas cinzas)	Cinzas	Corrosão	Resfriamento, Condensação, Filtragem, Adsorção
Compostos nitrogenados (NO_x , NH_3 , HCN)	Reação do nitrogênio do ar e do combustível	Corrosão, poluição ambiental	Tratamento com substâncias de caráter básico, utilização de oxigênio puro no processo
Compostos de Enxofre e Cloro (HCl , H_2S)	Reação do Enxofre e do Cloro presente no Combustível		Lavagem, captura com CaCO_3 , MgCO_3
Alcatrão (mistura complexa de hidrocarbonetos)	Baixa temperatura no processo, quantidade considerável de voláteis no combustível	Corrosão, Aglomeração e Incrustação, efeitos sobre a saúde	Remoção, craqueamento

Existem diversas formas de remoção de particulados do gás produzido à partir de gaseificação de biomassa. O gráfico abaixo compara a eficiência de cada processo e sua aplicação em função do tamanho de partícula a ser removida (Andrade, 2007).

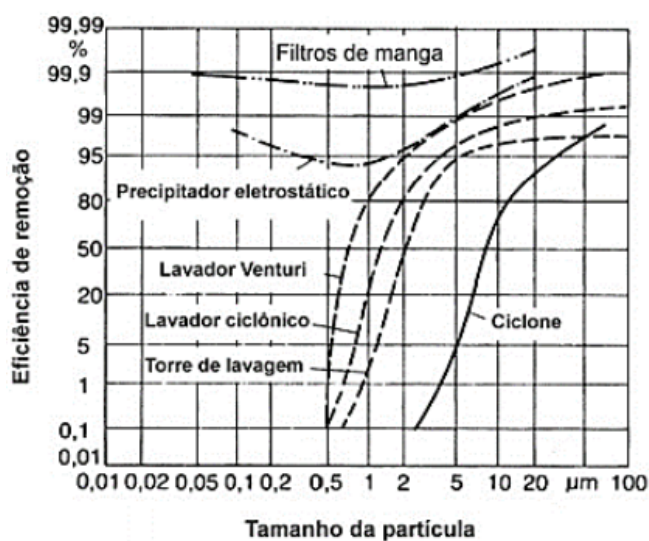


Figura 2-14: Eficiência dos procedimentos de remoção de particulados do syngas em função do tamanho de partícula

2.8 Motor a Combustão Interna

O motor a combustão interna (MCI) é um exemplo de máquina térmica que converte a energia química da combustão em energia mecânica, gerando trabalho através da queima da mistura ar e combustível. Nos motores que adotam o sistema pistão-cilindro, para cada cilindro existe pelo menos um orifício para entrada de ar ou ar e combustível, e pelo menos um orifício para a saída dos gases produzidos durante a combustão. A abertura e fechamento destes orifícios é realizada pelo eixo de cames, que é parametrizado para realizar os movimentos nos momentos exatos.

São máquinas térmicas que convertem o movimento alternativo dos pistões em movimento rotativo, transferindo o trabalho gerado ao eixo virabrequim através das bielas acopladas aos pistões. O virabrequim por sua vez está acoplado ao volante do motor, por onde passa uma correia responsável por transferir a potência para os subsistemas, como por exemplo o eixo de cunes e o alternador.

Como qualquer outra máquina térmica, o motor de combustão interna precisa dissipar o calor gerado por diversas formas. O próprio óleo lubrificante, além de ser responsável por reduzir o atrito entre superfícies também pode assumir função de arrefecimento em alguns casos. A água é utilizada para o resfriamento do motor, muitas vezes aditivada para ampliar sua temperatura de operação além da temperatura de ebulição.

O sistema de combustível é composto pelo tanque de armazenamento e linhas por onde o combustível é conduzido até o cilindro, passando por filtros e bombas para mantê-lo pressurizado e livre de impurezas que possam prejudicar o rendimento do motor ou da queima.

O motor também é dotado do sistema de medições, controle de válvulas e atuadores. De grande importância, é composto por válvulas de controle, medidores analógicos e digitais que transmitem informações como a temperatura e pressão de operação, nível do óleo e combustível, velocidade de rotação, entre outros.



Figura 2-15: Motor de ignição por centelha a gás modelo 4006-23TRS da fabricante Perkins (Perkins, 2019)

2.9 Plantas de Dessalinização

A dessalinização é um processo físico-químico, que por meio de um dessalinizador, existe a retirada de 95 a 98% dos sais minerais existentes na água, deixando-a potável com um teor de sais reduzidos, pronta para o consumo da população (Villes, et al., 2019).

Entende-se como planta dessalinizadora de água do mar toda aquela que é capaz de reduzir o conteúdo de sais da ordem de 35.000 ppm ou 3,5% em peso para 2.000 ppm ou 0,2% de sais apta para o consumo humano, de animais e agricultura. Qualquer método de dessalinização usa energia para efetuar a separação dos sais, sendo um dos parâmetros mais importantes de uma planta dessalinizadora (Hunter, 1981).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), a água que possui concentrações de sais minerais inferior a 1 g/L é própria para o consumo humano. A água salgada não deve ser ingerida pelo ser humano pois esta pode causar desidratação, sendo também contraindicada para utilização em indústrias e na agricultura pois pode reduzir significativamente a vida útil dos equipamentos, afetando também as plantações cultivadas (Villes, et al., 2019).

Na teoria, a energia mínima requerida para dessalinizar um metro cúbico de água à temperatura ambiente mediante qualquer processo reversível é de 0,7 kWh (2,52 kJ/kg). Porém, os valores práticos passam facilmente de 300 kJ/kg devido a irreversibilidades como fricção, diferenças de temperatura e impurezas presentes na água. Os processos podem ser separados em duas grandes categorias, dependendo da fonte de energia utilizada: os processos que usam calor, sendo eles Destilação por Múltiplo Efeito e Destilação “Multi-Flash”; e os processos que usam a eletricidade, sendo eles a Eletrodiálise, Compressão de Vapor, Congelamento, Osmose Reversa e Resinas de Troca Iônica (Hunter, 1981).

Dos processos térmicos, mais de 60% da água dessalinizada do mundo é produzida a partir do calor para destilar água do mar e lagos para-se obter água doce. Para se obter viabilidade econômica, as plantas de dessalinização podem trabalhar em diversos estágios, cada um com menores temperaturas e pressões de operação. Vários meios tais como a queima de combustíveis fósseis, água aquecida através da energia solar, ou mesmo de rejeitos térmicos podem ser usados para fornecer calor para a destilação (Souza, 2002).

Na destilação, a troca de calor entre a água e a fonte quente é essencial, sendo que o fator que determina o porte de uma unidade de destilação é a taxa de transferência de calor. Quanto maior o coeficiente global de transferência de calor, mais eficiente será o fluxo de energia, sendo possível reduzir a área de troca térmica significando instalações de menor porte, e assim mais econômicas. Usualmente são utilizados trocadores de calor (Souza, 2002).

$$\dot{Q} = UA\Delta T$$

Um parâmetro que merece atenção especial para o dimensionamento de uma central dessalinizadora é o controle de crostas e impurezas nos trocadores de calor. A água do mar é constituída por uma mistura complexa entre sólidos dissolvidos, vida marinha e gases. Os sólidos dissolvidos são os responsáveis pela deposição de matéria na superfície dos tubos de aquecimento, formando uma crosta que se transforma em uma camada de isolamento. Em condições mais severas, pode reduzir significativamente a efetividade de troca térmica e o coeficiente global de troca térmica, baixando a eficiência geral do processo (Souza, 2002).

Para reduzir este impacto na planta de dessalinização, a água marinha deve passar por uma série de estágios de tratamento para que todas as substâncias e particulados sejam removidos evitando a perda de eficiência em longo prazo dos equipamentos. As substâncias mais comuns na formação da crosta são o sulfato de cálcio, hidróxido de magnésio e carbonato de cálcio. O controle de pH e o processo chamado de descarbonatação impede a formação de crosta a partir do hidróxido de magnésio e carbonato de cálcio, enquanto o sulfato de cálcio não apresenta ameaças aos equipamentos quando a dessalinização for realizada em temperaturas inferiores a 95°C no caso de plantas de elevada eficiência. Organismos marinhos e microbactérias podem ser facilmente removidas da mistura pela adição de cloro à mistura.

Uma planta de dessalinização também possui uma temperatura máxima de operação para não danificar seus equipamentos. Esta temperatura é determinada em função da volatilidade dos componentes do soluto, quando as incrustações começam a ser formadas podendo ocorrer corrosão no interior dos tubos.

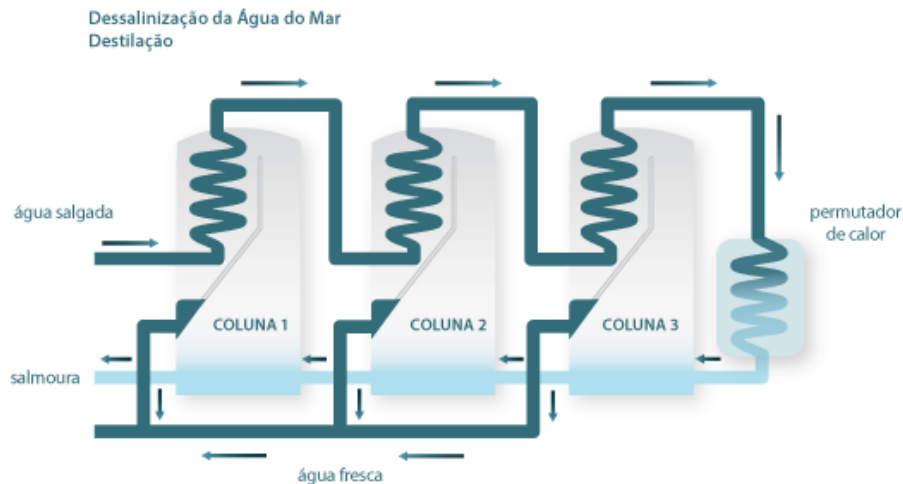


Figura 2-16: Dessalinização por destilação multi-estágio

Dos processos indicados em função da fonte de energia, serão descartados aqueles que utilizam a eletricidade, e considerados para análise os que utilizam o *waste heat* das máquinas térmicas empregadas neste trabalho.

Como uma aproximação, o consumo específico (energia consumida por quilograma de água produzida) é fixado, para que a produção da água destilada para uma dada área de transferência de calor dependa da diferença de temperatura entre a água de alimentação e a temperatura do vapor e o coeficiente global de transferência de calor.

A água pode ser dessalinizada na mesma planta que gera a energia elétrica, em que a escolha dos parâmetros de operação pode variar de acordo com a escala de operação, mercado disponível para a potência elétrica e água destilada. Plantas de geração de energia utilizando máquinas térmicas são uma excelente oportunidade para a dessalinização da água quando esta está próxima de águas de baixa qualidade e existe a necessidade de tratamento, já que existe calor residual no processo de conversão da energia térmica em energia elétrica, seja nos motogeradores ou turbogeradores.

Um dos vários tipos de energia disponível nos gases de escape de motores a combustão que devem ser reaproveitados são a energia térmica, cinética e a pressão dos gases exauridos após a queima na câmara de combustão, onde a temperatura da mistura ainda é elevada podendo ser reaproveitada para aquecimento ou vaporização.

O projeto de um sistema de recuperação de calor para a utilização da energia térmica dos gases de escape de um motor não é trivial, dado que a obstrução da saída de gases também

afeta a performance do motor. Os equipamentos utilizados no projeto são evaporador, condensador à água e tanques de armazenamento de água salgada e água potável.

A disponibilidade de energia nos gases de escape varia com a capacidade, rotação e carga do motor. No caso de motores funcionando em rotação constante, a energia reaproveitável varia apenas com a carga aplicada sobre o motor. A extração máxima de energia é calculada em laboratórios onde são testados uma série de cargas aplicáveis nas mais variadas condições. Resultados mostram que as maiores quantidades e a temperaturas dos gases são observadas quando maiores cargas são aplicadas ao motor, em uma razão de 25% a 35% de quantidade e temperatura para cada 25% de aumento de carga.

Os gases quentes do motor são conduzidos para dentro do evaporador, trocando calor com a água salgada presente dentro dele. O vapor oriundo da água salgada é então introduzido no condensador, que utiliza a própria água do mar como fonte fria para a troca térmica, sendo condensado e estocado em um tanque de armazenamento de água doce. Esta água se torna potável após a adição de sais minerais segundo recomendações da Organização Mundial da Saúde.

O evaporador precisa de um espaço um pouco maior para que a água seja evaporada à pressão atmosférica. Um trocador de calor de casco e tubo é utilizado, cujos tubos com os gases quentes passam pela parte inferior do casco para estarem em contato direto com a água a ser evaporada, e o vapor saturado é coletado pela parte superior do casco. O calor fornecido pelos gases de escape pode ser determinado através da equação a seguir:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g c_{pg} (T_{gi} - T_{go})$$

Onde:

\dot{m}_g : vazão mássica de gases

c_{pg} : calor específico do gás

T_{gi} : temperatura de entrada do gás

T_{go} : temperatura de saída do gás

Para a destilação da água do mar são necessários os calores sensíveis e latentes. Para evaporar a água à pressão atmosférica, a energia térmica requerida é:

$$\dot{Q}_{req} = \dot{m}_{sw} c_{psw} \Delta T + \dot{m}_{sw} L_{sw}$$

Aplicando a primeira lei da termodinâmica onde a energia térmica dos gases é transferida para a água salgada, tem-se:

$$\dot{Q}_{req} = \dot{Q}_g$$

Baseado na estimação da energia transferida no balanço acima, a área de troca térmica e o número de tubos pode ser calculado a seguir:

$$\dot{Q}_{req} = U_e A_e \Delta T_{ml}$$

Para se obter o coeficiente global de troca térmica do evaporador U_e , a expressão deve ser utilizada:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{1}{\alpha_{ie}} + Rf_{ie} + \frac{r_{ie}}{k} \ln \left(\frac{r_{oe}}{r_{ie}} \right) + \left(\frac{r_{ie}}{r_{oe}} \right) Rf_{oe} + \left(\frac{r_{ie}}{r_{oe}} \right) \left(\frac{1}{\alpha_{oe}} \right)$$

Onde:

α_{ie}, α_{oe} : coeficiente troca térmica por convecção dentro e fora dos tubos do evaporador;

Rf_{ie}, Rf_{oe} : fator sujeira dentro e fora dos tubos do evaporador;

r_{ie}, r_{oe} : raio interno e externo dos tubos do evaporador;

k : condução térmica do material dos tubos.

Sendo assim, a área do evaporador é calculada através da equação de A_e e o número de tubos N_{te} determinado a seguir:

$$A_e = \frac{\dot{Q}_g}{U_e (T_g - T_b)} = \pi D_{te} L_{te} N_{te}$$

$$N_{te} = \frac{A_e}{\pi D_{te} L_{te}}$$

Onde:

T_g : temperatura dos gases;

T_b : temperatura de evaporação da água;

D_{te} : diâmetro dos tubos do evaporador;

L_{te} : comprimento dos tubos do evaporador;

N_{te} : número de tubos do evaporador.

Já para o condensador, a carga térmica a qual está sujeito é denotada por \dot{Q}_c , e desprezando as perdas no processo, o calor liberado pelo vapor será igual ao calor absorvido pela água salgada:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_{fg} - h_f)$$

$$\dot{m}_v L_v = \dot{m}_d c_{pd} \Delta T_d + \dot{m}_{sw} c_{psw} \Delta T_{sw}$$

Onde:

\dot{m}_v : vazão mássica de vapor;

\dot{m}_d : vazão mássica da água destilada;

\dot{m}_{sw} : vazão mássica de água salgada.

Considerando o condensador um trocador de calor do tipo casco e tubo com um passe de dois tubos, a taxa de troca térmica é determinada por \dot{Q}_c e o coeficiente global de troca térmica no condensador U_c pode ser determinado a partir da expressão a seguir:

$$\dot{Q}_c = U_c A_c \Delta T_{lm}$$

$$A_c = \frac{\dot{Q}_c}{U_c \Delta T_{lm}} = \pi D_{tc} L_{tc} N_{tc}$$

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{\alpha_{ic}} + R_{f_{ic}} + \frac{r_{ic}}{k} \ln \left(\frac{r_{oc}}{r_{ic}} \right) + \left(\frac{r_{ic}}{r_{oc}} \right) R_{f_{oc}} + \left(\frac{r_{ic}}{r_{oc}} \right) \left(\frac{1}{\alpha_{oc}} \right)$$

A partir do comprimento do tubo, o número de passes é calculado, e então determinado o diâmetro do casco do condensador.

Baseadas nestas equações é possível obter uma aproximação considerável para as dimensões do trocador de calor a ser utilizado para fazer o processo de dessalinização da água do mar utilizando os gases de escape do motor de combustão interna.

3 Caracterização da Área de Estudo

A ilha das Cinzas fica localizada em Gurupá/PA, município que se estende por 8.540 km² possuindo população total de 33.376 habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019). As relações comerciais da ilha estão mais voltadas para o Amapá devido a proximidade da região. A região das ilhas do estuário do Rio Amazonas integra o Arquipélago

de Marajó, onde diversas comunidades ribeirinhas vivem em isolamento desenvolvendo suas atividades responsáveis pela sobrevivência da população (Ribeiro, 2017).

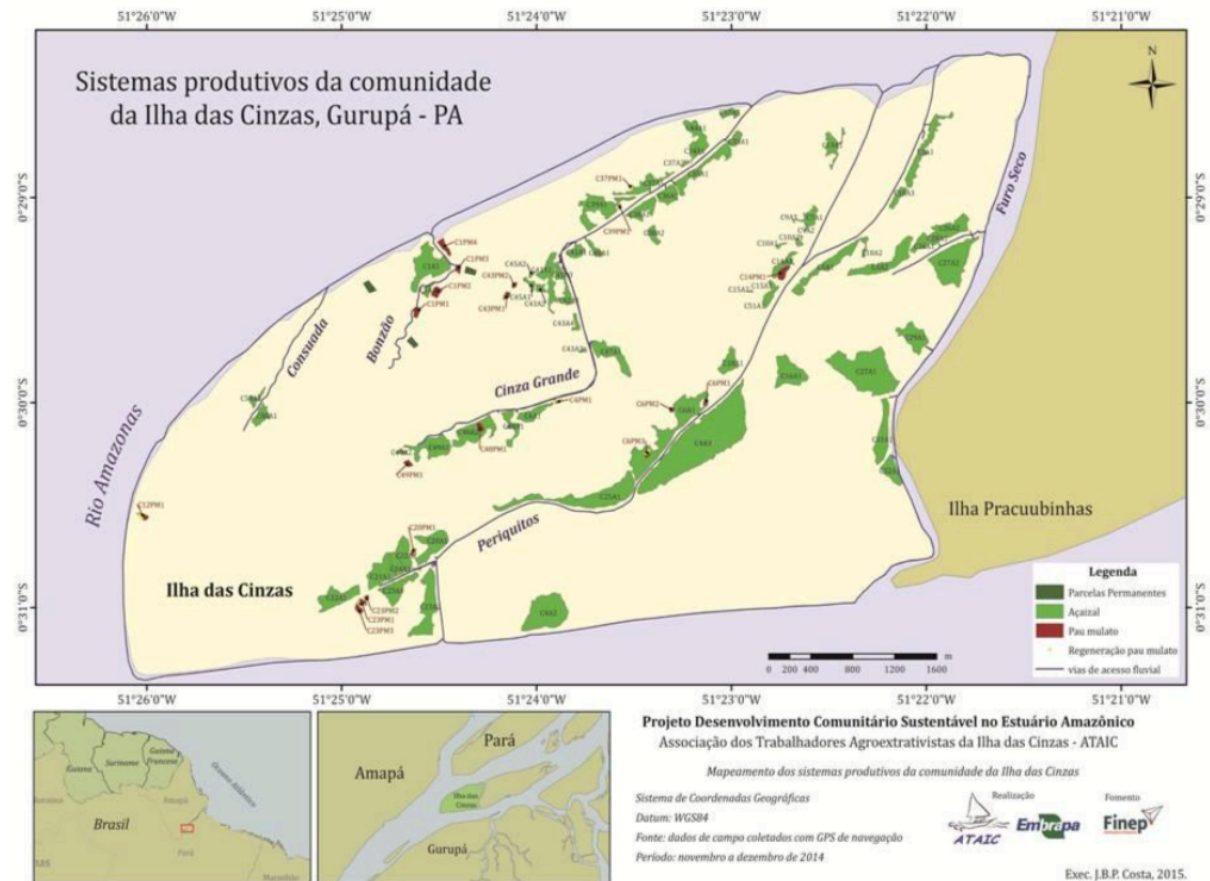


Figura 3-1: Mapa da Ilha das Cinzas e sua localização no estado do Pará (Ribeiro, 2017)

A vegetação que cobre a região é classificada como Floresta Ombrófila Densa Aluvial, apresentando uma grande abundância de palmeiras. O açazeiro é muito presente na ilha sendo favorecido pelas condições ambientais ideias de temperatura, umidade de índice pluviométrico da região. São observados maiores índices de chuva entre os meses de janeiro e junho e menor precipitação entre os meses de julho a dezembro (Ribeiro, 2017).

A economia local é fundamentada na extração de frutos e palmito de açazeiros, de sementes de espécies oleaginosas, pesca e produção de madeira para suportar a demanda de construção local (Ribeiro, 2017).

Os açaisais (marcados em verde na figura acima), são responsáveis por grande parte da área de plantio disponível na ilha. As áreas cobertas podem variar significativamente. Foram observadas 22 plantações que variam de zero a 1 hectare, 35 de 1 a 5 hectares, 7 de 5 a 10 hectares e 6 de mais de 10 hectares de área coberta por açazeiros (Ribeiro, 2017).

Na ilha, poucos são os açazeiros com áreas médias e grandes. Grande parte das famílias responsáveis pelo plantio dispõem apenas da mão de obra familiar, não tendo condições para operar com grandes áreas de produção (Ribeiro, 2017).

Um estudo desenvolvido por Ribeiro, 2017 foi responsável por realizar um monitoramento da produção de açaí na Ilha das Cinzas através da distribuição de calendários personalizados durante o período de julho de 2015 a junho de 2016. Do total de calendários distribuídos às 50 famílias produtoras da Ilha, 76% dos calendários foram aproveitados (Ribeiro, 2017).

Tabela 2: Produção mensal de frutos in natura de açaí das famílias ribeirinhas da Ilha das Cinzas (Ribeiro, 2017)

Ano	Mês	Valor Máximo (rasas)	Valor Médio (rasas)	Valor Mínimo (rasas)
2015	Julho	784	103	15
	Agosto	733	127	3
	Setembro	368	92	2
	Outubro	165	32	1
	Novembro	414	31	3
	Dezembro	90	27	3
2016	Janeiro	80	18	4
	Fevereiro	53	12	1
	Março	71	13	1
	Abril	74	15	1
	Maio	97	33	6
	Junho	262	78	10

Rasas são uma medida adotada pelas famílias produtoras de açaí, onde uma saca de 54 kg é constituída por 4 rasas de açaí. Durante o monitoramento do fruto, observou-se que o teor médio de polpa foi de 21% e de caroço de 79%, e um teor de umidade em base úmida de 30% tanto durante a safra como na entressafra (Ribeiro, 2017).

A produção de açaí é fortemente influenciada pelo período de chuvas. O período de safra é observado entre os meses de maio a setembro, e de entressafra entre os meses de outubro

a abril. Durante a baixa produção do açaí, as famílias com as menores áreas de produção encontram dificuldade de produção até para seu próprio consumo. Através desta tabela foi elaborado um gráfico que exibe a produtividade média e sua variância para o período observado (Ribeiro, 2017).

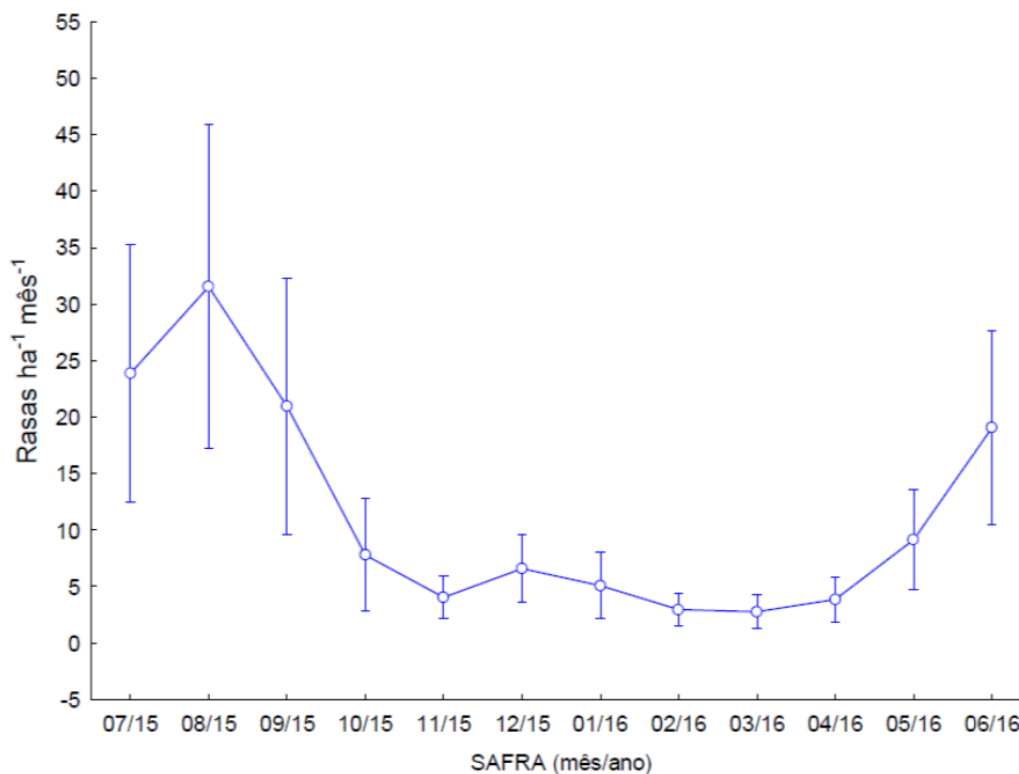


Figura 3-2: Produtividade média mensal de açaizais localizados na Ilha das Cinzas (Ribeiro, 2017)

Foi notado também que durante a entressafra as famílias que possuíam açaizais de maiores proporções tiveram produção muito similar às famílias de menores açaizais. Isto mostra uma invariância na proporção da produção (manejo) em períodos de baixa proporção, sendo todas as famílias afetadas pelos períodos de seca na Ilha das Cinzas. Notou-se também uma demanda energética média de 252,76 kWh/mês, sendo as bateadeiras de açaí, freezers e televisões os aparelhos da ilha que mais demandaram energia (Ribeiro, 2017).

O projeto "Desenvolvimento comunitário sustentável no estuário amazônico" é um fruto da parceria entre a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) e a Associação dos Trabalhadores Agroextrativistas da Ilha das Cinzas (ATAIC), com aporte financeiro da Financiadora de Estudos e Projetos (Finep). O programa visa desenvolver e aprimorar soluções tecnológicas para melhorar as condições de saneamento e das atividades produtivas de famílias da comunidade agroextrativista da Ilha das Cinzas, por meio de teste de

sistemas de energia alternativa para minimizar o isolamento da rede oficial de distribuição de energia elétrica, e mapeamento de açais (Embrapa, 2017).

4 Metodologia

4.1 Central de Gaseificação

Embora a tecnologia empregada neste tipo de central ainda se encontrar em desenvolvimento, já existem fabricantes no Brasil de soluções que envolvem a gaseificação de biomassa e introdução do gás gerado em um grupo motogerador para gerar energia elétrica. São compostas pelo reator de gaseificação, unidade de remoção de particulados e limpeza do gás e o grupo motogerador. A biomassa briquetada é introduzida no reator, sendo gaseificada e convertida em gás combustível, ainda rico em alcatrão. Por se tratar de uma substância danosa ao ambiente e ao grupo gerador, a unidade de limpeza é responsável por remover este poluente, resfriando o gás para a temperatura de 50°C. Finalmente, o gás combustível é introduzido no grupo motogerador de ignição por centelha, convertendo a energia do gás em energia elétrica.

O gás é injetado juntamente com o ar para dentro da câmara de combustão do grupo motogerador, substituindo integralmente a gasolina. Qualquer motor de ignição por centelha pode ser facilmente convertido para a operação nestas condições. Existem aplicações para geração de até 30 kW, tornando esta solução ideal para geração de energia a partir de resíduos da produção agrícola de vilarejos no Norte do país (Rendeiro, et al., 2008).

Esta solução pode também ser aplicada para grupos motogeradores a óleo diesel, em que o gás é introduzido juntamente com o ar, com o diesel ainda presente na mistura com 15% em volume, no mínimo. O combustível líquido é injetado para iniciar a combustão dentro do cilindro, propiciando a economia de 85% em combustível. Pelo elevado poder calorífico do diesel presente na mistura, a solução pode ser aplicada em centrais geradoras de até 1.000 kVA, sendo o gaseificador o fator limitante.

Apesar do poder calorífico do gás ser 10% do poder calorífico do diesel, a potência nominal dos motores não é reduzida porque a redução do poder calorífico é compensada pelo aumento do fluxo mássico de gás de síntese.

Deve-se ter cuidado especial com os resíduos do processo de gaseificação, em especial o alcatrão como já falado neste trabalho. Estas substâncias têm efeito prejudicial à saúde, mas com grande aplicação em adubo para plantações (Rendeiro, et al., 2008).

4.1.1 Balanço de Energia

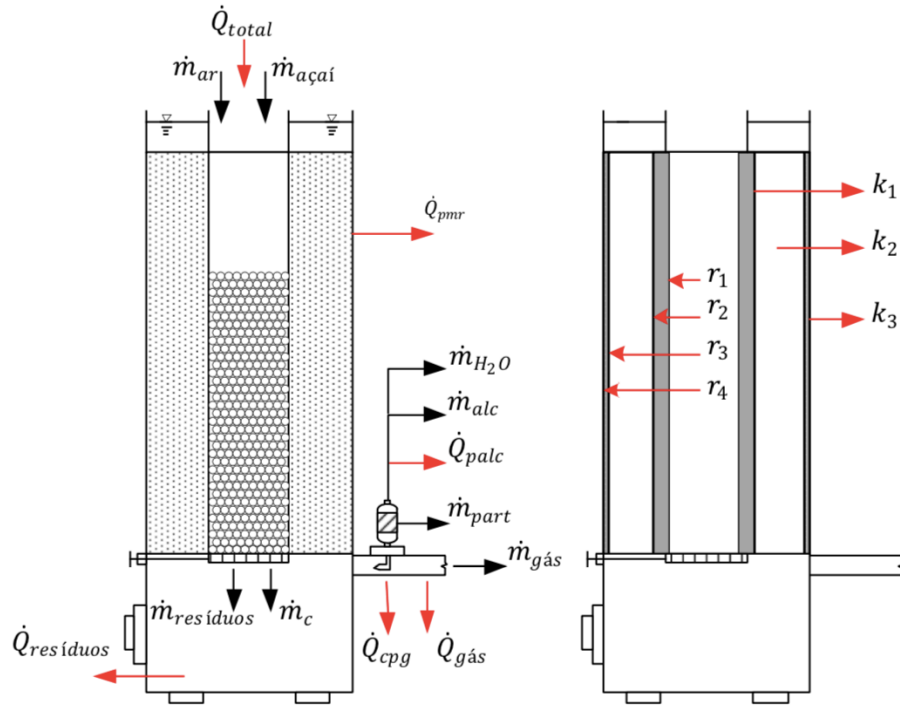


Figura 4-1: Fluxos térmico e mássico no gaseificador (Santos, 2011)

Onde:

$\dot{m}_{açai}$: fluxo mássico de açúcar;

\dot{m}_{ar} : fluxo mássico de ar;

\dot{m}_{gas} : fluxo mássico de gás;

$\dot{m}_{resíduos}$: fluxo mássico de resíduos;

\dot{m}_{alc} : fluxo mássico de alcatrão;

\dot{m}_{part} : fluxo mássico de particulado presente no gás;

\dot{m}_c : fluxo mássico de carvão não convertido;

\dot{Q}_{total} : calor total disponível;

\dot{Q}_{gas} : calor disponível no gás produzido a partir das concentrações de CO , H_2 e CH_4 ;

$\dot{Q}_{resíduos}$: calor perdido com os resíduos;

\dot{Q}_{pmr} : calor cedido para meio pelo reator;

\dot{Q}_{cpq} : calor cedido pelos gases;

\dot{Q}_{palc} : calor perdido para o alcatrão;

r_{1-4} : raio do vão interno do reator;

k_{1-3} : condutividade térmica.

Aplicando-se a lei da conservação de massa para o sistema acima, tem-se:

$$\sum \dot{m}_{reagentes} = \sum \dot{m}_{produtos}$$

Substituindo os reagentes pelo fluxo mássico do açaí e do ar, e dos produtos pelo fluxo mássico do gás, do carvão não convertido, das cinzas e do vapor d'água, obtém-se:

$$\dot{m}_{açaí} + \dot{m}_{ar} = \dot{m}_{gas} + \dot{m}_c + \dot{m}_{cinzas} + \dot{m}_{H_2O}$$

O balanço de energia avalia todas as transferências de calor do sistema analisado, e através da manipulação de equações e emprego de valores à elas, pode-se chegar ao calor total disponível do gaseificador. Em um dado instante, o calor total disponível no reator é igual à soma do calor disponível no gás, do calor perdido para os resíduos, do calor perdido por meio do gaseificador, do calor cedido aos gases e do calor perdido pela não conversão do carbono (Santos, 2011).

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{gas} + \dot{Q}_{resíduos} + \dot{Q}_{pmr} + \dot{Q}_{cpg} + \dot{Q}_{pcc}$$

O calor total \dot{Q}_{total} disponível no reator pode também ser definido pela soma entre a vazão mássica do açaí multiplicada pelo seu poder calorífico inferior e a vazão mássica do ar multiplicada pela sua entalpia (Santos, 2011).

$$\dot{Q}_{total} = \dot{m}_{açaí} \times PCI_{açaí} + \dot{m}_{ar} \times h_{ar}$$

A eficiência do gaseificador a frio é obtida através da relação entre a potência térmica do gás produzido e a potência térmica da biomassa, que são calculados a partir da multiplicação entre fluxo mássico e o poder calorífico inferior em base úmida de cada substância (Santos, 2011).

$$\eta_f = \frac{P_{gas}}{P_{bio}}$$

Diversos são os estudos realizados na área de cálculos e dimensionamento de gaseificadores de biomassa para aplicações em geração de energia. Dentre eles, Santos, 2011 desenvolveu mais de 20 experimentos para obter resultados com a maior precisão possível para potência de geração próxima à desejada neste estudo. Os dados abaixo foram obtidos através

do Método de Equilíbrio, baseada no equilíbrio químico e na velocidade superficial média de um gaseificador *downdraft*, que no estudo teve como objetivo determinar o diâmetro do reator.

Tabela 3: Resultados para o Método de Equilíbrio em um gaseificador *downdraft* (Santos, 2011)

Dados de Entrada			
	Unid.		
Eficiência do Gerador	0,9		
Eficiência do motor	0,25		
Entalpia de formação do combustível	-603682,23	kJ/kmol	
PCI da biomassa base úmida	14,16	MJ/kg	
Velocidade Superficial média do gaseificador	0,25	m/s	
Massa específica do ar	1,204	kg/m³	
Cálculos Realizados			
Potência Elétrica	3 kWe	4,0 kWe	Unid.
Potência Mecânica	3,33	4,44	kW
Potência do gás	13,3	17,8	kW
Eficiência do gás frio	0,79	0,70	
Vazão do gás	0,0033	0,0044	Nm³/s
Área da seção transversal do reator	0,013	0,017	m²
Diâmetro do Reator	0,13	0,15	m

É importante notar que este estudo leva em consideração uma eficiência do gerador elétrico de 90% e do motor a combustão interna de 25%. Valores maiores para a eficiência do motor poderiam ser encontradas, porém as condições de operação do mesmo em ambiente úmido e quente como o clima da floresta amazônica podem trazer valores baixos de eficiência para a máquina térmica.

Inicialmente considera-se um valor inicial para o poder calorífico da biomassa de 14,16 MJ/kg, para que através dos cálculos iterativos possa-se obter o valor nas condições ambientais retratadas na tabela seguinte. Deve-se notar também a influência do diâmetro do reator na potência obtida para o gás, sendo essa relação de proporcionalidade direta.

Tendo o diâmetro do reator definido em 15 cm para trabalho em potência aproximada de 4,0 kW, uma série de experimentos foram realizados com o objetivo de obter uma melhor observação da influência que cada parâmetro exerce sobre o calor disponível ao final da

gaseificação. Tomando-se em consideração o experimento que teve os melhores resultados em função da razão ar-combustível, os valores da tabela abaixo são observados.

Tabela 4: Parâmetros de operação do gaseificador downdraft (adaptado) (Santos, 2011)

Massa de açai [kg/h]	1,63
PCI do açai [kJ/kg]	16663,1
Temperatura do ar [K]	304,95
Fluxo mássico de ar [kg/h]	3,825
Fluxo volumétrico do gás [Nm ³ /h]	4,23
PCI do gás [kJ/Nm ³]	3057
Temperatura do gás [K]	415,15
Fluxo mássico de resíduos [kg/s]	0,003404
Temperatura dos resíduos [K]	873,15
Temperatura interna do leito [K]	1023,15
Condutividade térmica k_1 [W/m-K]	1,41
Condutividade térmica k_2 [W/m-K]	0,04
Condutividade térmica k_3 [W/m-K]	50,2
Coefficiente de transferência de calor com o ambiente [W/m ²]	5,0
Raio r_1	0,15
Raio r_2	0,2
Raio r_3	0,294
Raio r_4	0,3
Área lateral externa do leito [m ²]	2,83
Altura do leito [m]	1,5

Os resultados do balanço de energia realizado no item 3.1.1 são mostrados a seguir em tabela dedicada.

Tabela 5: Resultados do Balanço de Energia (Santos, 2011)

	Calor [kW]
Calor total disponível	7,57
Calor perdido com os resíduos	1,76
Calor cedido para meio pelo reator	0,42
Calor cedido pelos gases	0,22
Calor disponível no gás	4,05
Calor por devido a outras perdas	1,12

Analisando as taxas de transferência de calor observadas durante os experimentos e levando-se em consideração as premissas no início do capítulo, o diagrama a seguir pode ser elaborado para visualizar a participação das perdas atreladas ao processo de conversão de energia da biomassa.

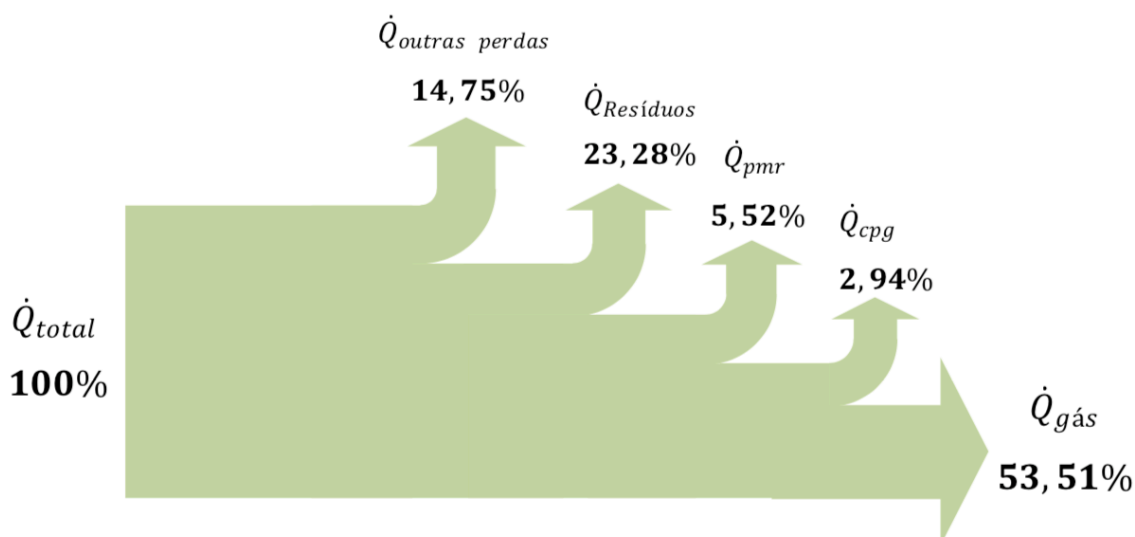


Figura 4-2: Diagrama resultado do Balanço de Energia (Santos, 2011)

O processo de conversão termoquímica da biomassa em gás de síntese tem uma eficiência de pouco mais de 53%, onde quase 47% da energia da biomassa é perdida em forma de calor, sendo praticamente metade para os resíduos de combustão e a outra metade para outras perdas como o alcatrão e a transferência de calor para o reator e para o próprio gás.

A eficiência encontrada por Santos, 2011 não é de todas piores. Se comparada com outras máquinas térmicas é inclusive um valor bem satisfatório. Tomando como exemplo os motores a combustão interna, suas eficiências de Ciclo Diesel se aproximam de 45%, mesmo

valor para turbinas em Ciclo Brayton aberto. A eficiência do gaseificador aqui estudado se assemelha à de usinas termelétricas em ciclo combinado de alto rendimento, próxima de 53%.

4.1.2 Composição do Gás de Síntese

Durante os inúmeros experimentos realizados para analisar o gás produzido a partir da biomassa de caroços de açaí, amostras do gás de síntese foram recolhidas para análise em cromatografia gasosa. A composição do gás de síntese produzido a partir da conversão termoquímica do açaí pode ser observada na tabela abaixo para seis experimentos bem-sucedidos realizados por Santos, 2011.

Tabela 6: Composição do syngas produzido (%mol/mol) (Santos, 2011)

Exp. N°	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
#10	12	6,48	1,31	60,42
#13	10	11	1,1	56,2
#15	10	11,5	1,16	56,35
#16	10,3	12	1,35	55,23
#17	11,3	12,8	1,3	55,87
#21	3,34	2	0,31	60,48

Alguns fatores como a composição da biomassa e a sua umidade antes de entrar no reator são responsáveis pela variação na cromatografia gasosa. O estudo analisado variou a vazão de ar na alimentação para estudar as diferentes razões ar-combustível e os impactos na variação do PCI e potência do gás ao final do processo. Mesmo assim, a composição do syngas para os diferentes experimentos permaneceu praticamente inalterada, salve o experimento #21.

Uma conclusão do estudo indica que quando menor a razão ar-combustível (ou seja, quanto mais rica a mistura) maior será a presença dos gases CO , H_2 e CH_4 no gás de síntese resultado da gaseificação do açaí. Em contrapartida, outros estudos como (Barrio, et al., 2000), (Jayah, 2003), e (Hla, 2004) observaram uma leve proporcionalidade direta entre a razão ar-biomassa e a participação do metano na mistura final. Barrio, 2000 especificamente encontrou que a participação de todos os gases acima é diretamente proporcional à razão ar-biomassa.

Um dos motivos pelo qual tal discrepância pode ser observada é devido a composição da biomassa analisada. Serrarias e resíduos sólidos urbanos podem ter composições completamente diferentes, produzindo gases completamente diferentes. Inclusive, dependendo da composição do combustível analisado devem ser tomadas medidas de precaução para evitar

a contaminação da mistura e eventuais danos ao reator. Estes casos incluem por exemplo a presença de enxofre na composição original do combustível, altamente reativo e maléfico aos equipamentos e à saúde humana.

Além da observação da composição dos gases produzidos, é necessário também analisar a produção de alcatrão e particulados, igualmente danosos aos equipamentos e à saúde. Usualmente seu teor é medido por gravimetria, que é um método analítico quantitativo clássico para pesagem de compostos puros. Os teores de alcatrão medidos durante os experimentos são retratados na tabela abaixo.

Tabela 7: Variação do teor de alcatrão medido nos experimentos (Santos, 2011)

Exp N°	Alcatrão (g/m³)	MP (g/Nm³)	Vazão na linha (m³/h)	%H₂O
#13	206,28	1,43	0,077	17,73
#15	157,37	1,24	0,083	18,74
#16	129,16	3,12	0,087	18,01
#17	125,65	3,67	0,063	10,03

Comparado aos outros trabalhos, o autor cita que a biomassa proveniente do açaí produz um elevado teor de alcatrão no gaseificador downdraft. Uma melhoria proposta é a utilização do gaseificador estratificado que reduz consideravelmente o teor de alcatrão para menos de 10 g/Nm³ (Santos, 2011).

4.2 Central de Geração

Mesmo que estejam ainda em fase inicial de estudos com poucas aplicações práticas, a central de geração associada a centrais de gaseificação já podem ser observadas em alguns trabalhos de conclusão de curso e dissertações de mestrado e doutorado. Oriundas de diferentes fontes de biomassa, os projetos visam sempre a redução do impacto ambiental tanto pela economia de combustíveis fósseis como também pela destinação de resíduos de produção agrícola ou de resíduos sólidos urbanos.

Almeida, 2014 visou fazer aproveitamento energético da biomassa de *eucalyptus* para gaseificação e geração de energia elétrica em porção do município de São Luiz do Paraitinga, no estado de São Paulo, que é rodeada de imensas plantações de eucalipto. Contando com pouco mais de 10.000 habitantes, durante as festas da cidade encontra problemas sérios de abastecimento de energia e consequentemente abastecimento de água.

Seu trabalho foi desenvolvido para compor um sistema de gaseificação cocorrente (*downdraft*) estratificado de 20 kW de potência, associado a um motogerador a óleo diesel de mesma potência da fabricante MWM trabalhando a 1800 rpm em tensão 110/220 V. Verificou-se que o custo de operação do sistema constituía praticamente metade de todo o valor investido para o projeto, concluindo que os preços da tecnologia não os tornam atrativos para concorrência com o preço de geração de usinas hidrelétricas (Almeida, 2014).

Já Figueiredo, 2012 utilizou um gaseificador de leito fixo cocorrente (*downdraft*) com dois estágios de gaseificação para que o agente gaseificador (ar) seja injetado em duas zonas, criando dois espaços de altas temperaturas reduzindo a produção de alcatrão, produzindo assim um gás mais limpo.



Figura 4-3: Motor de combustão interna da fabricante MWM Série 229 (MWM, 2019)

O motogerador aplicado no trabalho foi da fabricante MWM convertido para o Ciclo Otto (ignição por centelha) para trabalhar com o gás de síntese produzido na sua central de gaseificação. O motor de 4 cilindros e 4 litros possui uma potência nominal de 45 kW em regime *stand-by* e 38 kW em regime contínuo de operação trabalhando a 1800 rpm em tensão variável de 127/220 V e 220/380 V. A carga máxima suportada para as condições de operação foi de 26,4 kW. Mesmo que o sistema não tenha sido preparado para gerar com gás de síntese e sim biogás, a central geradora teve um bom desempenho não apresentando distorções na geração de energia para a potência máxima alcançada (Figueiredo, 2012).

Tabela 8: Resultados do monitoramento do grupo gerador (Figueiredo, 2012)

Carga (kW)	0	7	13	20,1	26,4
Tensão (V)	222	223	223	223	223
Corrente (A)	0	18,5	33	51,84	67
Temperatura água (°C)	82	82	82	83	84
Temperatura óleo (°C)	89	91	93	94	95
Pressão de óleo (bar)	5,3	6,5	6,4	6,5	6,9
Temperatura escape (°C)	560	590	602	611	625
Rotação (rpm)	1800	1762,22	1710	1657,8	1636,2

O experimento foi realizado variando-se a carga sobre o gerador em 5 estágios: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Desta forma foi possível verificar a influência da potência elétrica gerada na tensão e corrente da energia gerada, a temperatura da água de arrefecimento, a temperatura e pressão do óleo, a temperatura de escape e a rotação do motor para todos os casos (Figueiredo, 2012).

Observou-se que a corrente de geração é diretamente proporcional à carga aplicada sobre o gerador, verificando-se um incremento linear à medida que a carga é aplicada, sem distorções ou variações bruscas até a potência elétrica máxima observada.

Foi notado também que houve uma leve redução da rotação do motor à medida que a carga ia sendo acrescida, mantendo-se uma relação de proporcionalidade inversa dentro dos limites indicados pelo fabricante de 10%.

O experimento retrata também que o incremento de carga acima de 26,4 kW gerou variações aleatórias na corrente e redução demasiada da tensão de geração, além de diminuir a rotação do motor chegando a pontos danosos à máquina térmica produzindo uma energia elétrica de má qualidade.

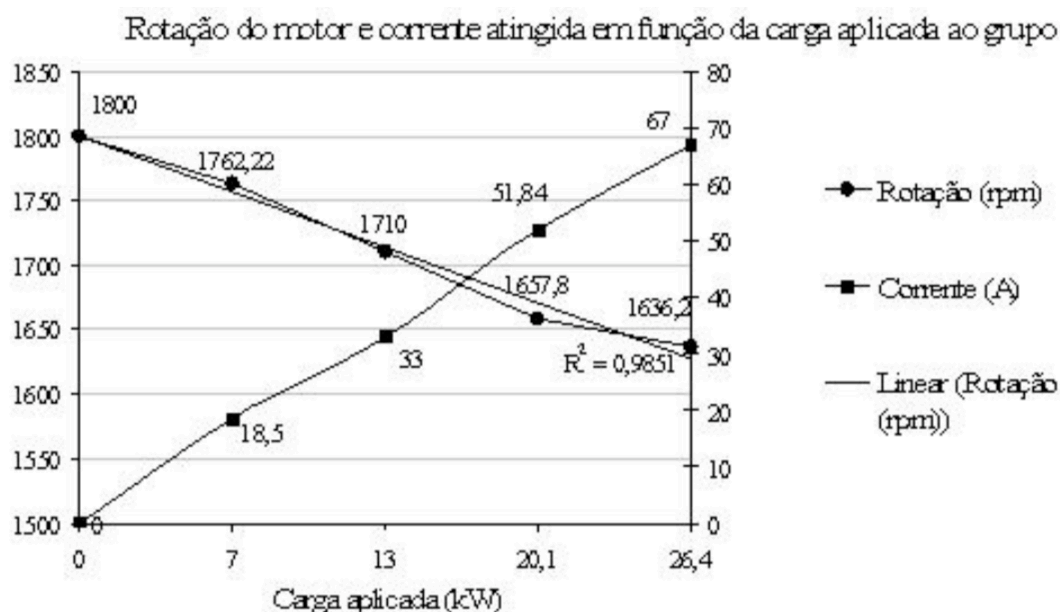


Figura 4-4: Gráfico da rotação do motor e corrente gerada em função da carga aplicada (Figueiredo, 2012)

4.3 Central de Dessalinização

Muito se pode aproveitar a energia dos gases de exaustão da central geradora. Estes gases são expelidos ainda a elevadas temperaturas, possuindo uma energia térmica ainda aproveitável podendo elevar ainda mais a eficiência geral do processo de conversão térmica de biomassa.

Para que essa energia térmica seja aproveitada, a central de dessalinização deve ser projetada de forma a estar próxima à central geradora, de onde serão obtidos os gases de exaustão, e à fonte de água salgada do estuário do Rio Amazonas para realizar o processo de destilação.

Procedimentos experimentais mostram que já existe disponibilidade de energia térmica nos gases de exaustão para evaporação da água do mar em motores a combustão de potência a partir de 5 hp. A montagem do sistema pode ser feita com motor monocilíndrico de quatro tempos resfriado à água conectado a uma unidade de recuperação de calor, em que o evaporador é um trocador de calor do tipo casco e tubo conectado à exaustão do motor (Maheswari, et al., 2014).

Os gases de exaustão devem passar por dentro dos tubos do trocador, que serão banhados pela água salgada sendo alimentada por meio de um tubo de diâmetro inferior que passa por dentro do casco, a uma altura maior do que os tubos do gás de exaustão, como

mostram as figuras abaixo. O tanque de armazenamento da água salgada alimenta o evaporador através de válvulas de controle que controlam a vazão mássica para o trocador de calor.

Para o bom dimensionamento dos diâmetros dos tubos por onde passam os gases de exaustão, o tubo de alimentação de água salgada e o diâmetro do casco, uma série de parâmetros devem ser levados em consideração, como material dos tubos, vazão mássica dos gases e da água salgada, número de tubos, número de passes e o passo dos tubos.

O material a ser adotado nos tubos é de grande importância para determinação da taxa de calor que está diretamente ligada ao k , responsável por quantificar a condutividade térmica do material. A vazão mássica dos gases e da água salgada influem na escolha do diâmetro dos tubos devido à determinação da velocidade na qual os fluidos irão passar. Quanto maior a velocidade, maior a turbulência e maior será a troca térmica. Por outro lado, podem-se ter maiores perdas de carga e erosão quando há presença de particulados na mistura. Um maior número de tubos ramifica a vazão de gases, reduzindo a velocidade em cada tubo podendo gerar uma deposição e consequentemente uma incrustação exagerada, além da perda de efetividade de troca térmica entre os gases e a água salgada. O número de passes limita o número de tubos e pode também aumentar o diâmetro do casco, mas aumenta a efetividade de troca térmica entre os fluidos. O passo é a distância entre os tubos, importante para possibilitar a imersão da água salgada por entre os tubos de exaustão.

Da mesma forma, no condensador é necessário realizar o dimensionamento de todos os parâmetros acima descritos para uma boa efetividade de troca térmica. O condensador é responsável por condensar novamente a água evaporada no evaporador com os gases de escape, finalizando o processo de purificação da água.

A água evaporada é conduzida em forma de vapor por dentro do condensador, que ao encontrar com a água do mar usada como fonte fria, condensa retornando à fase líquida, completando o processo de destilação da central dessalinizadora.

A escolha de que fluido deve correr por dentro dos tubos também é de suma importância. Neste caso que o controle de temperatura é necessário para o vapor d'água, o mesmo deve correr por dentro dos tubos e deixar a água do mar em maior vazão correr pelo casco, respeitando as indicações de que os fluidos de resfriamento devem passar pelo casco.

Da mesma forma que o evaporador, o condensador pode também ter um número de passes diferente de um, onde neste caso existe a abundância do fluido refrigerante (água do mar salgada) para condensar o vapor produzido no evaporador. Neste caso, um esquema de

dois passes é suficiente para cumprir com o requisito de condensação e resfriamento do vapor d'água, produzindo água doce livre do sal do mar, sendo finalmente estocada em um tanque de armazenamento de água dessalinizada onde as famílias da Ilha das Cinzas poderão abastecer suas casas.

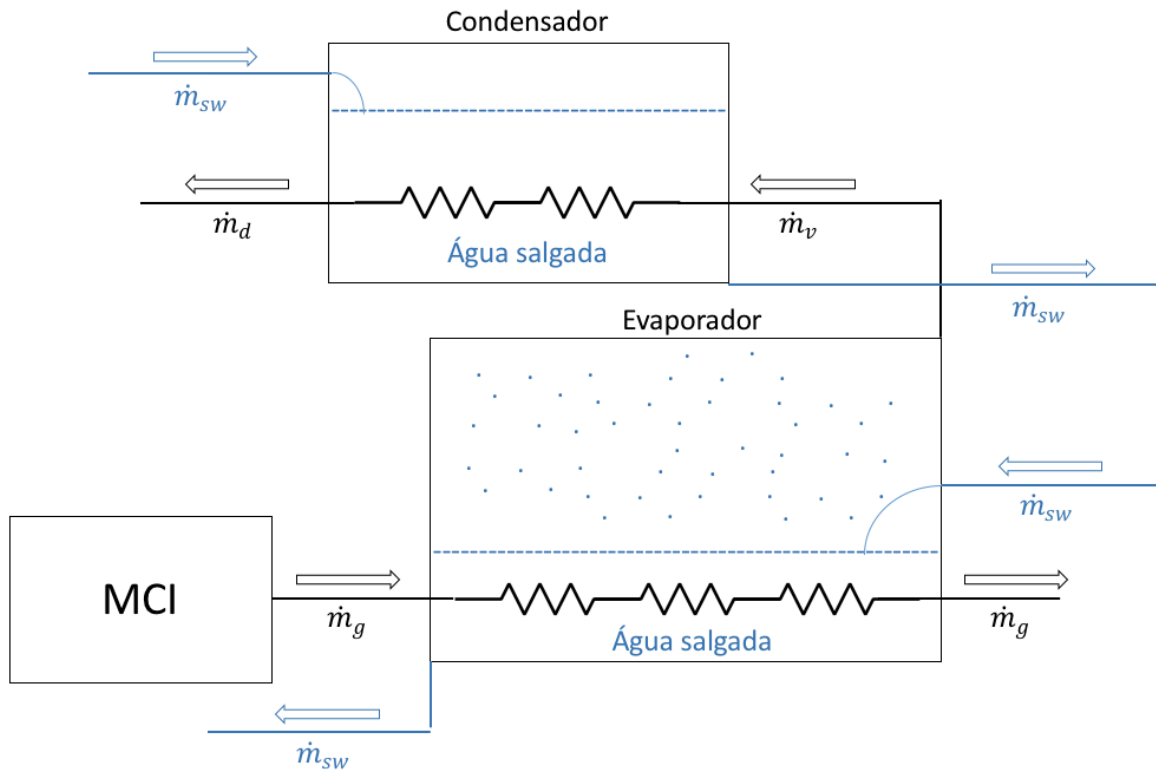


Figura 4-5: Arranjo da central de dessalinização

5 Resultados e Discussão

A proposta de solução apresentada neste trabalho está intimamente ligada às condições ambientais da região estudada, a Ilha das Cinzas. Um dos fatores determinantes para um bom cultivo de açaizais é a diferença de produção entre os períodos de safra e entressafra causada pelo índice pluviométrico que varia durante o ano no estuário do Rio Amazonas. Como se trata de uma solução energética voltada para a agroindústria, outro fator de suma importância é o controle de pragas que podem afetar significativamente a colheita dos frutos, impactando a economia local e a geração de energia para a população.

Dadas as variáveis condicionantes para o êxito do projeto que viabiliza o bom funcionamento de uma central geradora à biomassa na Ilha das Cinzas, foi elaborada uma tabela que aproxima a produção mensal e anual do açaí pelas famílias produtoras, a fim de prever a

disponibilidade de substrato para gaseificação e geração em função dos meses do ano, tomando como referência o período analisado pelo trabalho de Ribeiro, 2017 no intervalo de um ano entre 2015 e 2016.

Tabela 9: Aproximação da disponibilidade de biomassa disponível durante o ano

Produção	in natura	caroço	vazão mássica
Janeiro	972 kg/mês	778 kg/mês	1,07 kg/h
Fevereiro	648 kg/mês	518 kg/mês	0,71 kg/h
Março	702 kg/mês	562 kg/mês	0,77 kg/h
Abril	810 kg/mês	648 kg/mês	0,89 kg/h
Maio	1.782 kg/mês	1.426 kg/mês	1,95 kg/h
Junho	4.212 kg/mês	3.370 kg/mês	4,62 kg/h
Julho	5.562 kg/mês	4.450 kg/mês	6,10 kg/h
Agosto	6.858 kg/mês	5.486 kg/mês	7,52 kg/h
Setembro	4.968 kg/mês	3.974 kg/mês	5,44 kg/h
Outubro	1.728 kg/mês	1.382 kg/mês	1,89 kg/h
Novembro	1.674 kg/mês	1.339 kg/mês	1,83 kg/h
Dezembro	1.458 kg/mês	1.166 kg/mês	1,60 kg/h
Produção TOTAL	31.374 kg/ano	25.099 kg/ano	34,38 kg/h
Produção anual por família	627 kg/família.ano	502 kg/família.ano	0,69 kg/família.h

Como observado durante o estudo, em média 79% do fruto in natura era composto pelo caroço, enquanto 21% era composto pela polpa, responsável capitalizar todo o processo produtivo do açaí. Assumindo que todas as famílias produtoras da região mantenham uma linearidade de trabalho durante o ano e que todo o resíduo da produção é aproveitado, tomando-se como base o trabalho desenvolvido por Santos, 2011, para viabilizar uma central geradora de 4 kW de capacidade seria necessário o consumo mássico horário de 1,6 kg/h de substrato, suficiente para manter uma qualidade de geração e uniformidade de queima seja do gás do motogerador ou da mistura ar-biomassa no gaseificador. Nota-se através da análise da tabela acima que o intervalo de meses que a produção de substrato supera o valor indicado é entre os meses de maio a dezembro. É importante frisar que isto não inviabiliza a aplicação da solução nos outros meses, já que a produção excedente de combustível pode ser estocada para a utilização durante o período de entressafra.

Tendo a produção de biomassa definida para o período anual de geração, é possível então elaborar um estudo energético para aproximar a energia disponível para oferecer soluções que venham a melhorar a qualidade de vida da população local, seja pela economia de óleo diesel para geração de energia ou seja pela dessalinização da água do mar para aumentar a oferta de água potável na região.

Uma análise imprescindível a ser realizada é das eficiências de conversão de biomassa em energia disponível. As eficiências do gaseificador, do motor à combustão interna e do gerador devem ser consideradas para se obter o resultado mais fidedigno possível. Sua equação é determinada a seguir:

$$\eta_{total} = \eta_{gas} \times \eta_{MCI} \times \eta_{gerad}$$

Onde:

η_{total} : eficiência total do processo;

η_{gas} : eficiência do gaseificador;

η_{MCI} : eficiência do motor a combustão interna;

η_{gerad} : eficiência do gerador.

Considerando as mesmas premissas apresentados no trabalho de Santos, 2011, a eficiência do gaseificador obtida no trabalho foi de 53,51%, a eficiência considerada para o motor a combustão interna foi de 25% e a eficiência do gerador foi de 90%. Aplicando a equação acima, chega-se a uma eficiência total de 12%. Tal eficiência é esperada na termodinâmica pois a associação de máquinas térmicas que têm uma perda térmica considerável acarreta em um sistema ineficiente.

Uma forma de elevar a eficiência total do processo é de obter aplicações para o *waste heat* gerado a partir da gaseificação da biomassa e dos gases de escapamento do motor de combustão interna, sendo o segundo o maior responsável pela queda de eficiência total do sistema. Este calor gerado pode ser utilizado para pré-aquecimento por regeneração no processo de gaseificação ou para a geração de vapor, possuindo ainda uma elevada energia térmica para aplicações na termodinâmica.

Descartando a possibilidade de regeneração no processo de gaseificação da biomassa dado que a solução proposta visa um sistema de gaseificação modular e não-flexível, a hipótese de utilização do calor dissipado pelos gases de escape do motor a combustão é considerada para geração de vapor saturado.

Inúmeras são as formas de aproveitamento da energia térmica do vapor saturado. Grandes plantas de geração termelétrica que utilizam o Ciclo Brayton aberto, possuem uma eficiência total relativamente baixa, dado que os gases de escape do turbogerador estão ainda à elevadas temperaturas e pressões. Soluções como o fechamento de ciclo através de uma

unidade de recuperação de vapor (VRU em inglês) podem aumentar significativamente a eficiência ao usar a energia do vapor ainda em alta pressão e temperatura para passar por uma outra turbina a vapor, gerando mais energia sem a utilização de nenhuma molécula de combustível a mais.

Como a escala de aplicação do presente trabalho é infinitamente menor do que uma grande central térmica, o calor disponível é inferior, inviabilizando a solução de uma segunda turbina para geração de energia. Uma preocupação relacionada a qualidade da água ingerida pela população da Ilha das Cinzas, dado o nível de isolamento e a inexistência de água encanada no local, motivou o estudo de viabilidade para aproveitamento da energia térmica dos gases de exaustão do motor para a dessalinização da água do estuário do Rio Amazonas produzindo água potável para o consumo da população local.

A dessalinização é um processo físico-químico que demanda energia para ser realizada, podendo ser elétrica ou térmica. A viabilidade elétrica seria através da presença da central geradora que forneceria eletricidade para se criar uma resistência responsável por elevar a temperatura da água a ser dessalinizada, evaporando-a. Como a energia elétrica gerada na planta é para o consumo local da comunidade atendendo à carga dos aparelhos eletrônicos das famílias produtoras (como geladeiras e televisores), esta solução seria inviável indo de encontro com a proposta do trabalho.

A outra alternativa para recurso energético a ser aplicado à central dessalinizadora é o aproveitamento térmico dos gases de escape do motor a combustão interna da central geradora como fonte quente para evaporar a água salgada. Esta alternativa é a melhor solução encontrada pois reaproveita grande parte do calor gerado durante a combustão no cilindro do motogerador que seria desperdiçada se fosse lançada ao meio ambiente.

A solução será composta por arranjos tubulares que conduzem a água salgada, o vapor e a água doce e dois trocadores de calor que constituirão a central dessalinizadora: um evaporador e um condensador, responsáveis por evaporar a água salgada e condensá-la, respectivamente, produzindo água potável própria para o consumo das famílias produtoras da região.

O evaporador será do tipo casco e tubo, em que os gases de escape devem passar pelo feixe de tubos em uma vazão de 0,2 kg/s, ingressando à 410°C e saindo à 120°C para evaporar a porção de água salgada a ser alimentada à 25°C através de um tubo de menor diâmetro com

orifícios por onde a água será liberada para trocar calor com os tubos quentes. O vapor gerado dentro do trocador de calor deverá ser recolhido e conduzido para o condensador.

Tabela 10: Medidas e materiais a serem aplicados ao evaporador

Descrição	Dimensões	Material
Coefficiente global de troca térmica	400 W/m ² .K	-
Diâmetro dos tubos de exaustão	0,038 m	Latão
Comprimento dos tubos de exaustão	0,75 m	Latão
Número de tubos	7	Latão
Número de passes	1	-
Diâmetro do casco	0,2 m	Aço
Área de troca térmica	0,63 m ²	-

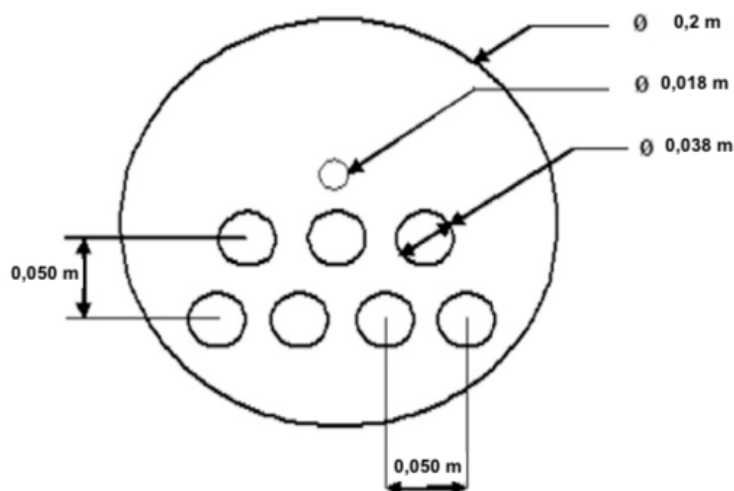


Figura 5-1: Seção transversal do evaporador

O condensador será do tipo casco e tubo, em que o vapor saturado passará pelos tubos e a água salgada abundante passando pelo feixe de tubos atuando como fonte fria para resfriar o vapor, condensando-o novamente. A água salgada irá retornar ao evaporador já pré-aquecida, e então devolvida ao mar. A água doce deve ser recolhida e conduzida para um reservatório onde a população local poderá retirar as quantidades a serem consumidas por cada família.

Tabela 11: Medidas e materiais a serem aplicados ao condensador

Descrição	Dimensões	Material
Coefficiente global de troca térmica	400 W/m ² .K	-
Diâmetro dos tubos	0,038 m	Latão
Comprimento dos tubos	0,75 m	Latão
Número de tubos	5	Latão
Número de passes	2	-
Diâmetro do casco	0,4 m	Aço
Área de troca térmica	0,90 m ²	-

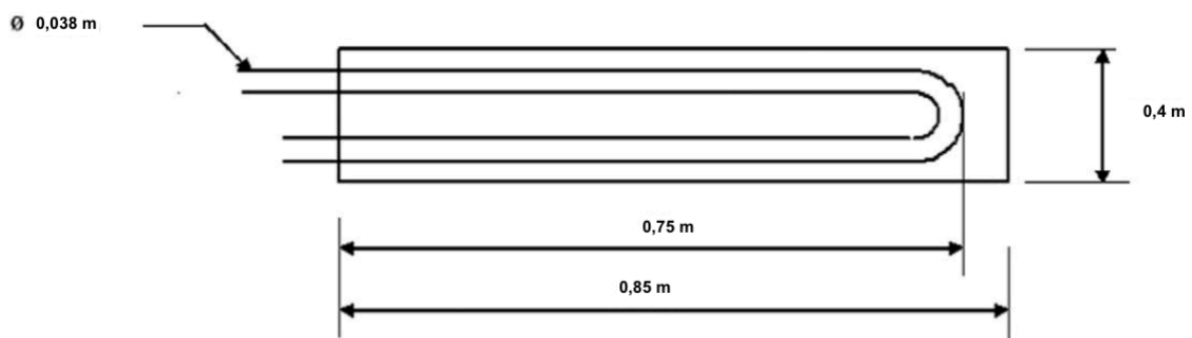


Figura 5-2: Vista lateral em corte do condensador

Utilizando os números acima para o evaporador e para o condensador, será possível trocar um calor igual a 31,13 kW e 27,02 kW, respectivamente, atendendo à demanda térmica para realizar a evaporação e condensação da água salgada, produzindo água doce para o consumo.

A porção de água potável produzida utilizando a central geradora e dessalinizadora empregada no trabalho será de 41,67 L/h. Considerando que o gerador fique ligado durante 12 horas por dia para atender às principais cargas do povoado e que a central dessalinizadora estará em funcionamento durante todo este tempo, serão produzidos 500 L/dia de água potável, suficiente para atender ao consumo de 250 pessoas para um consumo diário de 2 litros de água por dia por pessoa. Assumindo que as famílias da Ilha das Cinzas tenham em média 5 integrantes, a água potável produzida a partir da central dessalinizadora será suficiente para suprir a demanda hídrica de todas as 50 famílias produtoras de açaí da região.

6 Conclusão

A emergência climática foi decretada e as 17 metas do desenvolvimento sustentável foram elaboradas pela Organização das Nações Unidas como um guia para ser seguido que de certa forma assegurará um crescimento responsável da população. Dentre elas, o trabalho proposto atende às de Água Limpa e Saneamento, Energia Limpa e Acessível, e Cidades e Comunidades Sustentáveis.

Existe uma corrida para atendimento às cláusulas do Acordo de Paris, assinado em 2016 por quase 200 países que se comprometem a reduzir a emissão de gases de efeito estufa à longo prazo. O presente trabalho também vai a favor da proposta de 20/20/20, que promete a redução 20% das emissões de gás carbônico, o crescimento da participação da energia renovável nos mercados em 20% e um aumento de 20% da eficiência energética dos países signatários.

Soluções como as propostas neste trabalho são fruto da análise minuciosa de processos ineficientes que geram resíduos e impactos ambientais. Apenas estudando a fundo os procedimentos empregados é possível elaborar soluções eficientes com menores impactos ao meio ambiente, resolvendo problemas atrelados ao descarte irregular de resíduos, sejam eles agrícolas ou urbanos.

A adoção do gaseificador cocorrente (downdraft) reduz o teor de alcatrão na mistura final, reduzindo a produção do contaminante pela simples inversão do posicionamento entre oxidante e redutor em seu arranjo. A substituição do óleo diesel em sua totalidade pelo gás de síntese gerado a partir da biomassa é viável quando existe a produção suficiente de substrato capaz de converter o baixo poder calorífico comparado ao diesel pela maior vazão de gás. A potência disponível no motor de combustão interna, bem como a temperatura dos gases de escape variam com a carga aplicada ao motor, carga esta que vai depender do consumo local de energia elétrica.

A dessalinização da água é fundamental para garantir a qualidade da água a ser ingerida pela população, que dado o isolamento da comunidade inviabiliza as instalações de água encanada e estações de tratamento. Combinando esta solução à central gaseificadora e geradora de energia aumenta a eficiência total do sistema, vide as ainda elevadas temperaturas da exaustão do motogerador, além de prover mais um insumo produzido a partir da central de cogeração proposta neste trabalho.

Propostas de continuação de estudos para este trabalho seriam:

- Empregar o uso de briquetadeiras para elevar o poder calorífico da biomassa antes de ser ingressada no gaseificador e refazer o balanço de energia do sistema. Provavelmente viáveis para grandes centros produtores de açaí em condição de não-isolamento
- Estudo detalhado da viabilidade de estocagem dos resíduos da produção de açaí e a combinação com biomassa a partir de serrarias para elevação da energia do combustível
- Analisar o emprego de gaseificador estratificado e compará-lo com o de topo aberto, comparando a composição e poder calorífico de cada caso
- Estudo de substituição parcial do óleo diesel, sendo queimado juntamente com o gás de síntese e aferir o excedente de produção de água doce
- Direcionamento da solução para a produção de água doce, dimensionando as bombas necessárias para compor o sistema como um todo

Referências

- Accardo, Brunna. 2018.** *Gaseificação de Biomassas: Modelagem do Equilíbrio Termodinâmico e Impacto de Parâmetros Operacionais na Composição do gás de síntese*. Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2018.
- Almeida, Carolane. 2014.** *Aproveitamento Energético da Biomassa Eucalyptus a partir da Gaseificação para utilização na Geração de Energia*. Brasília : Universidade de Brasília, 2014.
- Andrade, Rubenildo. 2007.** *Gaseificação de Biomassa: uma análise teórica e experimental*. Itajubá : Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- Bacellar, Atlas, et al. 2006.** *Geração de Renda na Cadeia Produtiva do Açaí em Projeto de Abastecimento de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas no Município de Manacapuru do Amazonas*. Manaus : Universidade Federal do Amazonas, 2006.
- Barrio, M., Fossum, M. e Hustad, J. E. 2000.** *A small-scale stratified downdraft gasifier coupled to a gas engine for combined heat and power production*. Department of Thermal Engine and Hydro Power. Oslo : Norwegian University of Science and Technology, 2000.
- Baruah, Dipal. 2013.** *Modeling of biomass gasification: A review*. Tezpur : Elsevier, 2013.
- Bezerra, Valeria, Freitas-Silva, Otniel e Damasceno, Leandro. 2016.** *Açaí: produção de frutos, mercado e consumo*. Macapá : EMBRAPA, 2016. p. 19.
- Embrapa. 2017.** Finep e Embrapa conferem benefícios de projeto para comunidade ribeirinha - Portal Embrapa. *Embrapa*. [Online] 24 de March de 2017. [Citado em: 20 de November de 2019.] <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/21443206/finep-e-embrapa-conferem-beneficios-de-projeto-para-comunidade-ribeirinha>.
- Empresa de Pesquisa Energética. 2019.** *Plano Decenal de Energia 2029*. Rio de Janeiro : Ministério de Minas e Energia, 2019.
- Engels, Jonathon. 2017.** 20 Biggest Forests in the World. *Green Global Travel*. [Online] junho de 2017. <https://greenglobaltravel.com/biggest-forests-in-the-world/#FORESTS%20IN%20SOUTH%20AMERICA>.
- Figueiredo, Fabrício. 2012.** *Produção de Energia Elétrica através de biomassa em Sistema de Gaseificação Cocorrente e Grupo Gerador com Capacidade de 50 kVA*. Londrina : Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, 2012. 2012v33n2p165.

Fiuza, Roberto. 2019. *Simulação numérica da gaseificação de diferentes biomassas: Impacto das condições operacionais nas eficiências energéticas e exergéticas.* Rio de Janeiro : Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2019.

Hla, San She. 2004. *A Theoretical and Experimental Study on a Stratified Downdraft Biomass Gasifier.* Melbourne : University of Melbourne, 2004.

Hunter, Dario. 1981. *Utilização dos Gases Residuais de uma Planta HTGR - Turbina a Gás para Dessalinização da Água do Mar.* São Paulo : Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1981.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. *Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência de 1º de julho de 2019.* Brasília : Governo Federal, 2019.

International Renewable Energy Agency. 2019. Bioenergy. *International Renewable Energy Agency.* [Online] 2019. [Citado em: 15 de October de 2019.] <https://www.irena.org/bioenergy>.

Jayah, T. H. 2003. *Computer Simulation of a Downdraft Wood Gasifier for Tea Drying.* s.l. : Biomass and Bioenergy, 2003.

Kumar, Ajay, Milford, Hanna e David, Jones. 2009. *Thermochemical Biomass Gasification: A Review of the Current Status of the Technology.* Stillwater : Energies, 2009.

Lippel. 2019. Briquetadeira de Extrusão por Parafuso BEP 300 | Lippel. *Lippel.* [Online] June de 2019. [Citado em: 19 de October de 2019.] <http://www.lippel.com.br/br/categorias/compactacao/briquetagem-e-peletizacao-de-biomassa/briquetadeiras-de-extrusao-por-parafuso/briquetadeira-de-extrusao-por-parafuso-bep-300-147.html>.

—. 2019. Briquetadeira Hidráulica de Pistão para Biomassa BH 100 | Lippel. *Lippel.* [Online] June de 2019. [Citado em: 19 de October de 2019.] <http://www.lippel.com.br/br/categorias/compactacao/briquetagem-e-peletizacao-de-biomassa/briquetadeiras-de-pistao-hidraulicas/briquetadeira-hidraulica-de-pistao-para-biomassa-bh-100-140.html>.

Lora, Electo, Andrade, Rubenildo e Ángel, Juan-Daniel. 2012. *Gaseificação e Pirólise para a Conversão da Biomassa em Eletricidade e Biocombustíveis.* s.l. : Biocombustíveis, 2012. pp. 411-498.

Maheswari, Murugavel e Esakkimuthu. 2014. *Thermal desalination using diesel engine exhaust waste heat*. Kovilpatti : Elsevier Science Direct, 2014.

Menezes, Grece Kelly, Couto, Luciano Louzada do e Flores, Maria do Socorro Almeida. 2018. *Gestão de Resíduos de Caroco de Açaí como Instrumento de Desenvolvimento Local O caso do Município de Ananindeua*. Belém : Congresso Brasileiro de Gestão, 2018. pp. 468-477.

MWM. 2019. MWM. *MWM Motores para Geradores*. [Online] MWM, 2019. [Citado em: 20 de November de 2019.] <https://www.mwm.com.br/site.aspx/Gerador-de-Energia>.

Perkins. 2019. 4006-23TRS Spark Ignited Gas Engine US Metric . *Perkins*. [Online] Perkins, 2019. [Citado em: 5 de November de 2019.] https://www.perkins.com/en_GB/products/new/perkins/electric-power-generation/gas/10000000995.html#.

Reis, Bruno, et al. 2010. *Produção de Briquetes Energéticos a partir de Caroços de Açaí*. Belém : Universidade Federal do Pará, 2010.

Rendeiro, Gonçalo e Nogueira, Manoel. 2008. *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida*. Brasília : Ministério de Minas e Energia (MME), 2008.

Ribeiro, Edielza. 2017. *Sistemas Produtivos: Disponibilidade de Biomassa e Atributos Energéticos e Caroco de Açaí e Resíduos de Serrarias Familiares, em Várzea Estuariana do rio Amazonas*. Macapá : Universidade Federal do Amapá, 2017.

Santos, Robson. 2011. *Estudo Experimental de um Reator de Gaseificação em um Leito Fixo de Açaí*. Belém : Universidade Federal do Pará, 2011.

Sauma, Jorge e Maia, Caio. 2019. Caminhos do açaí: Pará produz 95% da produção do Brasil, fruto movimenta US\$ 1,5 bi e São Paulo é o principal destino no país. *GI Globo*. [Online] 15 de March de 2019. [Citado em: 08 de October de 2019.] <https://g1.globo.com/pa/para/noticia/2019/03/15/caminhos-do-acai-para-produz-95-da-producao-do-brasil-fruto-movimenta-us-15-bi-e-sao-paulo-e-o-principal-destino-no-pais.ghtml>.

Souza, Luiz Faustino. 2002. *Análise Térmica de um Dessalinizador de Múltiplo Efeito para Obtenção de Água Potável*. João Pessoa : Universidade Federal da Paraíba, 2002.

Sparovek, Gerd e Dourado Neto, Durval. 2016. *Análise Territorial no Brasil para o Desenvolvimento da Agricultura Irrigada*. Piracicaba : Universidade de São Paulo, 2016.

Van-Wylen, Sonntag e Borgnakke. 2003. *Fundamentos da Termodinâmica.* [ed.] Editora Edgard Blücher. [trad.] Euryale Zerbini. 6th Edition. 2003.

Villes, Valesca, et al. 2019. *Água como bem econômico: dessalinização para o combate da escassez hídrica no agronegócio.* Campo Grande : Multitemas, 2019.