

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
DEPARTAMENTO AGROTECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS
CURSO BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

PAULO COELHO DE ALCANTARA

COGERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO BAGAÇO DE CAJU

CARAÚBAS/RN
2015

PAULO COELHO DE ALCANTARA

COGERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO BAGAÇO DO CAJÚ

Projeto apresentado ao Conselho do Curso Bacharelado em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, como requisito parcial para elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Daniel Teles Pinheiro

© Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Setorial Campus Caraúbas (BSCA)
Setor de Informação e Referência

S586a Alcantara, Paulo Coelho de.

Cogeração de energia através do bagaço de caju / Paulo Coelho de Alcântara -- Caraúbas, 2015.
40f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Daniel Telles Pinheiro.

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) –
Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

1. Cogeração. 2. Resíduo como combustível. 3. Energia alternativa. I. Título.

RN/UFERSA/BSCA
662.669

CDD:

Bibliotecário: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB-15/700

PAULO COELHO DE ALCANTARA

COGERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DO BAGAÇO DO CAJÚ

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Departamento de Agrotecnologia e
Ciências Sociais para a obtenção do
título de Bacharel em Ciências e
Tecnologia.

DATA DE APROVAÇÃO: 26 / 11 / 2015.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Alvaro Daniel Teles Pinheiro – Orientador – UFERSA


Profa. Dra. Izabelly Larissa Lucena – Primeiro membro – UFERSA


Prof. Dr. Francisco Wilton Miranda da Silva – Segundo membro – UFERSA

DEDICATÓRIA

A Deus, por ser extremamente paciente e piedoso comigo
Aos meus pais que foram companheiros em todas as horas
A minha esposa e filha que dão sentido a minha vida
Aos meus amigos por sempre me apoiar e ajudar

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Álvaro Daniel Teles Pinheiro, braço amigo de todas as etapas deste trabalho.

A minha família, pela confiança e motivação e em especial Maria de Lourdes Alcantara minha mãe.

Aos amigos e colegas, pela força e pela vibração em relação a esta jornada.

Aos professores da UFC e UFRSA pela concessão de informações valiosas para a realização deste estudo.

Aos colegas de Curso, pois juntos trilhamos uma etapa importante de nossas vidas.

Aos professores Sávio Macambira e Vânia Gomes que sempre me incentivaram a estudar mais para dar maior qualidade à minha monografia.

A todos que, com boa intenção, colaboraram para a realização e finalização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“A verdadeira viagem do descobrimento não
consiste em procurar novas paisagens,
mas em ter novos olhos”.

Marcel Proust

ALCANTARA, Paulo Coelho. **Cogeração de energia através do bagaço do caju**. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Bacharelado em Ciência e Tecnologia. Departamento de Agro tecnologia e Ciências Sociais. Universidade Federal Rural do Semiárido, 2015.

RESUMO

Apesar de ser uma das principais culturas sustentáveis do Nordeste, a cajucultura apresenta elevados índices de desperdícios no campo. Quando processado, o pedúnculo do caju produz o etanol de primeira geração, o qual apresenta valor comercial, e o bagaço, sendo este considerado um resíduo sem função. Logo, o objetivo do presente trabalho foi avaliar o uso do bagaço de caju na cogeração de energia em uma planta piloto de produção de etanol. Para tanto, o processo de cogeração foi simulado utilizando o *software* SuperPro Designer. A fim de se comparar os resultados, simulou-se o mesmo processo, contudo, utilizando bagaço de cana-de-açúcar como matéria prima a ser utilizada na cogeração. Todos os modelos matemáticos contidos no programa têm validação estatística bem como análise de sensibilidade, sendo utilizados métodos de otimização de processos. Os resultados mostraram que a produção de energia elétrica através do bagaço de caju foi superior em 3,07% ao obtido para a cana-de-açúcar. Isso ocorre devido ao poder calorífico do bagaço de caju, o qual é superior ao do bagaço da cana-de-açúcar, pois contém maiores teores de lignina e extratos. Portanto, conclui-se que a combustão do bagaço de caju mostrou-se uma opção tecnicamente viável para produção de vapor, uma vez que apresentou uma potência elétrica gerada de 1.871,15 kW, valor esse superior ao obtido para o bagaço de cana-de-açúcar, o qual gerou 1.810,83 kW.

Palavras-chave: Cogeração; simulação; bagaço de caju; geração de vapor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. JUSTIFICATIVA	11
3. OBJETIVOS	13
3.1. OBEJTIVO GERAL.....	13
3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	13
4. REFERENCIAL TEÓRICO	14
4.1. COGERAÇÃO.....	14
4.2. MODELOS DE GERAÇÃO DE VAPOR E ELETRICIDADE.....	15
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
7. CONCLUSÃO.....	32
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	33

1. INTRODUÇÃO

A Cogeração é definida como um processo de produção e utilização combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento de mais de 70% da energia térmica, proveniente dos combustíveis utilizados nesse processo. Segundo Rosa (1998), a racionalidade da cogeração reside na economia de combustível frente à configuração convencional composta de processos distintos que produzam separadamente as mesmas quantidades de calor útil, trabalho e energia elétrica.

Segundo a Cogen (2011), Cogeração consiste no processo de transformação de energia térmica de um combustível em mais de uma forma de energia útil. As formas que são mais frequentes são a energia mecânica, que é utilizada diretamente no acionamento de equipamentos ou para geração de energia elétrica e a energia térmica que é utilizada diretamente no atendimento das necessidades de calor para processos, ou indiretamente na produção de vapor ou em sistemas de refrigeração.

Tantos os ciclos a vapor, como os ciclos de turbinas a gás, ou mesmo a combinação destes ciclos, possuem diversos arranjos e tecnologias disponíveis para geração de potência. Autores como Wylen e Sonntag (1976), Oddone (2001), Coelho (1999) e Walter (1994) estudaram os aspectos termodinâmicos da obtenção de eletricidade por cogeração na cadeia sucroalcooleira, em especial o ciclo Rankine e o ciclo combinado. Os mesmos autores afirmam que no ciclo Rankine, utiliza-se uma caldeira, em que uma fonte de energia (bagaço ou a palha da cana), gerando vapor em alta pressão, com temperatura superior ao ponto de ebulição da água. A liberação do vapor ocorre através de sistemas mecânicos, movimentando máquinas, transferindo calor para processos industriais, ou movimentando turbinas para gerar energia elétrica. O ciclo se completa com o retorno do vapor condensado à caldeira, para ser novamente aquecido. Já no ciclo combinado, uma turbina a gás em alta temperatura movimenta um gerador, sendo transferido o calor do gás para água, que é vaporizada e aciona um segundo gerador, em que ambos produzem energia elétrica.

De acordo com Ortega (2003) a opção pela cogeração deve considerar quatro tipos de potenciais: termodinâmico, técnico, econômico e mercado

potencial. O potencial termodinâmico é definido em bases teóricas, independentemente da existência da tecnologia de conversão, e representa a quantidade máxima de energia a ser produzida. Já o potencial técnico procura definir a tecnologia mais adequada e eficiente para o sistema, enquanto o potencial econômico define os investimentos a serem feitos, visando garantir o retorno em menor tempo possível. O mercado potencial é determinado pela demanda de mercado e para quem será gerada a energia.

A produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil. Segundo dados da (UNICA, 2012) na safra 2010/2011 o Brasil produziu 559.215 (mil toneladas) de cana-de-açúcar, na região Centro-Sul 493.159 (mil toneladas) e na região Norte-Nordeste 66.056 (mil toneladas) de cana-de-açúcar.

O bagaço é o maior subproduto da cana-de-açúcar. Cerca de 200 milhões de toneladas de bagaço são gerados anualmente. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2011), na safra 2010/2011 foram moídos 623,9 milhões de toneladas do produto e a tendência é de aumento para os próximos anos. O potencial de cogeração dessa fonte pode alcançar 14.000 Megawatt (MW) médios em 2021 (UNICA, 2012).

No Nordeste do Brasil, a cajucultura é uma cultura sustentável importante, gerando mais de 2 milhões de toneladas de pedúnculos por ano, o que confere a essa região o reconhecimento mundial de grande produtora de caju (HOLANDA et al., 2010). Contudo, anualmente é registrada uma perda de mais de 1,5 milhão de toneladas desse produto, cerca de 75% do total produzido nos estados nordestinos (HOLANDA et al., 2010; MELLO, 2010).

Logo, o bagaço do caju até então considerado um resíduo sem função da indústria de suco, aparece como uma possível fonte para suprir as necessidades energéticas dessa indústria através da cogeração.

De acordo com Soares (1986), o bagaço de caju *in natura* (úmido) é resultante do processo de retirada do suco (polpa) do pedúnculo do caju, esse deve ser desidratado para garantir sua conservação gerando o bagaço de caju desidratado. Normalmente, as empresas produtoras de suco de caju fazem a secagem do bagaço ao sol, preferencialmente em locais próximos à fábrica, em área cimentada, onde o material é espalhado.

A utilização de *softwares* de simulação de processos como ferramenta de apoio ao desenvolvimento de projetos de plantas industriais apresenta uma série de vantagens. Em muitos casos, a simulação auxilia na tomada de decisão, na redução dos riscos do empreendimento e na definição da gestão estratégica, em níveis tático e operacional. Algumas categorias de atuação dos softwares de simulação de processos são; gestão estratégica, planejamento, controle e gestão operacional, Melhoria de processos e adoção de tecnologia, compreensão e treinamento.

Os simuladores de processos são ferramentas de *software* que permitem o usuário representar e analisar prontamente processos integrados de plantas industriais. Eles têm sido utilizados na indústria petroquímica desde o início de 1960. Conforme HARRISON (2003) os simuladores atualmente estabelecidos para as indústrias petroquímicas incluem: Aspen Plus (da *Aspen Technology, Inc.*), ChemCAD (da *Chemstations, Inc.*), HYSYS (da *Hyprotech, Ltd.* / Engenharia de Software AEA), e PRO / II (da *Simulation Sciences, Inc.*). Estes simuladores são apropriados para tratar dos processos da indústria de petróleo que são tipicamente contínuos, ao contrário dos processos biotecnológicos que são por natureza semi-contínuos ou em batelada.

O desenvolvimento de simuladores específicos para processos biotecnológicos começou em meados de 1980. O BioPro Designer, segundo produto desta categoria, foi inicialmente desenvolvido no Centro de Biotecnologia e Engenharia de Processos (BPEC) do MIT. Tendo obtido uma licença para o posterior desenvolvimento desta tecnologia, a *Intelligen, Inc. (Scotch Plains, NJ)* completou o desenvolvimento do BioPro Designer e passou a comercializá-lo, inicialmente para a Macintosh da Apple e mais tarde para o *Windows* da *MicroSoft*. O SuperPro Designer, sendo uma extensão do BioPro, foi criado para atender indústrias biotecnológicas (como exemplo, a indústria farmacêutica, de agrotóxicos, e de produtos alimentícios), bem como processos de tratamento de água e operações de *down stream* (purificação e tratamento de rejeitos).

De acordo com HARRISON (2003) o SuperPro Designer fornece balanços material e energético, dimensionamento de equipamentos, cálculo de custos, avaliação econômica, avaliação de impactos ambientais, processos de

agendamento de operações, e detecção de gargalos em processos contínuos e em batelada.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo pesquisar as propriedades e características do bagaço de caju para simular o processo de cogeração de energia utilizando o *software* SuperPro Designer.

2. JUSTIFICATIVA

A energia de biomassa é aquela fornecida por materiais de origem vegetal renovável ou obtido pela decomposição de dejetos. O Brasil tem desenvolvido tecnologia a vários anos para a utilização da biomassa como fonte geradora de energia, gerando empregos com pouco recurso financeiro (FIESP/CIESP, 2001).

É esperado que a utilização da biomassa como fonte de energia, aumente consideravelmente, através de uma política clara de comercialização, pela sua vantagem de geração descentralizada, próxima aos pontos de carga e pelos benefícios ambientais decorrentes da sua utilização. Esses benefícios estão atrelados a dois fatores:

- A geração de energia através da biomassa tem um ciclo de Carbono praticamente fechado, configurando pouca emissão de SO_x, menos cinza residual em comparação com o de carvão mineral;
- A conveniência da redução da dependência dos combustíveis fósseis e, em especial, aos derivados de petróleo, que emitem gases mais agressivos ao meio ambiente.

Uma planta de produção industrial consiste de um conjunto de unidades processadoras (reatores, trocadores de calor, bombas, colunas de destilação, evaporadores, tanques, etc.) interligadas de maneira sistemática e racional. O objetivo da planta é converter as matérias-primas nos produtos desejados pelo uso mais econômico das fontes de energia disponíveis. A Simulação do Processo é a ferramenta adequada para o projeto ótimo da planta química e das Malhas de Controle. A Simulação lança mão de Modelos Matemáticos para descrever a dinâmica do processo e realizar previsões do comportamento da Malha de Controle em presença de perturbações inerentes às entradas do processo.

Como resultado final desses programas são calculados os balanços de massa e energia, é feito o dimensionamento dos equipamentos e são efetuados os cálculos dos custos de capital e de operação do processo. A possibilidade de simular o fluxograma “completo” de uma planta de produção torna possível a análise das interações entre as diversas operações. Desse modo é possível a

detecção de pontos críticos no processo, como o efeito da reciclagem de correntes. Por meio dessa análise pode-se assegurar a utilização ótima dos recursos disponíveis com o mínimo de desperdícios. Esse procedimento acarreta um impacto direto na economia do processo, podendo ser um fator decisivo para a sua viabilidade econômica.

Portanto esse trabalho pretende avaliar a simulação do processo de cogeração em uma planta de processo de fabricação de suco de caju utilizando o bagaço do caju para gerar energia elétrica.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

- Avaliar a capacidade energética da produção de energia elétrica pela cogeração utilizando o bagaço do caju através de simulações computacionais.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Comparar os desempenhos das simulações dos fluxogramas de processo do bagaço de caju com o da cana-de-açúcar.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. COGERAÇÃO

Segundo Facioli (2008), na atualidade são cada vez maiores as necessidades energéticas para a produção de alimentos, bens de consumo, bens de serviço e de produção, lazer, e finalmente para promover o desenvolvimento econômico, social e cultural. É assim, evidente a importância da energia não só no contexto das grandes nações industrializadas, mas principalmente naquelas em via de desenvolvimento, cujas necessidades energéticas são ainda mais dramáticas e prementes.

De acordo com a Cogen (2011), a cogeração no Brasil era bastante usada no começo do século XX, pois nessa época ainda não existia nenhuma forma eficiente de geração de energia de maneira centralizada. Dessa forma o consumidor precisava ter instalado sua própria central de geração de energia elétrica, essa situação perdurou até a década de 40. Com o avanço da tecnologia novos conceitos de geração e de interligação de sistemas elétricos surgiram, isso fez com que os sistemas fossem otimizados de forma centralizada e com o apoio das grandes centrais (hidrelétricas e termelétricas) a energia começou a ser distribuída de forma abundante e com baixo custo, com isso o sistema de cogeração perdeu sua participação no mercado.

Contudo com o passar do tempo, começaram a acontecer às crises no setor energético, devido a dificuldades do governo em garantir o abastecimento de energia elétrica, que fosse compatível com o ritmo do crescimento econômico.

Crises energéticas sempre trazem à tona a vulnerabilidade do sistema de geração concentrada em poucos combustíveis, tornando assim, as fontes alternativas, soluções que podem atender de forma satisfatória as comunidades (KAZAY; LEGEY, 2002). A partir da crise mundial do petróleo de 1973, prestou-se maior atenção à biomassa como fonte alternativa, e a partir daí surgiram no mundo todo, vários programas nacionais visando obter maior eficiência nos sistemas de combustão e gaseificação da biomassa, conforme cita o trabalho de Oliveira e Lobo (2002). Políticas, legislações e

financiamentos são indispensáveis a fim de viabilizar o uso de fontes alternativas, que no momento ainda são muito dispendiosas e pouco eficientes.

Atualmente a cogeração se mostra uma alternativa, devido à instabilidade das grandes hidrelétricas causadas pela quantidade insuficiente de chuvas e os impactos ambientais causados por elas. As indústrias conseguem com a cogeração uma forma simples, segura e barata, na questão energética, sem contar os benefícios ambientais.

As caldeiras (geradores de vapor) funcionam como trocadores de calor, ou seja, transferem energia de uma fonte térmica a um fluido (normalmente a água) produzindo vapor. A energia térmica é obtida principalmente pela queima de combustíveis, tais como carvão, lenha, óleos derivados do petróleo, gás natural, e os combustíveis deste estudo: bagaço e palhiço de cana-de-açúcar (SISTEMAS..., 2004).

Leme (2005) diz que a eficiência da caldeira é influenciada pelo tipo de queima. As mais antigas e menos eficientes são as que usam queima em leito fixo, porém ainda são comuns no setor por terem sido instaladas nas primeiras unidades produtivas. Já as caldeiras com queima em suspensão possuem maior eficiência por serem mais modernas, possibilitando maior capacidade de operação, e têm sido a opção quando da substituição de equipamentos antigos.

A gaseificação do combustível antes da combustão é outra opção para o uso da energia do combustível sólido. A gaseificação transforma qualquer combustível sólido ou líquido em uma mistura de gases energéticos, por meio da oxidação parcial a temperatura elevada. Esta transformação pode ser realizada em vários tipos de reatores, chamados gaseificadores (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

4.2. MODELOS DE GERAÇÃO DE VAPOR E ELETRICIDADE

No *software* SuperPro Designer, a caldeira, equipamento usado para gerar vapor, é alimentado continuamente por 3 linhas contendo respectivamente: água, combustível e ar. A água de alimentação pode conter algumas impurezas, sendo a corrente utilizada para transportar combustíveis, no caso bagaço de cajú enquanto que o fluxo de ar é utilizado para transportar o oxigênio para a combustão. O fluxo de combustível pode também conter

fontes de oxigênio. Ambas as correntes podem também conter componentes inertes. Estes componentes podem ser do tipo gasoso ou líquido / sólido que não participam das reações de combustão. Após a combustão, os gases gerados e quaisquer componentes gasosos inertes na mistura de combustível + ar são transferidos para a corrente de saída, gases de exaustão. Qualquer componente líquido / sólido inerte da mistura combustível + ar é transferido para a corrente de saída, fluxo de cinzas.

Finalmente, a água de alimentação em vapor sai através da corrente de saída de vapor. Este modelo simula a combustão completa do combustível na presença de ar e a transferência de calor para água de alimentação, a fim de gerar vapor. Os cálculos baseiam-se na composição elementar do combustível, em reações de combustão e, no balanço energético global do gerador de vapor. O fluxo da água de alimentação ou o fluxo de combustível que pode ser ajustado para satisfazer o balanço energético global. O fluxo de ar é sempre ajustado para os requisitos de oxigênio.

O usuário especifica também os seguintes parâmetros através da interface desta operação: percentual de excesso de oxigênio, as temperaturas do fluxo de cinza e o fluxo de gás de combustão, a pressão e temperatura do vapor, percentual das perdas totais calor para o ambiente, a composição elementar de compostos de combustíveis. Os componentes puros que estão associados com elementos que podem estar presentes nas correntes de saída.

Com base nos parâmetros acima referidos, o modelo calcula o seguinte: a exigência de fluxo de ar e o percentual de umidade do ar, o calor total do sistema por massa de combustível, o calor que está disponível para a produção de vapor por massa de combustível, a temperatura e a pressão de vapor gerada (se eles não foram definidos pelo usuário), o calor requerido para a geração de vapor por massa de vapor, a exigência de combustível por massa de vapor, o fluxo da corrente opcionalmente ajustado (ou água de alimentação de combustível) e o fluxo e a composição das correntes de gás de combustão e cinzas.

O modelo exige que a composição dos componentes do combustível seja especificada. São considerados: os elementos que são esgotados após combustão (o carbono, hidrogênio e enxofre); elementos que podem estar presentes nos produtos finais (oxigênio, nitrogênio, água e cinzas). Os três

primeiros elementos são automaticamente associados com um componente puro registrado. Se um componente combustível inflamável contém elementos adicionais, a sua composição deve ser adicionado à composição de cinzas.

Com base na composição de componentes de combustível, a fração molar de cada elemento de um componente combustível é calculado como:

$$x_{i,j} = w_{i,j} * M_i / M_j$$

onde

- $w_{j,i}$, onde i é a fração de massa do elemento j no componente de i ;
- M_i é o peso molecular e o componente de ordem i , e
- M_j é o peso molecular do elemento j .

O fluxo de massa total de cada elemento na corrente de combustível é calculado como:

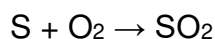
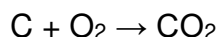
$$m_{j,fuel} = \sum w_{j,i} m_i = m_{fuel} \sum w_{i,j} w_i ,$$

Onde:

- m_i é o fluxo de massa do componente i do fluxo de combustível;
- m_{fuel} é o fluxo de massa total da corrente de combustível;
- w_i é a fração de massa do componente i no fluxo de combustível.

O fluxo de combustível pode também incluir componentes puros que não contêm qualquer um dos elementos considerados acima que serão considerados componentes inertes. Se estiverem no estado gasoso são transferidos para o fluxo de gás de combustão caso estejam no estado líquido / sólido, eles são transferidos para o fluxo de cinzas.

O modelo considera combustão completa e as reações de combustão correspondentes são:



A partir da estequiometria das reações anteriores, os moles dos gases de combustão produzidos por mole de componente combustível a partir de uma combustão completa da corrente de combustível são calculados como:

$$x_{p,CO_2,i} = x_{C,i}$$

$$x_{p,H_2O,i} = x_{H_2,i}$$

$$x_{p,SO_2,i} = x_{S,i}$$

O fluxo total de massa de um gás de combustão produzido pela combustão completa de todos os componentes combustíveis da corrente de combustível é calculado como:

$$m_{p,j} = \sum_i (x_{p,j,i} n_i M_j) = m_{fuel} \sum_i x_{p,j,i} M_j / M_i w_i$$

onde n_i é o fluxo molar do componente i da corrente de combustível. Os moles de oxigênio teórico (estequiométrico) consumido por mole de componente combustível são calculados como:

$$x_{r,O_2,i} = x_{C,i} + 0,5 * x_{H_2,i} + x_{S,i}$$

O fluxo de massa total de oxigênio teórico consumido para o fluxo de combustível é calculado como:

$$\begin{aligned} m_{r,O_2} &= \sum_i (x_{r,O_2,i} n_i M_{O_2}) = m_{fuel} \sum_i (x_{r,O_2,i} n_i M_{O_2}) / M_i w_i \\ &= m_{fuel} w_{r,O_2} \end{aligned}$$

onde, w_{r,O_2} é a massa total de oxigênio consumido por teórica massa de combustível.

O fluxo da corrente de ar é sempre ajustado para a combustão completa, considerando uma percentagem especificada de excesso de oxigênio. O fluxo de massa necessária de oxigênio no fluxo de ar é calculado como:

$$\begin{aligned} m_{O_2,ar} &= (m_{r,O_2} - m_{O_2,fuel}) (1 + \% \text{ excesso } O_2) \\ &= m_{fuel} (w_{r,O_2} - w_{O_2,fuel}) (1 + \% \text{ excesso } O_2) \end{aligned}$$

O fluxo de massa necessário da corrente de ar é então calculado como:

$$m_{ar} = m_{O_2,ar} / w_{O_2,ar} = m_{fuel} \frac{w_{r,O_2} - w_{O_2,fuel}}{w_{O_2,ar}} (1 + \% \text{ excesso } O_2)$$

onde $w_{O_2,ar}$ é a fração mássica de oxigênio na corrente de ar. A umidade do ar é calculada como percentagem de ar seco a partir da seguinte expressão:

$$\text{Umidade \%} = \frac{w_{H_2O,ar}}{1 - w_{H_2O,ar}} 100$$

Onde, $W_{H_2O,ar}$ é a fração mássica de água na corrente de ar. O fluxo de massa de oxigênio restante não queimado, que é transferido para a corrente de gás de combustão, é calculado como:

$$m_{O_2,gC} = m_{O_2,ar} + m_{O_2,fuel} - m_{r,O_2} = m_{fuel} * \\ [(w_{r,O_2} - w_{O_2,fuel}) (1 + \% \text{ excesso } O_2) + \\ \sum_i w_{O_2,i} w_i - w_{r,O_2})]$$

Em componentes Puros os valores de pressão crítica, temperatura crítica, ponto de ebulição normal, constantes de Antoine são muitas vezes utilizados em conjunto com fórmulas matemáticas empíricas ou semi-empíricas (isto é, equações de estado) para prever propriedades termodinâmicas como densidade, entalpia.

Esses valores citados anteriormente são mais frequentemente medidos experimentalmente, mas em alguns casos, eles são indiretamente estimados e também podem ser usados para estimar os chamados pseudo-componentes da mistura. Por exemplo, pode estimar-se uma mistura (de composição conhecida) pseudo-pressão crítica, a temperatura e o factor acêntrico usando constantes críticas e a composição dos componentes puros e a fórmula matemática chamada regra de mistura. Uma vez que as constantes dos pseudo-componente são calculados pode-se utilizá-los com uma equação de estado de prever propriedades de mistura a diferentes pressões e temperaturas (com a mesma composição).

As seguintes constantes de componentes puros são utilizados nos cálculos termodinâmicos pelo SuperPro Designer no equilíbrio líquido-vapor (ELV): Peso molecular, pressão crítica, Temperatura Crítica, fator de compressibilidade, fator acêntrico de Pitzer, energia livre de Gibbs de formação de um gás ideal, a 298,15 K e 1 atm, ponto de ebulição normal, ponto de congelamento normal, capacidade calorífica do gás ideal, as constantes de

Antoine de pressão de vapor, capacidade de calorífica de líquido ou sólido a pressão constante.

Atualmente, SuperPro Designer suporta os seguintes modelos de equações de estado para a previsão de densidades, entalpias e fugacidade para componentes e misturas puras (vapor e líquidos): Gás ideal, Virial, equação cúbica, Van der Waals, Redlich-Kwong, Soave-Redlich-Kwong, and Peng-Robinson, Lee-Kesler.

O calor de combustão utilizado nos cálculos corresponde ao poder calorífico inferior (PCI) da corrente de combustível à temperatura da corrente de combustível. A partir da estequiometria das reações de combustão, o calor molar de combustão de cada componente combustível é calculado como:

$$\Delta H_{c,i} = (x_{p,CO_2,i} \Delta H_{f,CO_2} + x_{p,H_2O,i} \Delta H_{f,H_2O(g)} + x_{p,SO_2,i} \Delta H_{f,SO_2}) - (\Delta H_{f,i} + x_{r,O_2,i} \Delta H_{f,O_2})$$

onde ΔH_f é a entalpia molar de formação de cada elemento na temperatura da corrente de combustível. É calculado como:

$$\Delta H_f = \Delta H_f^0 + c_p (T - T_0)$$

Onde:

- ΔH_f^0 é a entalpia de formação padrão do elemento,
- C_p é o calor específico médio do elemento,
- T_0 é a temperatura normal (25 °C);
- T é a temperatura da corrente de combustível.

Para a água, a entalpia de formação padrão corresponde ao líquido. A entalpia padrão de formação de vapor de água produzido a partir de combustão é calculada como:

$$\Delta H_{f,H_2O(g)}^0 = \Delta H_{f,H_2O(l)}^0 + \Delta H_{v,H_2O(l)}^0$$

onde ΔH_v^0 é o calor latente de vaporização da água, a 25 °C. A massa específica do calor total de combustão da corrente de combustível (assumindo ser um valor positivo) é calculada como:

$$\Delta H_{c,fuel} = - \sum_i x_i \Delta H_{c,i} / M_i$$

O balanço global de energia fornece o calor total do sistema por massa de combustível que é calculado como:

$$\Delta H_{tot} = \Delta H_{c,fuel} + (m_{ar}/m_{fuel}) \Delta H_{ar} - w_{H_2O(l),fuel} \lambda_{H_2O,fuel}$$

Onde:

- ΔH_{ar} é a entalpia específica do fluxo de ar em relação à temperatura do combustível;
- $w_{H_2O(l),fuel}$ é a fração de água líquida no combustível;
- $\lambda_{H_2O(l),fuel}$ é o calor específico latente de vaporização da água contida na corrente de combustível;

O calor específico líquido que está disponível para geração de vapor por massa de combustível é calculado como:

$$\Delta H_{disp} = \Delta H_{tot} (1 - \% \text{ perdas}) - (m_{ash}/m_{fuel}) \Delta H_{ash} - (m_{gc}/m_{fuel}) \Delta H_{gc}$$

Onde:

- % de perdas é a porcentagem de perdas totais de calor para o ambiente;
 - m_{ash} é o fluxo de massa da corrente de cinzas;
 - ΔH_{ash} é a entalpia específica do fluxo de cinzas à temperatura especificada do fluxo de cinzas com respeito a temperatura do combustível;
 - m_{gc} é o fluxo de massa da corrente de gás de combustão;
 - ΔH_{gc} é a entalpia específica do fluxo de gás de combustão à temperatura especificada de gás de combustão em relação à temperatura do combustível.
- O calor requerido para a geração de vapor por massa de vapor de água é calculada como:

$$\Delta H_{vapor} = H_{vapor} - H_{alim}$$

Onde:

- H_{vapor} é a entalpia específica de vapor;
- H_{alim} é a entalpia específica da água de alimentação.

A entalpia específica da água de alimentação e do vapor são calculados com base nas respectivas temperaturas e pressões pela calculadora de vapor. A taxa de transferência de calor líquido para o vapor deve ser igual à taxa de variação de entalpia de vapor. O requisito de combustível correspondente para a geração de vapor é determinado pela razão de massa de combustível pela massa de vapor conforme:

$$m_{fuel}/m_{vapor} = \Delta H_{vapor}/\Delta H_{disp}$$

Onde, m_{vapor} é o fluxo de massa do vapor.

O ajuste do fluxo de combustível em relação a água de alimentação é feito pelas seguintes opções que estão disponíveis para resolver equação descrita acima) :

- Ajuste do Fluxo de água de alimentação para o calor Disponível;
- Ajuste do fluxo de combustível para o calor requerido.

Se a opção (a) é for selecionada, o fluxo da corrente de combustível é definido pelo usuário e o fluxo de vapor é calculada a partir da equação acima. O fluxo da água de alimentação é ajustado igual ao fluxo calculado de vapor. Se a opção (b) for selecionada, o fluxo de água de alimentação é definida pelo usuário e o fluxo de combustível é calculada a partir da equação acima.

Pressão do Vapor e Temperatura possuem as seguintes opções de especificação que estão disponíveis para a pressão de vapor gerado:

- Definir por usuário;
- igual à pressão da corrente de alimentação.

Se a opção (a) é selecionada, a pressão de vapor especificado pode ser maior que ou igual à pressão da água de alimentação. Se a pressão de vapor é mais elevada do que a pressão da água de alimentação, é implícito que água de alimentação é comprimida por uma bomba para a pressão especificada antes da entrada para o gerador de vapor. Se a opção (b) é selecionada, a pressão de vapor de água é definida como igual à pressão da água de alimentação. Por conseguinte, a água de alimentação deve ser a pressão de vapor desejada antes da entrada para o gerador de vapor.

Os seguintes opções de especificação estão disponíveis para a temperatura do vapor gerado:

- (a) Definida pelo usuário;
- (b) Igual a temperatura de saturação da pressão do vapor.

Se a opção (a) é selecionada a temperatura do vapor pode ser maior ou igual à temperatura de saturação. Em outras palavras, o vapor pode ser saturado ou superaquecido. Se a opção (b) for selecionada, o vapor saturado é gerado. Note-se que o valor indicado para a temperatura e a pressão de vapor, bem como água de alimentação, deve estar dentro dos limites da Calculadora Vapor: (T, P) deve ser maior do que o ponto triplo (0 ° C, 611,657 Pa) e inferior ou igual a (2000 ° C, 100 MPa). Portanto, se a temperatura do vapor é definida como a sua temperatura de saturação, a pressão de vapor de água (ou água de alimentação, se a pressão de vapor é ajustada igual ao da água de alimentação) deve situar-se dentro dos limites da curva de equilíbrio líquido-vapor da água (611,213 Pa - 22,064 MPa).

O software gera modelos de operação de expansão de vapor e geração de energia elétrica em uma turbina a vapor em um único estágio ou em múltiplos estágios. As turbinas a vapor convertem a energia térmica de materiais gasosos, em energia mecânica. Jatos de vapor (gás de alta pressão) fornecem energia cinética a uma série de rotores e assim o gás se expande e arrefece a baixa pressão. Esta situação física cai entre os extremos isentrópicos e isotérmicos para calcular a potência fornecida no eixo da turbina de vapor em cada fase de expansão. As equações usadas são:

$$Potência = F(h_1 - h_2) = \varepsilon_i F(h_1 - h_{2s}) = \varepsilon_i W_i$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0(1 - x)(1 - f)$$

Onde:

- F é a taxa de fluxo de massa de vapor;
- h_1 é a entalpia específica do vapor na entrada;
- h_2 é a entalpia específica de vapor na saída;
- h_{2s} é a entalpia específica de vapor durante a expansão isentrópica;
- W_i é a saída de potência teórica de expansão isentrópica;
- ε_i é a eficiência isentrópica da fase de expansão;
- ε_0 é o valor isento de condensado de eficiência isentrópica;

- X é a fração de condensado;
- f é a fração de perdas termodinâmicas mecânicas adicionais de eficiência que podem existir entre o rotor e o eixo de turbina (por exemplo, devido à turbulência e o atrito) e que não são contabilizados pelo valor de ε_0 .

Para cada fase de expansão, as entalpias específicas de vapor, a sua temperatura de saída e a fração de condensado são calculados com base na calculadora vapor embutido. A potência total do eixo é calculada como a soma das contribuições de saída de potência individuais de todas as fases de expansão.

O programa sugere as seguintes opções de especificação disponíveis para eficiência isentrópica por fase de expansão: definida pelo usuário, utilização de um modelo embutido ou utilizar um modelo personalizado de eficiência, se a primeira opção for selecionada, a eficiência por estágio deve ser especificada diretamente. Se a segunda opção for selecionada, o valor isento de condensado de eficiência por estágio pode ser estimada a partir de um modelo embutido no que diz respeito ao eixo de energia. O modelo baseia-se na eficiência versus os dados de potência por Ulrich (1984), que foram ajustados a uma curva quadrática. O modelo é válido na faixa de 100 kW - 1.5 MW.

A eficiência atual por estágio é então corrigida para o condensado e perdas adicionais de eficiência podem ser especificadas diretamente. A fração de condensado na saída do estágio é estimada simultaneamente de forma iterativa, de modo que combine o valor devolvido pela calculadora vapor embutido em condições de entalpia de pressão de saída. Se a terceira opção for selecionada, o usuário pode editar os parâmetros da curva quadrática. A eficiência por andar é então calculada como no caso anterior. A eficiência global é calculada por:

$$\varepsilon_{tot} = \frac{Potência_{tot}}{W_{tot}}$$

Onde, $Potência_{tot}$ é a potência total do eixo e W_{tot} é a potência teórica total na saída calculada como a soma sobre todas as fases de expansão.

Opcionalmente, o gás de escape da turbina pode ser dirigido para um condensador de vapor de superfície implícita. Um condensador de vapor de superfície pode ser utilizado para expandir o vapor a pressões subatmosféricas

e assim, aumentar a potência de saída da turbina. Nesse caso, o recurso de equipamento que hospeda a operação é, de fato, uma turbina de condensação e a corrente de saída retornada pelo modelo é o condensado que sai do condensador. O modelo baseia-se na especificação das propriedades do agente de arrefecimento e a temperatura de funcionamento do condensador. A pressão de operação do condensador é assumida como sendo igual à pressão de saída dos gases de escape da turbina.

Os seguintes opções de especificação estão disponíveis para especificar a temperatura de funcionamento do condensador:

(a) Definir por Usuário

(b) Saturação Temperatura

Se a opção (b) é selecionada, a temperatura de funcionamento do condensador é definida igual à temperatura de saturação de vapor na pressão de saída. Isto é calculado com base na calculadora vapor embutida. Se a opção (a) for selecionada, o usuário pode especificar uma temperatura mais baixa que a temperatura do vapor de saturação, a fim de simular o sub-resfriamento do vapor. Para calcular o direito de resfriamento do condensador, a seguinte equação é utilizada:

$$Q = \frac{F (h_{in,c} - h_{out,c})}{\varepsilon_c}$$

Onde:

- Q é o dever de resfriamento do condensador;
- $h_{in,c}$ é a entalpia específica de vapor nas condições de entrada do condensador;
- $h_{out,c}$ é a entalpia específica de condensado nas condições de funcionamento do condensador;
- ε_c é a eficiência da transferência de calor no condensador.

A entalpia específica de vapor e condensado são calculados com base na calculadora embutida. A pressão e a temperatura de condensação são definidas igual à temperatura e pressão de saturação de vapor na descarga da turbina.

Finalmente, um gerador de energia pode ser acoplado ao eixo da turbina e converter a energia do eixo em eletricidade. Para calcular a potência elétrica total produzida pela turbina, a seguinte equação é utilizada:

$$Potência\ elétrica = \frac{Potência_{tot}}{\varepsilon_G}$$

Onde, ε_G é a eficiência da conversão de potência de eixo em potência elétrica.

No projeto, se a potência do eixo calculada exceder a potência máxima do eixo da turbina, o programa assume várias unidades que funcionam em paralelo com uma potência total igual à potência calculada. Se a opção de tamanho de equipamento está em modo de avaliação, o usuário especifica a potência nominal e o número de unidades. Se a saída de potência calculada por unidade exceder a potência nominal, uma mensagem de aviso é exibida informando que o usuário aumente a potência nominal ou número de unidades, ou reduza a taxa de fluxo de massa da corrente de alimentação.

Se uma turbina múltiplos estágios é usada, o usuário também deve especificar a pressão de saída e o percentual drenado na entrada do fluxo de massa de gás em cada estágio intermediário, e o modelo calcula a eficiência (se não for definido pelo usuário), potência no eixo e temperatura de saída por estágio, bem como a eficiência global e a potência total do veio. Além disso, se os gases de escape da turbina que alimentam o condensador de vapor de superfície, o usuário deve especificar também a temperatura de funcionamento do condensador e o agente de transferência de calor. Em seguida, o modelo irá calcular a carga de arrefecimento do condensador, e a temperatura de saída de água de condensação. Se a turbina é usada para acionar um gerador de energia, o usuário também deve especificar a eficiência de conversão de potência de eixo em energia elétrica no gerador, e o modelo também irá calcular a energia elétrica que é produzida.

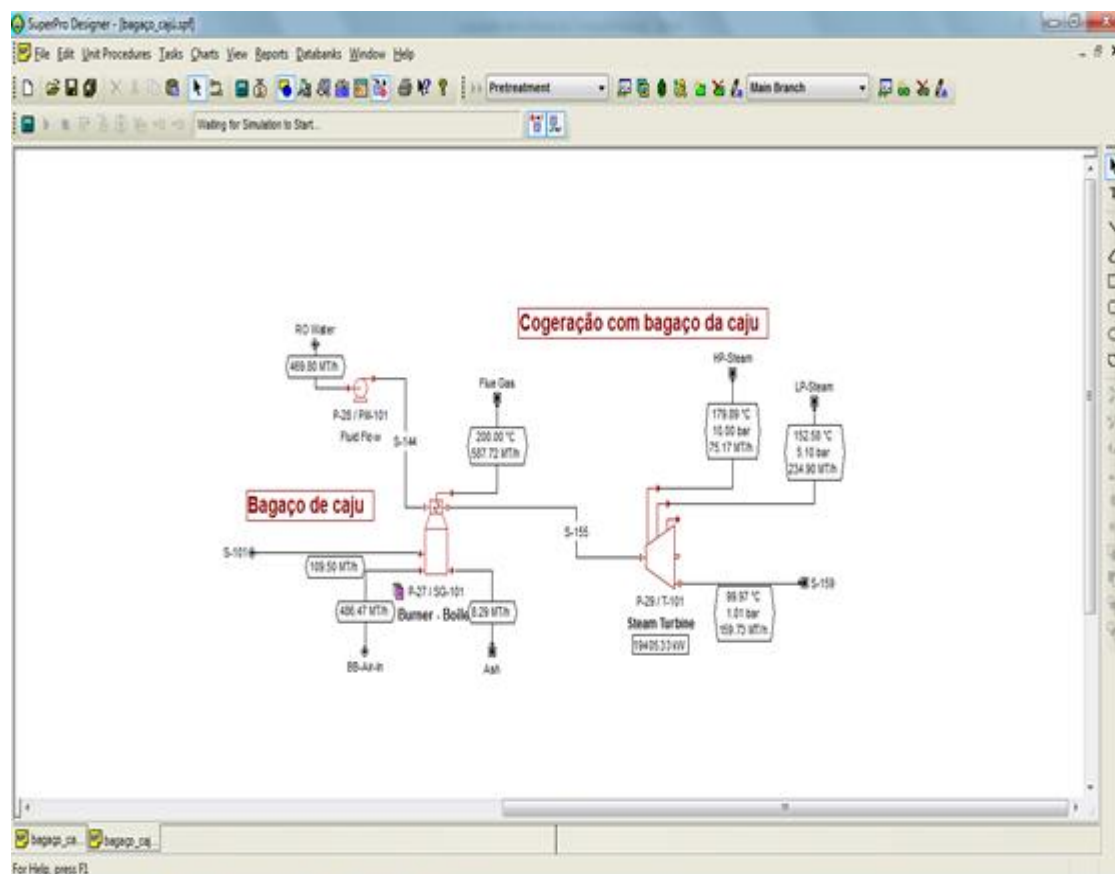
5. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Universidade Federal Rural do Semiárido, durante um período de 90 dias. Foram feitas pesquisas na internet para levantamento de dados e informações sobre o caju e seus derivados e sobre a cogeração do bagaço da cana-de-açúcar as quais serviram como referencial nesse estudo possibilitando o fluxograma proposto para o processo de cogeração do bagaço do pedúnculo de caju.

Para a realização desse trabalho foi usado um notebook com a configuração básica: processador intel i5-2450M (2,5GHz), 6 Gb de memória ram, HD 540 Gb e o software SuperPro Designer versão 9.0.

Conforme (SANTOS, 2012) o sistema de cogeração foi projetado com uma caldeira para produção do vapor, uma bomba de alimentação de água para a caldeira e uma turbina a vapor de múltiplo estágio de acordo com a Figura1.

Figura 1: Fluxograma do processo de cogeração de energia com bagaço de caju



Fonte: Autoria própria.

Inicialmente a composição do combustível usado na caldeira deve ser fornecida ao *software*. A Tabela 1 e 2 apresentam valores da composição em percentual mássico do caju e da cana-de-açúcar.

Tabela 1. Composição química do bagaço utilizado no sistema.

Composição (% massa)				
	Pedúnculo do caju ^a	Pedúnculo do caju ^b	Pedúnculo do caju ^c	Média pedúnculo
Celulose	20,9	18,31	19,21	19,47
Hemicelulose	16,3	27,18	12,05	18,51
Lignina	33	23,91	38,11	31,67
Outros	29,2	30	30,03	29,74
Cinzas	0,6	0,6	0,6	0,6

Fonte: ROCHA^a, 2014; LIMA^b, 2012; ROCHA^c, 2009.

Tabela 2. Composição química do bagaço utilizado no sistema.

Composição (% massa)		
	Bagaço de cana ^a	Bagaço de cana ^b
Celulose	43	46,86
Hemicelulose	31	27,25
Lignina	23	26,27
Outros	1	-
Cinzas	2	1,61

Fonte: O'HARA^a, 2011; CANILHA^b, 2007;

Foram realizadas simulações computacionais utilizando simulador de processos químicos SuperPro Designer. Como primeiro passo foi proposto o processo, escolhendo os equipamentos. O primeiro é a caldeira (*burner-boiler*), esse equipamento possui três correntes de entrada: a matéria prima (bagaço de caju), a água (vapor) e o ar (% O₂ em excesso). Para fornecer a entrada de matéria prima é necessário a composição química dessa substância conforme a Tabela 1, que pode ser uma soma de componentes puros ou uma mistura, que devem ser cadastrados no software caso já não existam no programa.

O fluxo mássico de pedúnculo de caju na entrada do processo foi determinado tomando como base o trabalho de PINHEIRO (2015), o qual

dividiu a produção anual de pedúnculo do município de Serra do mel – RN (31.500 toneladas) pelos meses de maior produção (92 dias), resultando assim em uma vazão mássica de aproximadamente 14,27 ton/h. São apresentados os dados de entrada de acordo com a Tabela 3.

O próximo dado a ser fornecido ao programa é o percentual em excesso de oxigênio que foi de 30%, segundo (CARVALHO JUNIOR, 2004) para combustíveis sólidos entre 30 e 60 % de excesso de oxigênio devem ser empregados para que se obtenha uma combustão completa do combustível. O programa estabelece uma relação entre o fluxo de massa, da entrada de matéria, com a quantidade de água usada para gerar vapor, portanto a quantidade de água não precisa ser fornecida. Porém, uma vez foi colocada uma bomba, é necessário informar qual o fluido será utilizado na bomba, a temperatura e pressão na entrada e a pressão na saída. O fluido utilizado foi a água a 25^o C e 1,013 bar de pressão, sendo a pressão na saída 10,213 bar.

Tabela 3. Dados de entrada do processo

Dados de entrada da caldeira	
Fluxo mássico(T/h)	14,27
Temperatura(°C)	38,15
Pressão(bar)	1,013
% excesso de O ₂	30

Fonte: PINHEIRO, 2015;.CARVALHO JUNIOR, 2004.

De posse desses dados, o *software* calculou a entalpia, a temperatura e todas as outras grandezas físicas e químicas necessárias. Fornecendo também as três correntes na saída da caldeira (a corrente de saída das cinzas que fica na base, a dos gases de exaustão e a corrente de vapor de água a 180,80^o C e 10,213 bar a qual foi ligada a turbina a vapor para geração de energia elétrica).

As seguintes variáveis do modelo de expansão e das condições de operação da turbina de múltiplo estágio que foram fornecidas ao *software*:

- A pressão que o gás é expandido na última fase da turbina, onde uma turbina de condensação foi usada, igual a pressão de operação do condensador 1,013 bar;
- Deve ser marcado o item para especificar que uma turbina de condensação esta sendo usada;

- Foi selecionado o item água de refrigeração da lista de agentes de refrigeração disponíveis;
- A pressão que o gás é expandido nos estágios intermediários da turbina e a fração de gás de admissão que é extraída na saída do estágio;
- Foi marcado o item que especifica que o turbo gerador está sendo usado;
- O tipo de energia na operação selecionado é o std *power* de uma lista de tipos de energia disponíveis;
- Foi fornecido o percentual de eficiência na conversão de potência de eixo em potência elétrica de 90%.

O mesmo procedimento foi realizado para o bagaço de cana-de-açúcar. Utilizaram-se as mesmas condições de operação do bagaço de caju, alterando apenas a composição do bagaço, de acordo com a proposta do trabalho de fazer uma comparação com o processo já implantado da cana-de-açúcar.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade de processamento considerada foi de 31.500 toneladas por ano, segundo (PINHEIRO, 2015) observa-se que para cada 1000 toneladas de pedúnculo processado, são produzidas 900 toneladas de suco (aproximadamente 870 m³) e 100 toneladas de bagaço de caju.

Conforme foi descrito na metodologia as condições de operação para o bagaço de caju o *software* calculou a quantidade de ar necessária na entrada da caldeira, o fluxo mássico na entrada da bomba, a corrente de saída das cinzas que fica na base, a dos gases de exaustão, o fluxo mássico da corrente de vapor de água e de condensado na saída conforme a Tabela 4. O mesmo procedimento para a cana-de-açúcar de acordo com a Tabela 5.

Tabela 4. Propriedades da corrente de entrada do bagaço de caju.

Corrente	H ₂ O Trat.	H ₂ O Trat.	Ar	Bagaço de caju
Fonte	Entrada	Bomba	Entrada	Entrada
Destino	Bomba	Boiler	Boiler	Boiler
Temperatura(°C)	25,00	25,09	38,15	25,00
Pressão(bar)	1,01	10,21	1,01	1,01
Densidade (g/L)	994,70	994,67	1,18	1.676,08
Entalpia Total (kW-h)	0,00	6,74	0,00	99,79
Entalpia esp. (kcal/kg)	0,00	0,09	0,00	6,02

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 5 . Propriedades da corrente de entrada do bagaço de cana.

Corrente	H ₂ O Trat.	H ₂ O Trat.	Ar	Bagaço de cana
Fonte	Entrada	Bomba	Entrada	Entrada
Destino	Bomba	Boiler	Boiler	Boiler
Temperatura	25,00	25,09	25,00	25,00
Pressão	1,01	10,21	1,01	1,01
Densidade (g/L)	994,70	994,67	1,18	1,228.09
Entalpia Total (kW-h)	0,00	6,54	0,00	101.79
Entalpia esp. (kcal/kg)	0,00	0,09	0,00	6.14

Fonte: Autoria Própria.

O balanço de massa por componentes e as propriedades das correntes de saída do bagaço de caju, calculadas pelo *software* estão representadas pela Tabelas 6 e 7 respectivamente. Os valores obtidos foram expressos em toneladas métricas por ano.

Tabela 6. Balanço de massa por componente do bagaço de caju (em MT/ano).

Componente	Entrada (1)	Saída (2)	(1) – (2)
Cinzas	641	641	0
CO ₂	0	153.111	- 153.111
Celulose	20.464	0	20.464
Hemicelulose	19.455	0	19.455
Lignina	33.287	0	33.287
Nitrogênio	385.174	385.174	0
Oxigênio	31.259	0	31.259
Outros sólidos	116.931	5,568	111.363
RO Water	492.802	492,802	0
Water	0	62,749	- 62.749
Total	1.100.014	1.100.046	31

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 7. Propriedades das correntes de saída geradas pelo bagaço do caju.

Corrente	Gás de exaustão	Vapor Boiler	Cinzas	Vapor HP	Vapor LP	Condensado
Fonte	Boiler	Boiler	Boiler	Turbina	Turbina	Turbina
Temp. (°C)	200,00	180,80	250,00	179,89	152,58	99,97
Pressão(bar)	1,01	10,21	1,01	10,00	5,10	1,01
Densid. (g/L)	0,75	4,87	958,47	4,78	2,60	967,38
Entalpia Total (kW-h)	10.455,25	49.178,15	262,65	7.863,65	24.125,23	1.810,60
Entalpia esp. (kcal/kg)	117.45	691,14	209,28	690,71	678,10	74,84

Fonte: Autoria Própria.

O balanço de massa por componentes e as propriedades das correntes de saída do bagaço de cana-de-açúcar, calculadas pelo *software* estão representadas pela Tabelas 8 e 9 respectivamente. Os valores obtidos foram expressos em toneladas métricas por ano.

Tabela 8. Balanço de massa por componente do bagaço de cana (em MT/ano).

Componente	Entrada (1)	Saída (2)	(1) – (2)
Cinzas	2.102	2.102	0
CO ₂	0	150.969	- 150.969
Celulose	45.196	0	45.196
Hemicelulose	32.583	0	32.583
Lignina	24.175	0	24.175
Nitrogênio	379.785	379.785	0
Oxigênio	1.051	0	1.051
Outros sólidos	115.295	5.490	109.805
<i>RO Water</i>	471.220	471.220	0
<i>Water</i>	7.912	69.783	- 61.871
Total	1.079,319	1.079,350	31

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 9. Propriedades das correntes de saída geradas a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

Corrente	Gás de exaustão	Vapor Boiler	Cinzas	Vapor HP	Vapor LP	Condensado
Fonte	Boiler	Boiler	Boiler	Turbina	Turbina	Turbina
Temp. (°C)	200,00	180,80	250,00	179,89	152,58	99,97
Pressão(bar)	1,01	10,21	1,01	10,00	5,10	1,01
Densid. (g/L)	0.74	4.87	2.000,00	4,78	2,60	967,38
Entalpia Total (kW-h)	11.121,54	47.791,65	6,24	7.641,95	23.445,06	1.759,55
Entalpia esp. (kcal/kg)	125,06	691,14	20,23	690,71	678,10	74,84

Fonte: Autoria Própria.

Na comparação dos resultados entre as Tabelas 6 e 8 foi verificado uma produção de cinzas aproximadamente três vezes maior pelo bagaço de cana-de-açúcar do que o bagaço de caju. Isso indica a maior quantidade de sais minerais na matéria orgânica queimada, provavelmente oriunda do solo da região que foi cultivada. Já a quantidade produzida de CO₂ foi praticamente a mesma.

A entalpia total do vapor de alta pressão e do vapor de baixa pressão no bagaço de caju foram superiores em cerca de 2,8% em relação ao do bagaço de cana-de-açúcar. Justificando uma maior quantidade de energia cinética

transferida aos rotores da turbina (vapor de alta) e posteriormente expandindo e arrefecendo (vapor de baixa).

Os resultados do desempenho da produção de energia elétrica pela cogeração utilizando o bagaço do caju, através de simulações computacionais no programa SuprePro designer, mostraram-se promissores pois na avaliação a produção de energia foi superior ao da cana-de-açúcar. A simulação apontou resultados de produção de energia elétrica usando a biomassa dos bagaços de caju e cana-de-açúcar conforme a tabela 10, onde a conversão da potência de eixo em potência elétrica foi de 90%.

Tabela 10. Potência elétrica e total gerada na turbina a vapor.

	Potência gerada na turbina a vapor	
	Potência total de eixo (kW)	Potência elétrica (kW)
Bagaço de caju	2.079,06	1.871,15
Bagaço de cana	2.012,03	1.810,83

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com os resultados obtidos ficou comprovado que o poder calorífico da biomassa, além da umidade, é muito influenciado pela constituição química, principalmente a lignina e extrativos (resinas, óleos-resinas, matérias graxas, óleos, etc.) que estão presentes em maior quantidade no bagaço de caju do que no bagaço da cana-de-açúcar. O poder calorífico é mais alto quanto maior o teor de lignina e extrativos, porque os mesmos contêm menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose (celulose e hemicelulose) logo produzem menos água na combustão.

7. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para a geração de energia elétrica foram satisfatórios pois é possível gerar energia elétrica a partir do bagaço de caju e é alternativa na região nordeste. Na comparação do bagaço de caju com o bagaço de cana a simulação apresentou incremento de 3,07% em potência gerada porém para que esse resultado tenha possíveis aplicações industriais é necessário um estudo aprofundado de viabilidade econômica do processo.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Carvalho Júnior, J. A., McQuay, M. Q., Princípios de Combustão Aplicada, Editora da UFSC, 2007.

COELHO S. T. **Mecanismos para implementação da co-geração de eletricidade a partir de biomassa:** um modelo para o Estado de São Paulo. 1999. 278 f. Tese (Doutorado) – Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **A Geração termoeletrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil. Análise do desempenho da safra 2009-2010.** Mar. 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_gerao_termo_baixa_res.pdf>. Acesso em 22 de out. 2015.

Conceito e Tecnologias. Disponível em: http://www.cogen.com.br/cog_conceito.asp. Acesso em: 27/03/2015.

CORRÊA NETO, V; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucroalcooleiro.** Brasília, DF: Sustainable Energy Technology, 2002. 116 p.

FACIOLI, Dimas. **Energia Alternativa**, publicado em 18/04/2008. Disponível em: http://www.zebuparaomundo.com/zebu/index.php?option=com_content&task=view&id=988&Itemid=38. , Acesso em 27 de mar. 2015.

FIESP/CIESP. Ampliação da oferta de energia através da biomassa. Disponível em: [https://www.google.com.br/search?q=\(FIESP%2FCIESP%2C+2001\).&rlz=1C1CAFB](https://www.google.com.br/search?q=(FIESP%2FCIESP%2C+2001).&rlz=1C1CAFB). Acesso em: 20 de ago. 2015.

HOLANDA, J. S.; TORRES, J. F; OLIVEIRA, M. T; FERREIRA FILHO, L.; HOLANDA, A. C. **Da carne de caju à carne de cordeiro.** Natal: Emparn, 2010. 42 p. (Emparn. Boletim de pesquisa, 35).

O'HARA, I. M. Cellulosic ethanol from sugarcane bagasse in Australia: exploring industry feasibility through systems analysis, techno-economic assessment and Pilot plant development. 2011. 175f. Tese (PhD em Engenharia Química) Faculdade de Ciência e Tecnologia de Queensland, Queensland, 2011.

KAZAY, H. F.; LEGEY, L. F. L. Fontes alternativas de energia: o que o Brasil tem feito? **Revista Brasil Sempre**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 10, p. 2-9, 2002.

LIMA, J. R. Caracterização físico-química e sensorial de hambúrguer vegetal elaborado à base de caju. Ciênc. Agrotec., Lavras, v. 32, n. 1, p. 191 – 195, jan./fev., 2008.

MELLO, C. **Sebrae busca reduzir desperdício de 75% na produção de caju.** Agência Sebrae de Notícias - Os pequenos negócios em pauta, 2010. Disponível em: <http://www.agenciasebrae.com.br/noticia.kmf? canal= 199&cod =10780265>. Acesso em: 4 mar. 2015.

ODDONE, D. C. **Co-geração:** uma alternativa para produção de eletricidade. 2001. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

OLIVEIRA, J. M. C.; LOBO, P. C. Avaliação do potencial energético de resíduos de biomassa amazônica. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, **Anais...** Campinas. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0119n> Acesso em: 10 março 2015.

ORTEGA FILHO, S. *O potencial da agroindústria canavieira do Brasil.* [Serrana, PHB Industrial, 2003]. 9 p.

PETRIDES, D. SuperPro *Designer® User Guide.* Disponível em: <www.intelligen.com>. Data de acesso 14/08/2015.

HARRISON, R. G.; TODD, P. W.; RUDGE, S. R.; PETRIDES, D. *Bioseparations Science and Engineering*, Oxford University Press, 2003.

ROSA, L. P. **New partnerships for sustainable development and key issues or operationalising the clean developing mechanism.** Rio de Janeiro: Global Change Center, PPE-COPPE/UFRJ, 1998.

SANTOS, F.A. Cogeração e comercialização de energia elétrica nas usinas de açúcar e etanol. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/?q=pt-br/evento/cogera>. Data de acesso 14/08/2015.

SISTEMAS geradores de vapor. Dijan Química Consultoria e Engenharia Ltda. 2004. Disponível em: <http://www.dijan.com.br/sistemas-vapor.htm>. Acesso em: 15 jan. 2015.

SOARES, J.B. **O caju. Aspectos tecnológicos.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil. p.256, 1986.

ROCHA, M. V. P.; GOMES BARRETO, R. V.; MELO, V. M. M.; GONÇALVES, L. R. B. Evaluation of Cashew Apple Juice for Surfactin Production by *Bacillus subtilis* LAMI008. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, v. 155, p. 63-75, 2009.

ROCHA, M. V. P., RODRIGUES, T. H. S., DE ALBUQUERQUE, T. L., GONÇALVES, L. R. B., DE MACEDO, G. R. Evaluation of dilute acid pretreatment on cashew apple bagasse for ethanol and xylitol production. *Chemical Engineering Journal* (1996), v. 243, p. 234-243, 2014.

PINHEIRO, A. D. T. Viabilidade técnica e econômica da produção de etanol a partir do suco de caju por *Saccharomyces cerevisiae* floculante. 2015. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO. **Consecana – Dados**. Abr. 2011. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=%7B6ED1BE65-C819-4721-B5E7-312EF1EA2555%7D>>. Acesso em: 11 nov. 2015.

WALTER, A. C. S. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e geração termelétrica junto ao setor sucro-alcooleiro**. 1994. 283f. Tese (Doutorado) - Unicamp, Campinas, 1994.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1976.