

RAFAEL ALVES AMARAL

**SIMULAÇÃO E ESTIMATIVA DE CUSTOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA A PARTIR DE GENÓTIPOS DE CAPIM ELEFANTE**

Dissertação apresentada a  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Química, para obtenção do título de  
*Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

A485s  
2018  
Amaral, Rafael Alves, 1991-  
Simulação e estimativa de custos da geração de energia  
elétrica a partir de genótipos de capim elefante / Rafael Alves  
Amaral. – Viçosa, MG, 2018.  
xi, 78 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f. 73-78.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Biomassa. 3. Métodos de  
simulação. 4. Capim-elefante. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química. II. Título.

CDD 22. ed. 333.79

RAFAEL ALVES AMARAL

**SIMULAÇÃO E ESTIMATIVA DE CUSTOS DA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA A PARTIR DE GENÓTIPOS DE CAPIM ELEFANTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de março de 2018.

  
Antonio Marcos de Oliveira Siqueira

  
Roberto Precci Lopes

  
Fábio de Ávila Rodrigues  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, que iluminou cada passo meu, do início ao final deste trabalho, colocando em meu caminho pessoas tão importantes que me ajudaram de forma direta e indireta nesse mestrado.

Ao meu orientador e amigo Fábio de Ávila Rodrigues, por toda a paciência, ensinamentos e empenho na orientação ao longo de todas as etapas da construção desse trabalho. À Universidade Federal de Viçosa pela estrutura, e à EMBRAPA – Juiz de Fora pelo fornecimento da caracterização do capim elefante. Aos coorientadores Profa. Angélica de Cássia Oliveira Carneiro, e Jailton Da Costa Carneiro pelas sugestões.

À minha família, principalmente meus pais José Maria do Amaral e minha mãe Ronilda Aparecida Alves do Amaral, minha avó Nair da Silveira Alves, meu tio Hélio Rafael Soares e meu irmão Jeisson Alves Amaral, que contribuíram para eu chegar até aqui. Agradeço também aos meus amigos de Ipatinga, Diamantina, Viçosa, todos amigos da vida, por toda amizade e momentos que me ajudaram a distrair da pressão do mestrado.

Ao LaSiP por toda a estrutura, e também pela equipe de trabalho envolvida, que tornaram a rotina mais leve e sempre estiveram dispostos a ajudar.

À Kamila, minha namorada, por estar ao meu lado em todos os momentos durante este trabalho, sejam eles para comemorar ou lamentar. Você é parte fundamental desta conquista.

A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação pelo auxílio financeiro.

*“ Tudo aquilo que sou,  
devo a um anjo:  
minha mãe. ”  
(Abraham Lincoln)*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz de energia elétrica do Brasil. ....	7
Figura 2. Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa. ....	9
Figura 3. Unidade térmica geradora a vapor com superaquecimento. ....	21
Figura 4. Diagrama de blocos do processo de conversão de biomassa em energia elétrica. ....	26
Figura 5. Fluxograma da simulação para a determinação do poder calorífico superior. ....	29
Figura 6. Calorímetro IKA® C 200. ....	29
Figura 7. Diagrama de fluxo de processo (PFD) da geração de energia elétrica a partir do capim elefante. ....	33
Figura 8. Bloco Reator-Caldeira. ....	34
Figura 9. Bloco Turbina. ....	35
Figura 10. Bloco Resfriamento-Reciclo. ....	36
Figura 11. Valores preditos e medidos do trabalho gerado na turbina. ....	45
Figura 12. Gráfico medido e predito dos valores de PCS seco. ....	48
Figura 13. Gráficos scores e loadings para as 40 amostras de capim elefante. ....	49
Figura 14. Gráfico de coeficiente de regressão para componentes do capim elefante. ....	50
Figura 15. Preços de venda e custos médios das 40 amostras de capim elefante. ....	68
Figura 16. Custos dos equipamentos para as pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar. ....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela I. Matriz de energia elétrica de derivados da biomassa no Brasil (ANEEL, 2016). .....	12
Tabela II. Caracterização físico química de diferentes variedades do capim elefante. .	16
Tabela III. Especificações técnicas dos equipamentos para usina termoelétrica com pressão de operação da caldeira a 40 bar. ....	24
Tabela IV. Especificações técnicas dos equipamentos para usina termoelétrica com pressão de operação da caldeira a 70 bar. ....	25
Tabela V. Especificações técnicas dos equipamentos para usina termoelétrica com pressão de operação da caldeira a 140 bar. ....	25
Tabela VI. Balanços de massa e energia (40 bar). ....	37
Tabela VII. Balanços de massa e energia (70 bar). ....	37
Tabela VIII. Balanços de massa e energia (140 bar). ....	38
Tabela IX. Potência encontrada na simulação realizada com equipamentos com pressão de operação da caldeira a 40 bar. ....	39
Tabela X. Potência encontrada na simulação realizada com equipamentos com pressão de operação da caldeira a 70 bar. ....	40
Tabela XI. Potência encontrada na simulação realizada com equipamentos com pressão de operação da caldeira a 140 bar. ....	41
Tabela XII. Validação por determinação de trabalho teórico e experimental. ....	44
Tabela XIII. Validação por determinação do PCS. ....	46
Tabela XIV. Custos de equipamentos com pressão de 40 bar. ....	51
Tabela XV. Custos de equipamentos com pressão a 70 bar. ....	51
Tabela XVI. Custos de equipamentos com pressão a 140 bar. ....	51
Tabela XVII. Capital fixo investido em equipamentos (pressão a 40 bar). ....	52
Tabela XVIII. Capital fixo investido em equipamentos (pressão a 70 bar). ....	53
Tabela XIX. Capital fixo investido em equipamentos (pressão a 140 bar). ....	53
Tabela XX. Valores de investimento de capital fixo e capital de giro. ....	54
Tabela XXI. Custos anuais das matérias primas. ....	55
Tabela XXII. Custos anuais das utilidades. ....	55
Tabela XXIII. Demonstrativo de dados requeridos para calcular custo total. ....	56

Tabela XXIV. Custos de produção anual a pressão de 40 bar.....	58
Tabela XXV. Custos de produção anual a pressão de 70 bar.....	59
Tabela XXVI. Custos de produção anual a pressão de 140 bar.....	60
Tabela XXVII. Fluxo de caixa para o genótipo de capim elefante N° 7. ....	63
Tabela XXVIII. Estudo de viabilidade (40 bar).....	64
Tabela XXIX. Estudo de viabilidade (70 bar).....	65
Tabela XXX. Estudo de viabilidade (140 bar).....	66
Tabela XXXI. Preço médio mensal da energia por região entre 01/2017 e 01/2018 (R\$/KWh) (CCEE, 2017). ....	69
Tabela 32. Valor de venda da energia de acordo com a vida útil da planta industrial. ..	70



**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
BWR	Back Work Ratio
CCEE	Câmera de comercialização de energia elétrica
CTP	Cost Total Product
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCI	Fixed Capital Investment
GHG	Greenhouse Gases
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IEA	International Energy Agency
LAPEM	Laboratório de Painéis e Energia da Madeira
LINQ	Laboratório de Instrumentação e Quimiometria
MACRS	Modified Accelerated Cost Recovery System
MG	Minas Gerais
MME	Ministério de Minas e Energia
PCS	Poder Calorífico Superior
PCI	Poder Calorífico Inferior
SGEE	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estuda
TCI	Total Capital Investment
UFV	Universidade Federal de Viçosa
WC	Working Capital

## RESUMO

AMARAL, Rafael Amaral, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2018. **Simulação e análise técnica-econômica da produção de energia elétrica a partir de genótipos de capim elefante.** Orientador: Fábio de Ávila Rodrigues. Coorientador: Angélica de Cássia Oliveira Carneiro.

Desde a oficialização das preocupações com o clima global e estabelecido as responsabilidades ambientais, a comunidade internacional tem realizado diversos trabalhos buscando a melhoria do ecossistema terrestre. Diversas propostas estão sendo estudadas em universidades, em grupos ambientalistas, em certos órgãos governamentais e em setores da iniciativa privada, e entre essas propostas está a produção de energia por biomassa. Escolheu-se a utilização do capim elefante para este trabalho devido o potencial de produção de energia da planta, e por ela requerer poucos nutrientes para seu desenvolvimento, destacando-se entre as forrageiras tropicais, intensificando seu uso no Brasil. O objetivo do trabalho foi estudar a viabilidade técnica e econômica da conversão de genótipos de capim elefante em energia elétrica utilizando o programa computacional Aspen Plus®, avaliando a influência da composição química, umidade e cinzas no potencial energético da planta. De acordo com os resultados apresentados nas simulações e nas análises estatísticas (método dos mínimos quadrados parciais) a variação genética do capim elefante que apresentou melhor resposta foi BAGCE 23 - Napier S.E.A., influenciado principalmente pela maior concentração de lignina e menor concentração de umidade e cinzas. A validação da simulação e dos resultados apresentados neste trabalho deu-se comparando os valores de poder calorífico superior (PCS) obtidos tanto pelo Aspen Plus® quanto pelo Calorímetro IKA® C 200, e validou-se também comparando a potência teórica e experimental da conversão dos genótipos do capim elefante em energia elétrica. Realizou-se simulações com diferentes valores de pressão do vapor na turbina, e entre todos os resultados, os que apresentaram melhores preços de venda (R\$/KWh) obtidos em cada configuração dos equipamentos foram: 1,22 para 40 bar, 1,17 para 70 bar e 1,16 para 140 bar.

## ABSTRACT

AMARAL, Rafael Amaral, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2018. **Simulation and technical-economic analysis of the electric energy production from elephantgrass genotypes.** Advisor: Fábio de Ávila Rodrigues. Co-advisor: Angelica de Cássia Oliveira Carneiro.

Since the formalisation of global climate concerns and environmental responsibilities, the international community has undertaken a number of works to improve the terrestrial ecosystem. Several proposals are being studied in universities, environmental groups, certain government agencies and private sector sectors, and among these proposals is the production of energy by biomass. The use of elephantgrass for this work was chosen because of the potential of energy production of the plant, and because it requires few nutrients for its development, it stands out among the tropical forages, intensifying its use in Brazil. The objective of this work was to study the technical and economic viability of the conversion of elephantgrass genotypes to electric energy using Aspen Plus programa computacional, evaluating the influence of chemical composition, moisture and ashes on the energy potential of the plant. According to the results presented in the simulations and statistical analyzes (partial least squares method), the genetic variation of elephantgrass that presented the best response was BAGCE 23 - Napier SEA, influenced mainly by the higher lignin concentration and lower concentration of moisture and ash . The validation of the simulation and the results presented in this work was made by comparing the values of higher calorific value (PCS) obtained by both the Aspen Plus® and the Calorimeter IKA® C 200, and also validated by comparing the theoretical and experimental power of the conversion of elephantgrass genotypes in electrical energy. Simulations were carried out with different values of vapor pressure in the turbine, and among all the results, the ones with the best sales prices (R \$ / KWh) obtained in each equipment configuration were: 1.22 for 40 bar, 1.17 for 70 bar and 1.16 for 140 bar.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	4
2.1.	OBJETIVO GERAL .....	4
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
3.	ESTADO DA ARTE.....	6
3.1.	ENERGIA RENOVÁVEL.....	6
3.2.	ENERGIA DE BIOMASSA.....	8
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA .....	10
3.4.	CAPIM ELEFANTE.....	11
3.5.	PROGRAMA COMPUTACIONAL ASPEN PLUS® .....	13
4.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E MATERIAIS .....	15
4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO CAPIM ELEFANTE.....	15
4.2.	ESTEQUIOMETRIA DAS REAÇÕES .....	18
4.3.	SIMULAÇÃO .....	19
4.4.	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	30
4.5.	ANÁLISE ECONÔMICA .....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
5.1.	SIMULAÇÃO.....	32
5.1.1.	VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO .....	43
5.1.1.1.	DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL .....	44
5.1.1.2.	DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO .....	46
5.2.	ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	48
5.3.	ANÁLISE ECONÔMICA .....	50
5.3.1.	CUSTOS DE EQUIPAMENTOS.....	50
5.3.2.	CAPITAL FIXO INVESTIDO E CAPITAL DE GIRO.....	52
5.3.3.	CUSTOS MATÉRIA PRIMA .....	54

5.3.4.	CUSTOS DE UTILIDADES .....	55
5.3.5.	CUSTO TOTAL ANUAL DO PRODUTO.....	56
5.3.6.	ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO .....	61
6.	CONCLUSÃO .....	72
7.	REFERÊNCIAS.....	73

## 1. INTRODUÇÃO

A energia há pouco mais de 100 anos era derivada principalmente de biomassa, e essa liderança histórica foi drasticamente reduzida devido a introdução do carvão, e após alguns anos, pelo crescimento da produção de petróleo e gás natural (CORTEZ, 2008).

A porcentagem que representa a utilização do petróleo e gás como fonte de energia aumentou no período Pós-Revolução Industrial devido a facilidade de transporte da matéria-prima, o crescimento do número de motores de combustão interna utilizados e as consequências ambientais da forma primitiva com que as biomassas eram extraídas (GOLDEMBERG, 2009).

Esses combustíveis de origens fósseis (carvão, petróleo e gás), segundo o Ministério de Minas e Energia - MME (2017), representam atualmente mais de 60% de toda energia do Brasil, enquanto suas representatividades a nível mundial são de aproximadamente 87%. O Brasil tem ainda mais destaque tratando-se apenas de energia elétrica, apresentando valores de aproximadamente 74% de fontes renováveis, enquanto o mundo utiliza apenas 23,8%.

A intensificação da aplicação do petróleo, gás e carvão mineral, levou a uma crescente preocupação com a questão energética, pois soma-se ao conhecimento sobre a finitude dos combustíveis fósseis, os graves danos causados ao meio ambiente, os preços elevados do petróleo e a pressão internacional para a redução das emissões dos gases de efeito estufa (Greenhouse Gases - GHG) (LIBONI e CEZARINO, 2012).

Segundo o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa - GHG (2016), o aumento do consumo energético, juntamente com o crescimento populacional e o avanço de tecnologias, fez com que a demanda por energia crescesse exponencialmente, tendo por consequência o setor energético como terceiro maior emissor de gás poluente, sendo responsável por 19% dos gases liberados, enquanto a mudança de uso da terra e floresta foi responsável por 51%, o setor de agropecuária por 22,0%, o setor de processos industriais por 4% e resíduos, aproximadamente 4%.

Diante do relatado nos parágrafos anteriores, devido a fatores como o conhecimento da finitude de combustíveis fósseis e a contribuição negativa de sua utilização para com o meio ambiente, torna-se necessária a busca por fontes alternativas de energia que supram a demanda crescente de energia, e espera-se crescimento significativo de pesquisas por fontes alternativas e mais atrativas economicamente (CARDOSO, 2012), (FONTOURA, 2011), (OLIVEIRA, 2016).

No Brasil, um fator preocupante é a dependência da energia elétrica gerada por hidrelétricas, 61% segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2017), pois a utilização de água dos reservatórios vivência um momento crítico devido à crise hídrica que persiste no país desde 2013. Acrescenta-se ainda, o fato do Brasil estar em desenvolvimento econômico, e segundo International Energy Agency - IEA (2012), países com essas características poderão aumentar suas necessidades em energia originadas de hidrelétricas em até 20% até o ano de 2035 (COELHO et al., 2017).

Neste contexto, a procura por meios menos agressivos aos ecossistemas regionais, que sejam mais confiáveis, ambientalmente e economicamente, tendo uma produção constante ao longo do ano, sofrendo assim pouca interferência a longo prazo, tem sido intensificada, e algumas fontes alternativas de energia tem ganhado oportunidade no mercado.

Uma dessas fontes alternativas de energia, a biomassa, tem ganhado destaque, sendo utilizada em diversos países como solução energética, principalmente na União Europeia. A produção de bioenergia e a sua comercialização apresentaram um aumento nos últimos anos, e prevê-se a continuidade desse crescimento para as próximas décadas (SMEETS e FAAIJ, 2010).

Com o cenário apresentado, tendo conhecimento da crise energética, dependência de combustíveis fósseis, problemas ambientais relacionados ao setor energético, dependência de hidrelétricas, entre outros, demonstra-se necessário a realização de mais estudos relacionados as novas fontes de energias renováveis, como a biomassa. O Mercado energético marcado pela globalização e sustentabilidade exige que propostas por melhorias se provem altamente eficientes em termos de consumo da

matéria prima, sendo estas de alto rendimento e fácil adaptação (TAVARES e SILVA, 2017).

Tratando-se de biomassa, uma das soluções sugeridas no mercado energético para diminuir a dependência para com os combustíveis fósseis, e que atualmente no Brasil, segundo a ANEEL (2017), representa 8,9% da matriz energética, destaca-se a presença de 3 usinas termoelétricas que utilizam o capim elefante, o que representa 65.700 kW, aproximadamente 0,46% do setor de conversão de biomassa em energia elétrica.

Destacando-se na matriz energética, o capim elefante apresentou-se como uma alternativa cultural válida para realizar-se estudos de viabilidade técnica e econômica de conversão de biomassas em energia elétrica.

Mirando métodos eficientes, que demandam curto espaço tempo para operar, este trabalho propôs-se utilizar a simulação como recurso de avaliação. Para tal dissertação, manipulou-se os dados dos genótipos do capim elefante no programa computacional Aspen Plus®.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal foi analisar a viabilidade técnica e econômica da conversão de genótipos de capim elefante em energia elétrica utilizando o programa computacional de simulação Aspen Plus®.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Simular o processo de geração de energia elétrica de diferentes genótipos de capim elefante utilizando o programa computacional Aspen Plus®;
- Avaliar a influência da composição química, umidade e cinzas na potência gerada utilizando o método dos mínimos quadrados parciais;
- Validar os resultados encontrados neste trabalho, correlacionando os valores médios de poder calorífico superior (PCS) do capim elefante obtidos experimentalmente com os valores de PCS obtidos no programa computacional Aspen Plus;
- Realizar estudo de viabilidade econômica utilizando o programa computacional Aspen Plus®.

## ESCOPO DO TRABALHO

Estabelecido os objetivos da pesquisa, o presente trabalho apresentará seis capítulos, e serão eles: Introdução, Objetivos, Estado da Arte, Procedimentos Metodológicos e Materiais, Resultados e Discussão e Conclusão.

O capítulo Introdução foi elaborado de modo a apresentar o trabalho para o leitor, para contextualizar o tema abordado, fundamentar a necessidade da pesquisa.

O capítulo Objetivos foi criado para que o leitor de forma detalhada, tenha o conhecimento das ações que se pretende alcançar, estabelecendo estreita relação com as particularidades relativas à temática trabalhada.

O capítulo Estado da arte foi inserido para relacionar o tema do trabalho com pesquisas semelhantes de outros autores e estudiosos, interagindo com elas por meio de análises, e evidenciando a relevância deste estudo.

O capítulo de Procedimentos Metodológicos e Materiais foram expostos todos os processos adotados durante o trabalho para realizar as análises, no caso deste trabalho, a simulação de conversão da biomassa em energia elétrica no programa computacional Aspen Plus®.

No capítulo Resultados e Discussão, os resultados obtidos são apresentados, obtendo-se alguns objetivos específicos deste trabalho. Neste capítulo, ainda se realizou análises sobre os valores encontrados como respostas nas simulações, respondendo todos os objetivos propostos nesta pesquisa.

Para finalizar, o capítulo Conclusão expõe as ideias atingidas nesta pesquisa, tendo por consequência atingida os objetivos esperados do trabalho.

### **3. ESTADO DA ARTE**

#### **3.1. ENERGIA RENOVÁVEL**

Em 1970 despertou-se a preocupação de grandes centros urbanos com a qualidade do ar, e cientistas tornaram-se cada vez mais convincentes de que a temperatura da Terra estava subindo de forma abrupta, diferentemente do previsto e mais acelerada que registros anteriores, demonstrando clara intensificação da ação do efeito estufa e por consequência o fenômeno do aquecimento global. Assim, elevou-se a importância da busca por soluções bioenergéticas, e menos poluentes (LEITE e LEAL, 2007).

Soma-se a esta ocorrência, os dois choques de petróleo da década de 70, que incentivaram países importadores, como o Brasil, a investirem em alternativas que reduzissem a dependência dos mesmos com energia gerada por meio de combustíveis fósseis (LEITE e LEAL, 2007).

Desde a oficialização dessas preocupações com o clima global e estabelecido responsabilidades ambientais, a comunidade internacional tem realizado diversos atos, tratados, acordos e protocolos buscando a melhoria do ecossistema terrestre. Em meio a tantos atos, estão os principais incentivadores na busca por soluções a Convenção-Quadro das Nações Unidas Sobre Mudança do Clima e o Protocolo de Kyoto (CERON e PORTO, 2013).

Diversas propostas estão sendo estudadas em universidades, em grupos ambientalistas, em certos órgãos governamentais, em setores da iniciativa privada, entre outros, a fim de aprimorar o conhecimento sobre energias renováveis sustentáveis e conseqüentemente poder aumentar a sua influência na matriz energética (SIMIONI, 2006).

O Brasil apresenta uma condição extremamente favorável quando comparado com o resto do mundo, podendo investir em pesquisas e aparatos tecnológicos para

aproveitar todo o potencial de algumas fontes de energia disponíveis, tais como: hidráulica, solar, eólica, dos oceanos e de biomassa (JANNUZZI, 2003).

Países em desenvolvimento como Brasil tem aumentado anualmente a demanda por energia elétrica, e conseqüentemente, com a procura por sustentabilidade, tem estimulado o uso cada vez maior de bioenergia, tais como hídrica, eólica, biomassa e solar (COELHO et al., 2017). Para suprir essa demanda de energia, segundo a EPE – Empresa de Pesquisa Energética (2017), no Brasil foram investidos mais de R\$ 155 bilhões em forma de financiamento para 769 iniciativas de energias renováveis no período de 2003 a 2015.

Ao analisar a matriz energética do Brasil, nota-se que o investimento tem apresentado resultados positivos, ao observar na Figura 1, onde energias de fontes não renováveis representam apenas aproximadamente 23,08%.

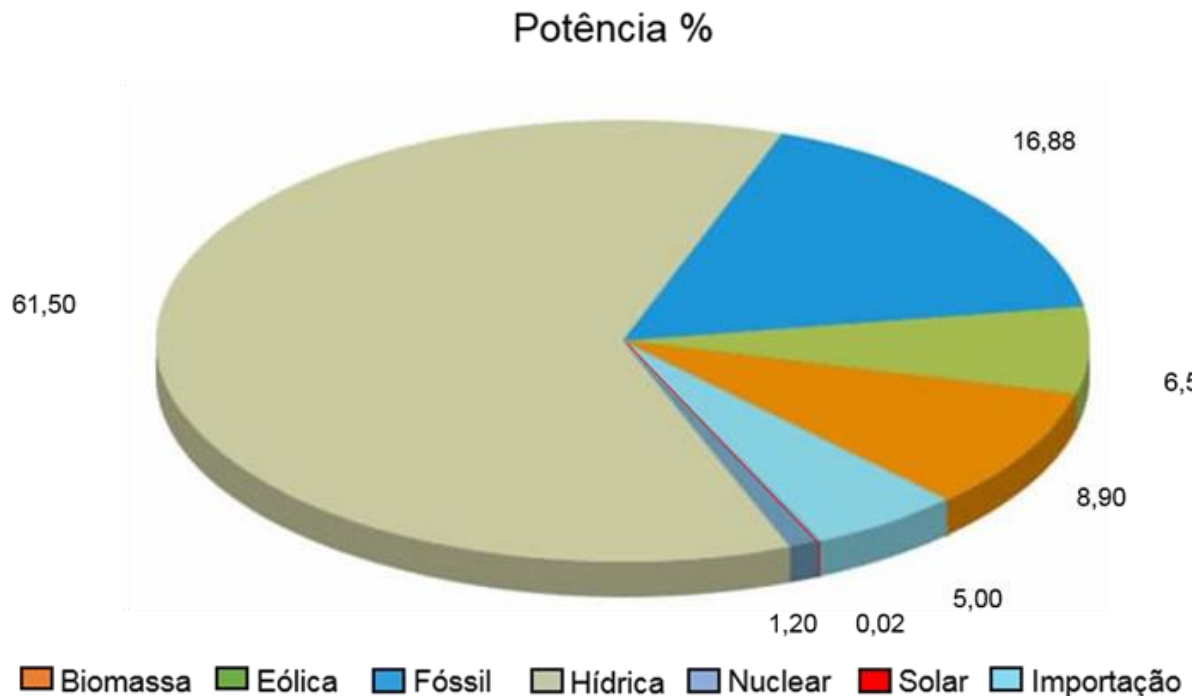


Figura 1. Matriz de energia elétrica do Brasil.

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2016.

Embora a energia hidrelétrica seja considerada limpa, tem havido crescente preocupação sobre a sua sustentabilidade ambiental nos últimos anos, pois o Brasil, com uma dependência muito grande sobre este tipo de energia, tem sofrido com a crescente crise hídrica, a maior deste 1950, especialmente em épocas com ausência de chuvas (COELHO et al., 2017).

Neste contexto, a responsabilidade ambiental aumenta a demanda por pesquisas sobre novas fontes de energia que não agridam o ecossistema e que possam sustentar o momento de crescimento econômico do país. Assim, a biomassa ganha relevância e se apresenta como considerável alternativa para energia renovável e biocombustíveis (FERREIRA, 2012).

### **3.2. ENERGIA DE BIOMASSA**

Energia a partir da biomassa é um dos maiores focos de pesquisa, justamente por ser considerada limpa, renovável e disponível em abundância (em vegetais, lixo urbano, estrume de animais e etc.) (SANTOS, 2008). Além disso, apresenta outras vantagens, como eliminação de resíduos diversos, diminuindo, assim, a necessidade de deposição de lixo em aterros, também contribui para o incentivo ao controle maior sobre florestas e auxilia na geração de empregos na agricultura e silvicultura, ajudando a evitar o êxodo rural (SIMIONI, 2006).

Para que se possa explorar o potencial de utilização da biomassa, é importante determinar a disponibilidade de biomassa energética em um país ou região, considerar as restrições de ordem ecológica (preservação do meio ambiente), administrativo (incluindo a social e política), econômico (viabilidade da conversão em energia quando comparado com outras possíveis finalidades da matéria prima ou outras biomassas) e tecnológica (meios de operação) (NOGUEIRA, LORA e TROSSERO, 2000).

Para uma alta eficiência de conversão em energia, é muito importante a relação “processamento adequado x biomassa ideal”, onde essa biomassa tem que apresentar

alta produtividade, baixa carência de insumos agrícolas e irrigação e baixo custo de plantio (SEABRA, 2008).

Pode-se obter a biomassa de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, de resíduos orgânicos e biofluidos (CORTEZ, 2008), o que é considerado um ponto positivo dada a existência de diferentes rotas de conversão da biomassa em energia, seja na forma de calor, de gás de combustão, biocombustível entre outros (SEABRA, 2008), como pode ser observado na Figura 2.

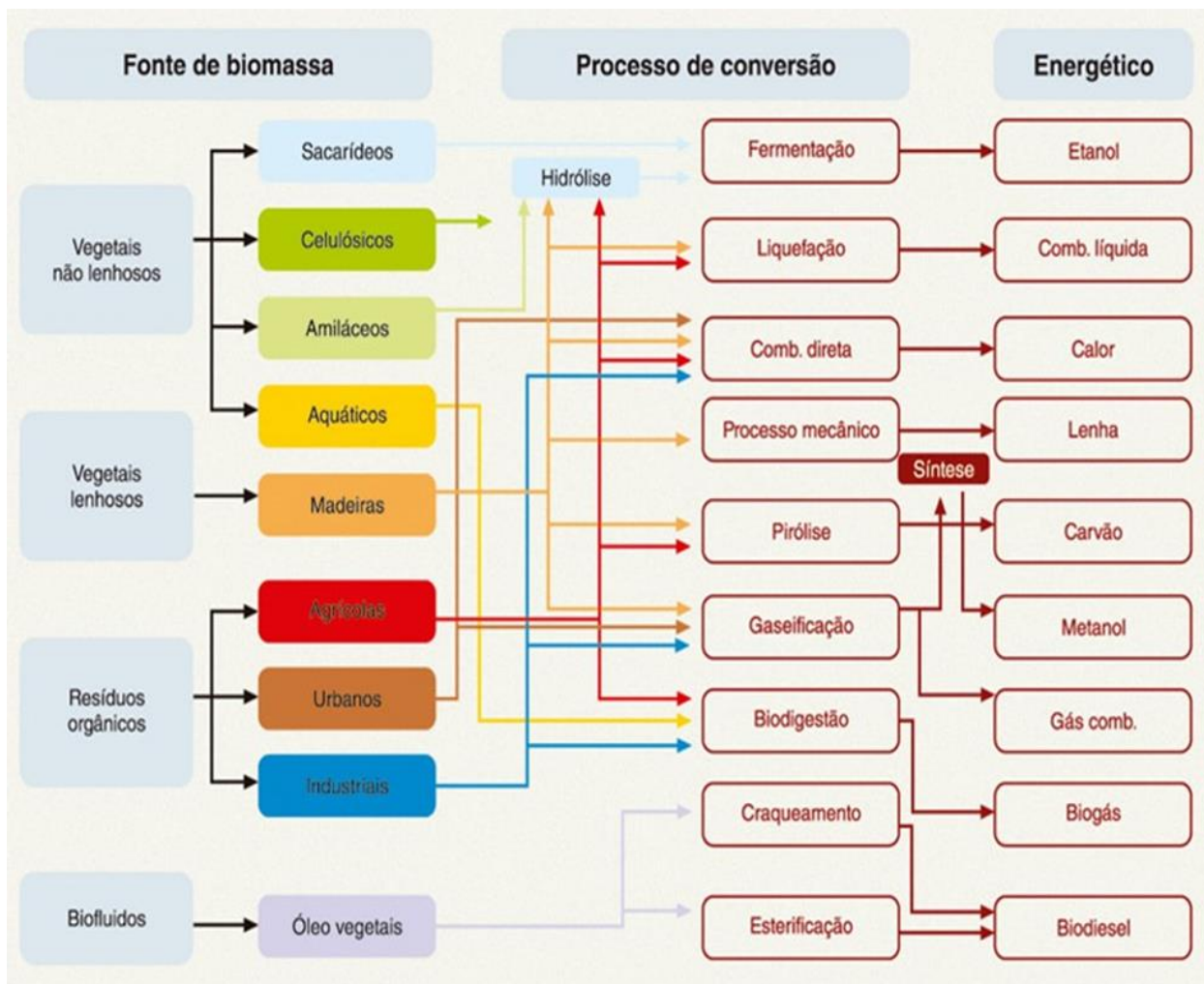


Figura 2. Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, 2017.

Segundo WORLD ENERGY COUNCIL (2016), atualmente a energia renovável de biomassa representa aproximadamente 14% do consumo mundial, e em 2035 pode-se alcançar valores expressivos, chegando a superar a marca de 40%.

O Brasil é um dos países que mais utilizam recursos renováveis para efetuar a conversão em energia, representando já em 2008, valores aproximados a 70% (GOMES et al., 2013).

### **3.3. CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA**

As biomassas vegetais têm sua capacidade de combustível caracterizadas por quantidades variáveis de celulose, hemiceluloses, lignina, teor de umidade, densidade, teor de carbono fixo e poder calorífico (PEREIRA et al., 2016).

O poder calorífico é a quantidade de energia liberada por um material em sua combustão completa. Leva-se em consideração que o total de calorias liberado é proporcional a quantidade de massa do material queimado (QUIRINO et al., 2005).

O poder calorífico é influenciado pela proporção de umidade e pelos teores de celulose, lignina e hemiceluloses. Por este fato, torna-se necessário o conhecimento dessas propriedades nas respectivas biomassas, para que possa estimar o potencial energético da amostra.

A celulose é componente mais abundante na biomassa, é um polímero linear de celobiose (dímero glicose-glicose), a posição das ligações e as pontes de hidrogênio adicionais, tornam o polímero rígido e difícil de ser quebrado (HAMELINCK et al., 2005). Sua representatividade em biomassa vegetais geralmente varia de 40 a 60%, e encontra-se em todos os vegetais, desde as plantas mais simples até em árvores mais complexas (RABELO, CARRERE, MACIEL FILHO e COSTA, 2011).

Representando geralmente 15 a 45% da biomassa dos vegetais, a hemicelulose é composta por cadeias ramificadas de açúcares, entre essas cadeias, encontram-se principalmente aldopentoses, como xilose e arabinose, e aldohexoses, como glicose,

manose e galactose. Além disso, a hemicelulose ainda consiste em ácidos hexurônicos, como os ácidos  $\beta$ -D-glucurônico, D-4-O-metilglucurônico e  $\beta$ -D-galacturânico, e deoxiexoses. A complexidade da estrutura desta molécula deve-se a variedade de ligações e de ramificações, assim como a presença de diferentes unidades monoméricas (KOOTSTRA et al., 2009). Comparando estruturalmente, a molécula de celulose se assemelha mais com a celulose do que com a lignina, e estes compostos apresentam função de suporte celular (GÍRIO et al., 2010).

A lignina representa de 10 a 25% da biomassa de vegetais, e considera-se o terceiro componente principal da parede celular vegetal. Apesar de ser possível produzir diversos produtos com base na lignina, atualmente o foco dos estudos tem se voltado para o uso desse material como fonte de energia para os processos, o que garantiria a auto-suficiência e, eventualmente, até a possibilidade de exportar alguma energia elétrica excedente (NOGUEIRA, 2008).

Como citado anteriormente, o teor de umidade é outro fator importante que influencia diretamente o poder calorífico da biomassa vegetal. A evaporação da água do combustível úmido consome parte da energia liberada na combustão da biomassa, presumindo-se assim, que o teor de umidade é inversamente proporcional a energia proporcionada no processo de conversão (LOPES, 2012).

### **3.4. CAPIM ELEFANTE**

Originário da África e possuindo mais de 200 variedades, o capim elefante (*Pennisetum purpureum*), espalhou-se por todo o continente africano e posteriormente introduzido na América do Sul e na Austrália (STREZOV, EVANS e HAYMAN, 2008), chegando ao Brasil em 1920, vindo de Cuba (REIS E RODRIGUES, 1997).

O capim elefante, destaca-se pelo seu potencial de produção de biomassa e por requerer poucos nutrientes para seu desenvolvimento, tornando-se uma das mais importantes forrageiras tropicais, intensificando seu uso no Brasil, principalmente na região Centro-Oeste (PATRIZI et al, 2004). A produtividade do capim elefante pode



atingir até 40 toneladas de biomassa por hectare, concedendo até duas colheitas anuais, demonstrando alto potencial como fonte alternativa de energia (STREZOV, EVANS e HAYMAN, 2008).

As características agrônômicas e físicas do capim são fatores importantes na escolha de determinada variedade para sua conversão em energia ou para alimentação de animais. Neste sentido, ressalta-se que o capim já sofreu várias modificações, e existem outras inúmeras pesquisas com variações genéticas da espécie, procurando aperfeiçoá-la para o propósito que ela se destinará (FONTOURA, 2011).

É relevante considerar, apesar de vários fatores favoráveis do seu uso para energia, o capim elefante apresenta alguns pontos negativos, como elevada umidade pós colheita, dificuldade de secagem, além de baixa densidade, o que prejudica o armazenamento e serviços de transporte. Por esses fatores, o processo de conversão em energia elétrica possui etapas de pré-tratamento da biomassa, como secagem controlada e compactação (SILVA, 2010).

Segundo a ANEEL (2016) o capim elefante é utilizado em três usinas no Brasil e já desponta como a segunda biomassa com maior produtividade entre as fontes agroindustriais na conversão em energia elétrica, como pode ser notado na Tabela I.

Tabela I. Matriz de energia elétrica de derivados da biomassa no Brasil (ANEEL, 2016).

FONTE		CAPACIDADE INSTALADA			
ORIGEM	FONTE NÍVEL 1	FONTE NÍVEL 2	Nº DE USINAS	(KW)	%
BIOMASSA	AGROINDUSTRIAIS	Bagaço de Cana de Açúcar	396	10.887.420	6,8150
		Biogás-AGR	3	1.822	0,0011
		Capim Elefante	3	65.700	0,0411
		Casca de Arroz	12	45.333	0,0283
	BIOCOMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS	Etanol	1	320	0,0002
		Óleos vegetais	2	4.350	0,0027
	FLORESTA	Carvão Vegetal	8	54.097	0,0338
		Gás de Alto Forno - Biomassa	11	332.265	0,2079
		Lenha	2	14.650	0,0091
		Licor Negro	17	2.261.136	1,4153
		Resíduos Florestais	50	386.100	0,2416
	RESÍDUOS ANIMAIS	Biogás - RA	11	2.099	0,0013
	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	Biogás - RU	15	114.680	0,0717
		Carvão - RU	1	2.700	0,0016

### 3.5. PROGRAMA COMPUTACIONAL ASPEN PLUS®

O programa computacional Aspen Plus® é um dos mais utilizados no mundo, inclusive por inúmeras indústrias, pois o mesmo facilita cálculos físicos, químicos e termodinâmicos de processos (ASPENTECH, 2017).

Utilizado para modelar processos com condições definidas que envolvam correntes sólidas, líquidas e gasosas, o programa utiliza seu banco de dados que contempla balanços de massa e energia, equilíbrio de fases, propriedades e modelos termodinâmicos, além de uma variedade de propriedades químicas e físicas de diversas substâncias (KAUSHAL e TYAGI, 2017).

Realiza a simulação especificando informações como vazões, composições e condições de operação (temperatura, pressão, número de estágio e outras) do processo que se deseja modelar (ASPENTECH, 2017).

O programa pode auxiliar simulando uma variedade de processos, por exemplo, síntese de metanol, processos de gaseificação entre outros processos de conversão de biomassa em energia. Entre esses casos de modelagem de produção de bioenergia, encontra-se o processo analisado neste trabalho, que é simular a combustão direta em um reator, seguido por transferência de calor para formação de vapor e transformação da energia mecânica em elétrica (KAUSHAL e TYAGI, 2017).

Diante da complexidade nestes processos de produção de bioenergia, que envolvem inúmeras operações unitárias, cada usuário propõe uma forma mais adequada de solucioná-los. Em sistemas químicos e mecânicos, que costumam possuir mecanismos fortemente correlacionados, tendo por resultado efeitos sinérgicos e antagônicos, torna-se extremamente necessárias soluções que consigam avaliar conjuntamente o efeito de um grande número de variáveis, reduzindo-se assim um grande número de ensaios experimentais, realizando uma otimização no processo (PERALTA-ZAMORA, MORAIS e NAGATA, 2005).

A modelagem, alternativa a otimização de trabalhos, estabelece o desenvolvimento dos processos, aplicáveis também em grande escala. A facilitação de

etapas mais críticas de processos e pesquisas relacionadas aos parâmetros experimentais, ampliam a relevância da utilização de programas de simulação em análises de projetos (PERALTA-ZAMORA, MORAIS e NAGATA, 2005).

## **4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS E MATERIAIS**

Os procedimentos adotados no trabalho foram:

1. Caracterização físico química das diferentes variedades genéticas de capim elefante;
2. Obtenção do balanço de massa das reações de combustão de hemiceluloses, celulose e lignina;
3. Simulação da conversão da biomassa de capim elefante em energia elétrica utilizando o programa computacional Aspen Plus®;
4. Comparação entre os resultados de PCS encontrados no programa computacional Aspen Plus® com os obtidos no calorímetro, de todas as variações genéticas estudadas neste trabalho;
5. Obtenção do potencial energético do capim elefante.
6. Análise técnica e econômica do processo de conversão do capim elefante em eletricidade.

### **4.1. CARACTERIZAÇÃO DO CAPIM ELEFANTE**

Os dados da caracterização de 40 genótipos do capim elefante utilizados para este estudo em questão foram cedidos pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), em experimento realizado pela empresa no setor de Gado e Leite, implantado em Coronel Pacheco (MG), região Zona da Mata. Na tabela II, estão dispostos cada genótipo com um número de identificação, para facilitar as discussões, e esta tabela também apresenta os dados de massa seca, massa seca útil, massa úmida, cinzas, celulose, hemicelulose e lignina obtidos através da caracterização realizada pela EMBRAPA.

Tabela II. Caracterização físico química de diferentes variedades do capim elefante.

	Nome.Trat.	Massa Seca (%)	Massa úmida (%)	Massa seca útil (%)	Cinzas (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
1	BAGCE 1 - Elefante da Colômbia	40,00	60,00	32,70	6,65	53,08	36,17	10,75
2	BAGCE 1 - Elefante da Colômbia	41,60	58,40	31,08	7,34	52,32	37,40	10,28
3	BAGCE 19 - Merkeron de Pinda	33,18	66,82	25,77	6,86	52,85	36,30	10,84
4	BAGCE 19 - Merkeron de Pinda	29,32	70,68	22,85	6,49	56,20	32,08	11,72
5	BAGCE 22 - Taiwan A-144	32,26	67,74	26,46	6,40	52,05	37,34	10,61
6	BAGCE 22 - Taiwan A-144	29,77	70,23	24,07	6,53	53,76	36,35	9,89
7	BAGCE 23 - Napier S.E.A.	39,87	60,13	33,17	4,38	53,92	30,94	15,13
8	BAGCE 23 - Napier S.E.A.	32,64	67,36	25,13	6,00	55,13	34,16	10,71
9	BAGCE 3 - Tres Rios	32,35	67,65	24,46	6,75	53,07	34,79	12,14
10	BAGCE 3 - Tres Rios	32,92	67,08	24,80	6,84	51,47	38,41	10,12
11	BAGCE 38 - Cameroon - Piracicaba	32,99	67,01	27,22	6,97	50,56	38,10	11,33
12	BAGCE 38 - Cameroon - Piracicaba	29,11	70,89	21,91	6,41	53,02	36,29	10,70
13	BAGCE 50	37,72	62,28	29,66	6,13	51,95	36,88	11,17
14	BAGCE 50	34,59	65,41	27,23	5,44	53,70	33,95	12,35
15	BAGCE 51 - IAC-Campinas	38,11	61,89	28,84	7,33	50,87	38,64	10,49
16	BAGCE 51 - IAC-Campinas	36,41	63,59	28,15	8,55	53,04	36,61	10,35
17	BAGCE 57 - Roxo	30,30	69,70	23,74	6,56	52,25	36,82	10,94
18	BAGCE 57 - Roxo	28,15	71,85	20,66	6,42	52,76	36,20	11,04
19	BAGCE 59	36,21	63,79	30,21	6,24	53,52	33,05	13,42
20	BAGCE 59	35,61	64,39	28,10	5,45	46,77	40,28	12,95
21	BAGCE 6 - Pusa Napier No 2	35,57	64,43	30,07	4,31	53,99	35,17	10,85
22	BAGCE 6 - Pusa Napier No 2	35,03	64,97	28,61	5,75	55,85	33,68	10,47
23	BAGCE 60 - Guaco/I.Z.2	34,29	65,71	24,91	6,11	51,31	38,47	10,21
24	BAGCE 60 - Guaco/I.Z.2	31,44	68,56	21,80	6,52	51,07	38,39	10,54
25	BAGCE 62 - Cuba-116	37,20	62,80	29,30	7,91	49,56	40,00	10,44
26	BAGCE 62 - Cuba-116	35,51	64,49	25,95	7,14	50,30	38,31	11,38

*Continuação*

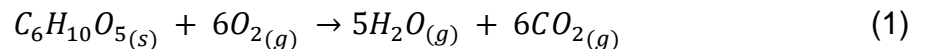
	Nome.Trat.	Massa Seca (%)	Massa úmida (%)	Massa seca útil (%)	Cinzas (%)	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)
27	BAGCE 64 - King Grass	37,13	62,87	29,90	5,93	49,99	37,65	12,36
28	BAGCE 64 - King Grass	36,65	63,35	28,01	6,43	51,12	36,30	12,58
29	BAGCE 66 - Mineirão IPEACO	36,64	63,36	29,80	7,38	52,94	34,89	12,16
30	BAGCE 66 - Mineirão IPEACO	35,61	64,39	27,38	6,91	51,51	37,36	11,13
31	BAGCE 69 - CPAC	36,95	63,05	26,94	6,77	50,67	38,75	10,59
32	BAGCE 69 - CPAC	33,49	66,51	27,04	6,65	52,75	35,21	12,04
33	BAGCE 91 - Pasto Panamá	31,91	68,09	24,07	6,38	52,05	35,21	12,74
34	BAGCE 91 - Pasto Panamá	27,49	72,51	22,28	7,31	51,67	36,35	11,98
35	BRS Canará	37,10	62,90	29,81	5,11	53,72	32,60	13,68
36	BRS Canará	37,00	63,00	28,66	7,12	51,59	36,94	11,48
37	BRS Capiaçú	30,38	69,62	23,78	6,66	52,32	36,09	11,59
38	BRS Capiaçú	27,88	72,12	22,64	6,81	53,44	34,83	11,73
39	CNPGL 91-6-3	34,30	65,70	28,09	5,91	52,36	36,48	11,16
40	CNPGL 91-6-3	33,89	66,11	27,18	5,67	52,34	36,41	11,25

A Tabela II apresenta o número de identificação dos genótipos, de 1 a 40, pois existem variações com o mesmo nome, mas que foram cultivadas em diferentes condições, o que resultou em percentuais diferentes na composição. Além da numeração, nota-se também os percentuais de massa seca, massa úmida, cinzas, massa seca útil (celulose, hemicelulose e lignina).

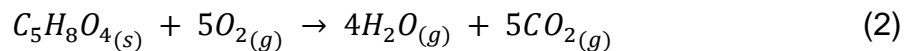
As informações apresentadas na Tabela II foram importantes na simulação, pois na planta modelada no programa computacional Aspen Plus®, a construção da composição das correntes inseridas no processo de conversão da biomassa em energia elétrica é dependente dos dados obtidos na caracterização.

## 4.2. ESTEQUIOMETRIA DAS REAÇÕES

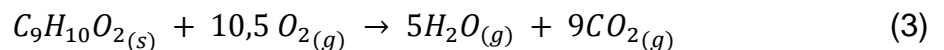
Para que a simulação do processo fosse possível, fez-se necessário, primeiramente, conhecer a reação de combustão da celulose. Considera-se a estequiometria da reação de combustão de acordo com a equação 1.



Com relação a hemicelulose, foi também importante, obter o conhecimento da reação de combustão, que pode ser verificado de acordo com a equação 2.



A composição da lignina varia de acordo com a planta em que esta é proveniente. Para o trabalho em questão, considerou-se uma composição média encontrada na maioria das plantas verdes com flor, como é o caso do capim ( $C_9H_{10}O_2$ ). A reação de combustão foi considerada de acordo com a equação 3.



Através da estequiometria dessas reações, calculou-se o oxigênio estequiométrico necessário para que a reação fosse completa. As reações de combustão simuladas no programa computacional Aspen Plus® foram realizadas considerando processos de conversão em 100%, o que implicou a necessidade de introduzir quantidade de ar em excesso.

### 4.3. SIMULAÇÃO

As simulações foram realizadas utilizando o programa computacional Aspen Plus® v.9 (ASPENTECH, 2017). Os fundamentos teóricos que embasam a modelagem adotada incluem a 1ª e 2ª leis da termodinâmica e equações da mecânica dos fluidos, elementos essenciais para o cálculo das propriedades termodinâmicas nos pontos de entrada e saída dos componentes do sistema térmico adotado, aproximando valores encontrados nas equações com valores em situações reais.

A 1ª lei da termodinâmica para sistemas abertos e ciclos termodinâmicos, desprezando as variações das energias cinéticas e potencial, em regime permanente, pode ser expressa na equação 4. Os índices 1 e 2 referem-se a entrada e saída do volume de controle, respectivamente.

$$Q_{VC} + \sum \dot{m}_1 \cdot h_1 = \sum \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{W}_{VC} \quad (4)$$

E as variáveis são:

$\dot{m}$ : taxa de massa que atravessa o volume de controle, em kg/seg;

$h$ : entalpia do fluido nos pontos de entrada e de saída do volume de controle, em J/kg;

$\dot{W}_{VC}$ : trabalho realizado no tempo, ou potência, que atravessa as fronteiras do volume de controle, em J/s, ou W;

$\dot{Q}_{VC}$ : calor trocado nas fronteiras do volume de controle em J/s.

A equação 4 pode ser usada para cálculos de variáveis como a energia térmica recebida pelo gerador de vapor, energia térmica cedida pelo condensador, trabalho realizado pela turbina, trabalho adicionado na bomba, taxa de massa que flui pelo sistema e entalpia na entrada e saída de cada componente.



A equação 5, apresentada a seguir define o trabalho produzido, a partir da diferença entre o calor cedido de uma fonte quente e o calor recebido por uma fonte fria:

$$Q_H - Q_L = W \quad (5)$$

$Q_H$ : Calor entregue para o ciclo pelo reservatório à temperatura  $T_H$  (temperatura superior), em J/s ou W;

$Q_L$ : Calor rejeitado pelo ciclo para um reservatório à temperatura  $T_L$  (temperatura inferior), em J/s ou W;

$W$ : Valor útil de trabalho produzido pelo sistema, em J/s ou W.

O ciclo térmico adotado na simulação tem como referência o ciclo de Carnot, que opera entre duas transformações isotérmicas e isentrópicas, e tem o rendimento térmico do ciclo de potência expresso pela equação 6:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \quad (6)$$

Acrescenta-se que no ciclo de Carnot, a troca de calor à temperatura constante, ao longo de uma isotérmica, a equação 6 passa a ser escrita como:

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (7)$$

A 2ª lei da termodinâmica, em regime permanente, para um volume de controle, é expressa pela equação 8. Os índices 1 e 2 referem-se a entrada e saída do volume de controle, respectivamente.

$$\sum \dot{m}_1 \cdot s_1 - \sum \dot{m}_2 \cdot s_2 = \sum \frac{\dot{Q}_{VC}}{T} + \sum \frac{W_{perdasVC}}{T} \quad (8)$$

$\dot{m}$ : taxa de massa que atravessa o volume de controle, em kg/seg;

$s$ : entropia na entrada do volume de controle, em J/(kg.K);

$W_{perdasVC}$ : perdas devido a irreversibilidades no sistema, em J/s ou W;

$T$ : temperatura, em K;

$\dot{Q}_{VC}$ : calor trocado nas fronteiras do volume de controle em J/s ou kW.

Como o ciclo de Carnot não é um modelo adequado para os ciclos de potência a vapores reais, pois ele não pode ser aproximado na prática, utilizou-se neste trabalho o ciclo de Rankine, pois segundo Van Wylen et al. (1995) e Moran et al (1996), este é o ciclo que mais se aproxima da realidade para produção de potência tendo água como fluido de trabalho. Na figura 3, nota-se o funcionamento do ciclo fechado, onde ocorre a elevação de pressão da água pela bomba, o aquecimento, vaporização e superaquecimento no gerador de vapor, realização do trabalho na turbina, e por fim a condensação do vapor no condensado.

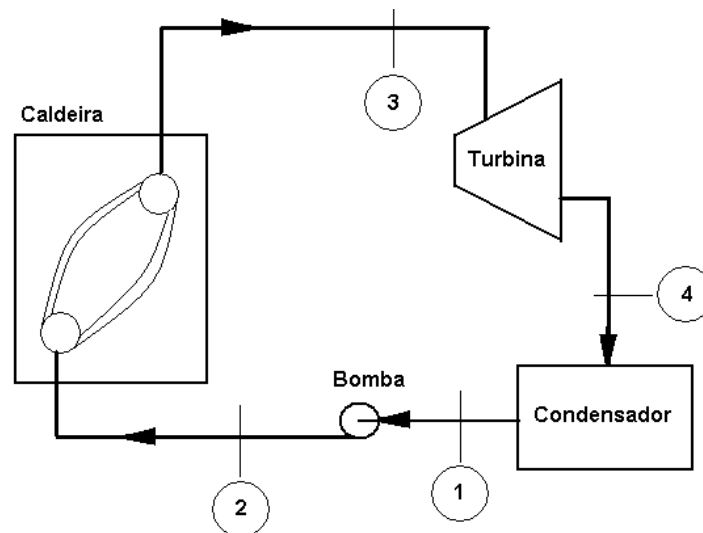


Figura 3. Unidade térmica geradora a vapor com superaquecimento

Importante ressaltar, que nenhum ciclo consegue um rendimento térmico,  $\eta$ , superior ao do ciclo de Carnot, para as mesmas temperaturas, e não é possível elevar muito a temperatura máxima do vapor no gerador de vapor, pois haveria a necessidade de se utilizar caldeiras, tubulações e turbinas construídas com ligas especiais numa composição tal que encareceria enormemente o projeto (PAZ, 2002). O limite médio de temperatura do vapor é 560 °C, e por este fato, este trabalho estabeleceu que a temperatura máxima alcançada seria 540°C.

Uma metodologia aplicada para aumentar a eficiência do ciclo, e inclusive foi utilizada neste estudo, é trabalhar com pressões elevadas na caldeira e conseqüentemente na entrada da turbina. Este aumento de pressão é obtido pela quantidade de calor entregue ao gerador de vapor em função da necessidade de uma quantidade maior de vazão de vapor na turbina (PAZ, 2002). Neste trabalho, simulou-se a planta operando com pressões elevadas, nos valores de 40, 70 e 140 bar.

O rendimento térmico,  $\eta$ , do ciclo de Rankine é expresso através da seguinte expressão:

$$\eta = \frac{W}{Q_H} \quad (9)$$

No caso deste trabalho, a equação 10 foi a utilizada para calcular o rendimento térmico, e esta é representada da seguinte forma:

$$\eta = \frac{W_T - W_B}{Q_H} \quad (10)$$

$W_T$ : trabalho realizado pela turbina, em J/s ou W;

$W_B$ : trabalho realizado pela bomba, em J/s ou W;

$Q_H$ : calor fornecido pela caldeira, em J/s ou W.

O trabalho realizado pela turbina é devido a conversão da energia cinética do vapor em energia mecânica aplicada nas palhetas móveis do equipamento. Com o aumento de velocidade das paletas, ocorre a redução da entalpia, da pressão e da temperatura do vapor. Em valores absolutos, a velocidade de saída do vapor é menor que a velocidade de entrada (PAZ, 2002).

Na caldeira, o fluido recebe o calor da queima de combustíveis, sendo eles renováveis ou não, e passa por mudança de fase, ocasionando a elevação de entalpia do fluido, temperatura e pressão. A energia cinética adquirida pelo vapor é necessária para produzir o trabalho na turbina. Importante ressaltar que devido a fuga de calor para o meio ambiente, o processo de transferência de calor da combustão para o fluido pode apresentar perdas significativas, podendo alcançar até 30% do total.

A estrutura para produção de energia ainda conta com o condensador, que são trocadores de calor que implicam o resfriamento do vapor saturado oriundo da turbina.

Observa-se que tendo o conhecimento dos equipamentos envolvidos e quais suas funções no processo proposto por este trabalho, foi necessário para realizar a simulação, inserir no programa computacional Aspen Plus® os seguintes parâmetros:

- Escolher modelo termodinâmico mais adequado para calcular e estimar as propriedades termodinâmicas e resultados;
- taxa de massa do combustível de alimentação do reator, em kg/min;
- composição da biomassa utilizada como combustível para o reator;
- taxa de massa do fluido de trabalho do circuito, em kg/min;
- taxa de massa do fluido de reposição, em kg/min;
- temperatura da biomassa utilizada de alimentação do reator, em °C;
- temperatura de trabalho da caldeira, em °C;
- temperatura nominal do vapor na admissão da turbina, em °C
- pressão nominal do vapor na admissão da turbina, em kPa;;
- pressão do vapor na saída da turbina, em kPa.

Para projetos de plantas de produção de energia utilizando vapor de água, a realização de modelagem de processos é de grande auxílio, simulando em condições específicas de temperatura, pressão, vazão do vapor e composição da biomassa utilizada como fonte de energia no reator. Para isso, são necessários modelos termodinâmicos que aproximam bem as medidas experimentais de equilíbrio de fases e os represente com fidelidade. No caso deste trabalho, cálculo do equilíbrio de fases a alta pressão, é comumente realizado com as equações de estado cúbicas, tais como a Soave-Redlich-Kwong (SRK) e Peng-Robinson (PR). Neste estudo, utilizou-se o modelo termodinâmico PR, equação aplicada para descrever o equilíbrio de fases dos mais diversos sistemas, desde misturas de hidrocarbonetos, com e sem água, até sistemas binários e multicomponentes (CUNHA, 2014).

As simulações foram realizadas de acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante de equipamentos cujo objetivo é a produção de energia. As especificações técnicas estão apresentadas nas Tabelas III, IV e V.

Tabela III. Especificações técnicas dos equipamentos para usina termoeletrica com pressão de operação da caldeira a 40 bar.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS			
ACIONAMENTO	GERADOR		
	1	2	Unidades
Pontos de operação			
Potência nos bornes do gerador	27280	20346	kW/h
Pressão de vapor de entrada	40	40	bar
Temperatura de vapor de entrada	450	450	°C
Vazão de vapor de entrada	108000	84000	kg/h
Pressão de vapor na saída	0,11	0,11	bar
Temperatura de vapor na saída	47,00	47,00	°C
Vazão de vapor na saída	108000	84000	kg/h
Consumo específico	3,96	4,13	kg vap/kW h
Vazão de água de resfriamento (turbina, gerador e condensador)	6500	6500	m <sup>3</sup> /h
Vazão de água de reposição	195	195	m <sup>3</sup> /h
Rotação da turbine	6000	6000	rpm
Rotação do gerador	1800	1800	rpm

Tabela IV. Especificações técnicas dos equipamentos para usina termoeletrica com pressão de operação da caldeira a 70 bar.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS			
ACIONAMENTO	GERADOR		
Pontos de operação	1	2	Unidades
Potência nos bornes do gerador	31390	23426	kW/h
Pressão de vapor de entrada	70	70	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	530	530	°C
Vazão de vapor de entrada	108000	84000	kg/h
Pressão de vapor na saída	0,11	0,11	bar(a)
Temperatura de vapor na saída	47,00	47,00	°C
Vazão de vapor na saída	108000	84000	kg/h
Consumo específico	3,44	3,59	kg vap/Kw h
Vazão de água de resfriamento (turbina, gerador e condensador)	6500	6500	m <sup>3</sup> /h
Vazão de água de reposição	195	195	m <sup>3</sup> /h
Rotação da turbine	6000	6000	rpm
Rotação do gerador	1800	1800	rpm

Tabela V. Especificações técnicas dos equipamentos para usina termoeletrica com pressão de operação da caldeira a 140 bar.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS			
ACIONAMENTO	GERADOR		
Pontos de Operação	1	2	Unidades
Potência nos bornes do gerador	32986	24672	kW/h
Pressão de vapor de entrada	140	140	bar(a)
Temperatura de vapor de entrada	540	540	°C
Vazão de vapor de entrada	108000	84000	kg/h
Pressão de vapor na saída	0,11	0,11	bar(a)
Temperatura de vapor na saída	47	47	°C
Vazão de vapor na saída	108000	84000	kg/h
Consumo específico	3,27	3,40	kg vap/Kw h
Vazão de água de resfriamento (turbina, gerador e condensador)	6500	6500	m <sup>3</sup> /h
Vazão de água de reposição	195	195	m <sup>3</sup> /h
Rotação da turbine	6000	6000	rpm
Rotação do gerador	1800	1800	rpm

Definido o pacote termodinâmico e conhecido as especificações técnicas do fabricante de equipamentos para produção de energia, todos os parâmetros para a simulação foram inseridos no programa computacional Aspen Plus®, proporcionando a modelagem de operações unitárias. Neste trabalho, o processo simulado foi baseado do diagrama de blocos apresentado na Figura 4.

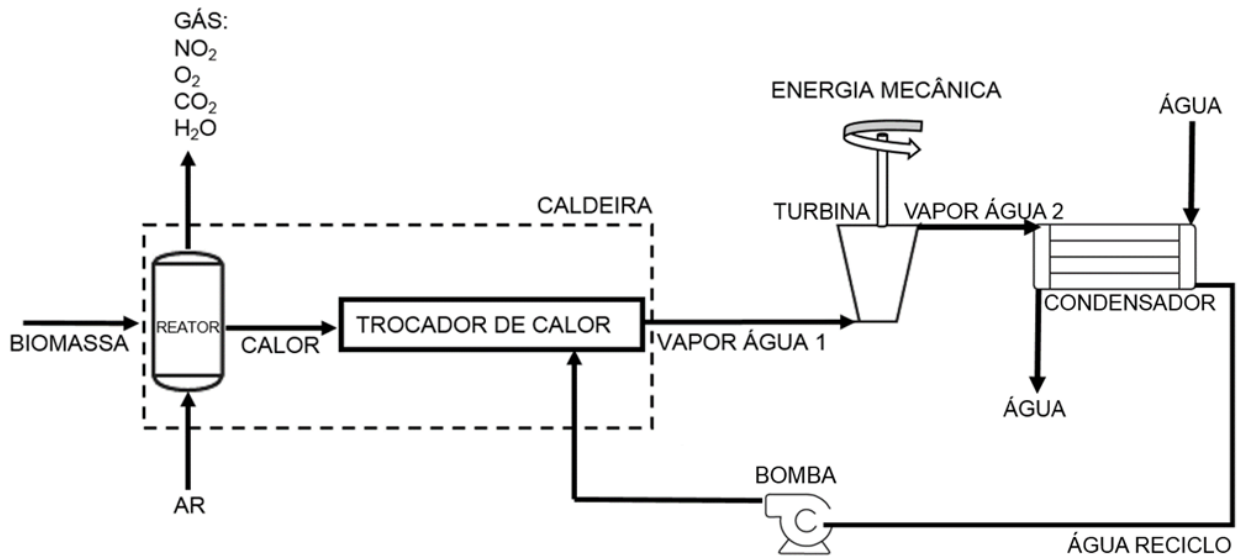


Figura 4. Diagrama de blocos do processo de conversão de biomassa em energia elétrica.

Considerou-se que a vazão, identificada como biomassa (capim elefante) na figura 4, foi enviada para o reator com taxa de 1500 kg/min, de acordo com especificações técnicas fornecidas por produtoras de energia. A composição da biomassa inserida no programa encontra-se na Tabela II, e foi representada por celulose, hemicelulose, lignina, água, cinzas, água.

Considerou-se a adição, paralela a biomassa, de ar (21% oxigênio e 79% nitrogênio) em excesso no sistema de combustão no reator.

Considerou-se as correntes, notadas como ar e biomassa na figura 4, direcionadas ao reator com temperatura de 25°C e a uma pressão 1 atm. O reator encontrar-se-á adiabático e espera-se contribuir com a geração de vapor na caldeira que apresente temperatura próximas de 540°C, dependendo da composição do genótipo de capim elefante simulado.

No programa computacional Aspen Plus®, o gerador de vapor, foi representado no diagrama de blocos da figura 4 e na modelagem por uma unidade composta por 2 equipamentos: reator e caldeira. O vapor de água criado na transferência de calor da combustão da biomassa foi tido com pressões que variavam de 40 a 140 bar, e temperatura que variava entre 450 e 540 °C, de acordo com as especificações técnicas fornecidas pelo fabricante dos equipamentos envolvidos na produção de energia.

Com a conversão da energia cinética do vapor para energia mecânica das paletas da turbina, o fluido, identificado como vapor 2 na figura 4, tem temperatura, pressão e velocidade reduzidas, e apresenta valores de saída de aproximadamente 40 °C de temperatura e 0,11 bar de pressão. Importante ressaltar, que a turbina trabalhará com eficiência de 85% na conversão de energia térmica em energia mecânica, pois leva-se em considerações perdas de energia por atrito, sons e transferência de calor.

O condensador foi projetado para trabalhar com vazões especificadas pelo fabricante, que permite trabalhar com taxa elevada, e baixas pressões, o que justifica o fluido liberado pelo condensar apresentar temperaturas próximas a ambiente.

A bomba introduzida no diagrama de blocos e na simulação é considerada um componente importante dentro do projeto, pois a mesma cumpre funções como o controle de vazão do reciclo, que interfere diretamente no trocador de calor, e o controle da eficiência do ciclo termodinâmico.

Neste trabalho, obteve-se a partir do programa computacional Aspen Plus® dados como dimensionamento de equipamentos, resultados quanto aos balanços de massa e energia, valores de poder calorífico superior (PCS), quantidade de energia elétrica produzida por quilograma de biomassa e avaliação dos custos operacionais.

Para validar a simulação, foram realizados dois testes: determinação da potência teórica e experimental, além de determinação e correlação dos valores médios de poder calorífico superior (PCS) do capim elefante obtidos experimentalmente com os valores de PCS obtidos no programa computacional Aspen Plus.

A validação por determinação da potência teórica e experimental foi dada por meio da comparação do trabalho final encontrado no Aspen, denominado trabalho



experimental, com o trabalho calculado, denominado trabalho teórico, utilizando valores de entalpia de entrada e saída do processo, além da vazão mássica do sistema.

O Trabalho teórico, admitindo uma transformação adiabática como discutido anteriormente, obteve-se utilizando equação 11.

$$W_{teórico} = \Delta H \cdot \dot{m} \quad (11)$$

$W_{teórico}$ : Trabalho teórico, em MW;

$\Delta H$ : Variação de entalpia, em MW;

$\dot{m}$ : Vazão mássica, em kg/min.

A validação por determinação do poder calorífico superior, deu-se pela comparação entre as respostas do capim elefante ao programa computacional Aspen Plus e calorímetro, tendo por limite de aceitação um intervalo de até 5%. A determinação do poder calorífico utilizando o programa computacional Aspen Plus baseou-se na metodologia proposta por Dias (2011). A base de dados para componentes de biomassa desenvolvida pelo NREL (WOOLEY; PUTSCHE, 1996), disponível em NREL (2007) foi utilizada como base para inserção dos componentes lignocelulósicos (celulose, hemicelulose e lignina).

Para simular um calorímetro, foi realizada a combustão completa de 1500 kg/min de vazão do capim elefante com a quantidade estequiométrica de oxigênio necessária, ambos a 25 °C, em um reator com conversão de 100%. Os produtos da reação (gases de combustão) são resfriados em um trocador de calor até 45 °C. A energia liberada neste trocador de calor é correspondente ao PCS do material queimado.

Todas as amostras direcionadas ao calorímetro foram submetidas ao processo em duplicata, podendo apresentar uma diferença máxima de 1% de uma tentativa a outra, onde caso não cumprisse esse pré-requisito, realizava-se nova tentativa. Foram utilizadas no processo valores de medida mássica de aproximadamente 0,400 gramas,

onde posterior a esta etapa, as amostras foram adicionadas em um recipiente contendo 5 ml de água e expostos a uma pressão de 30 bar. Após verificação de todas as etapas descritas, os resultados (MJ/g) foram anotados e comparados com os valores encontrados nas simulações, e foi adotado 95% como limite de confiança dos resultados dos dois testes para a mesma amostra.

O fluxograma da simulação para a determinação do poder calorífico superior no programa computacional Aspen Plus é mostrado na Figura 5, e o equipamento calorímetro IKA® C 200, utilizado na obtenção do PCS pode ser observado na Figura 6.

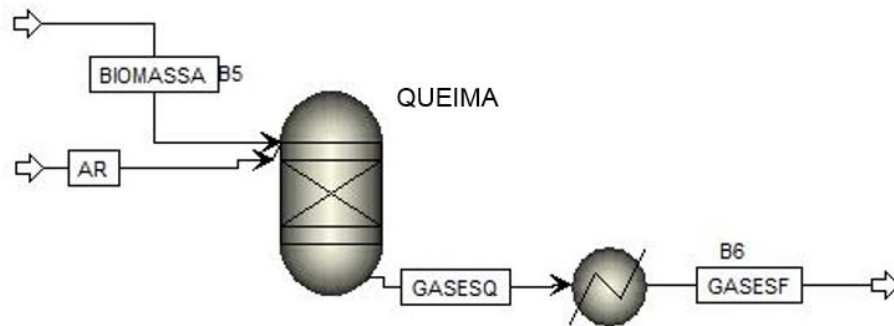


Figura 5. Fluxograma da simulação para a determinação do poder calorífico superior.



Figura 6. Calorímetro IKA® C 200.

Fonte: IKA, 2018.

A partir dos dados obtidos, fez-se a avaliação da predição do poder calorífico superior (PCS) do capim elefante.

#### **4.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA**

O método dos mínimos quadrados parciais foi utilizado para analisar estatisticamente qual variável da composição química tem maior influência com o potencial energético da biomassa. Para isso foram consideradas as variáveis de composição química do capim elefante: celulose, hemicelulose, lignina, umidade e cinzas.

Os algoritmos para a construção e validação dos modelos foram fornecidos pelo Laboratório de Instrumentação e Quimiometria (LINQ). Todos os cálculos foram realizados no Matlab 7.9.

#### **4.5. ANÁLISE ECONÔMICA**

Realizou-se a análise econômica levando em consideração o custo de capital para construção da fábrica de processos químicos, o custo operacional da fábrica, análise de rentabilidade do processo proposto, análise e seleção do melhor processo para geração do produto final, valor de venda e análise do potencial econômico do produto no mercado.

Assim, a análise econômica nesse trabalho foi baseada na planilha em EXCEL proposta por PETERS, TIMMERHAUS e WEST (2003). O procedimento adotado para fazer a análise econômica foi realizado como apresentado a seguir:

- i. Estabeleceu-se o custo de compra de cada equipamento do processo.
- ii. Na planilha "Capital Inv", relatou-se o custo total de compra dos equipamentos do processo para calcular o investimento de capital fixo e capital de giro.

iii. Na planilha “Material & Labor”, informou-se o preço dos produtos e matérias-primas com suas respectivas vazões além da mão-de-obra requerida.

iv. Na planilha “Utilities”, informou-se as quantidades de utilidades anuais necessárias com as unidades apropriadas.

v. Na planilha “Anual TOTAL PRODUCT COST”, calculou-se o custo total anual do produto.

vi. Na planilha “Evaluation”, estabeleceu-se o fluxo de caixa e calculou-se as medidas de rentabilidade comum, tais como, tempo de pagamento, retorno do investimento e retorno líquido.

Além disso, foi utilizado, paralelamente a este método, o programa computacional Aspen Plus para mapeamento da planta e dimensionamento dos equipamentos.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. SIMULAÇÃO

Para elaboração do diagrama de fluxo de processo (PFD) de conversão de biomassa em energia elétrica foi necessário dividir os componentes envolvidos no processo em diferentes blocos. A Figura 7 ilustra o PFD obtido no programa computacional Aspen Plus. Importante ressaltar que o sistema de geração de eletricidade da simulação utiliza turbina a vapor, pois esta é a opção tecnológica mais aplicada em indústrias, devido ao seu rendimento global elevado, possibilidade de usar diversos combustíveis, vapor a alta pressão, vida útil e confiabilidade.

Neste trabalho, dividiu-se a simulação em três blocos:

- REATOR-CALDEIRA, que representa a entrada da biomassa e sua combustão, tendo por objetivo a troca de calor e conseqüentemente a formação de vapor;
- TURBINA, onde ocorrerá a conversão de energia mecânica em trabalho;
- RESFRIAMENTO-RECICLO, bloco responsável pela recuperação do fluido encaminhado pela turbina, implicando-lhe diminuição de temperatura (energia), e redireciona-o a caldeira novamente.

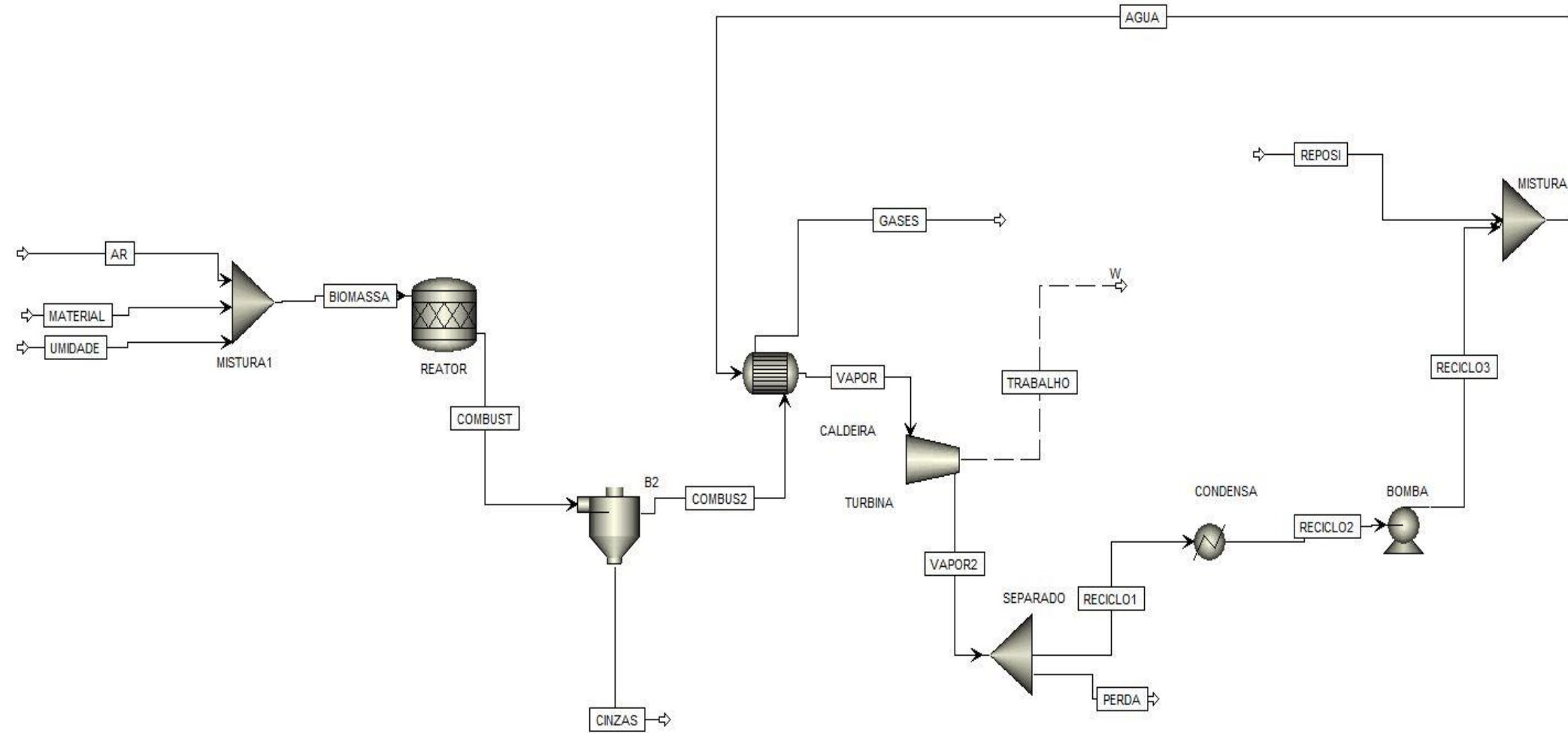


Figura 7. Diagrama de fluxo de processo (PFD) da geração de energia elétrica a partir do capim elefante.

O bloco Reator-Caldeira é o trocador de calor da simulação deste trabalho, pois devido à falta de componentes no programa computacional Aspen Plus que representassem o equipamento em um único bloco, foi realizada a modelagem com um misturador (identificado como Mistura1), o Reator, a Caldeira, destino para cinzas (identificado como Cinza), as correntes de Biomassa, de gás pós combustão (identificadas como Combust e Combust2), de Gases liberados na Caldeira e de Vapor formado na Caldeira. Mesmo com a representatividade de forma individualizada, nota-se a dependência entre os componentes envolvidos. O bloco Reator-Caldeira apresenta a entrada da Biomassa e Ar (ar atmosférico), e esses, quando no reator, sofrem o processo de queima, liberando energia suficiente para vaporizar a água presente na Caldeira. O vapor (Alta pressão) formado no processo é direcionado ao bloco Turbina. A Figura 8 expõe os equipamentos que fazem parte do bloco Reator-Caldeira.

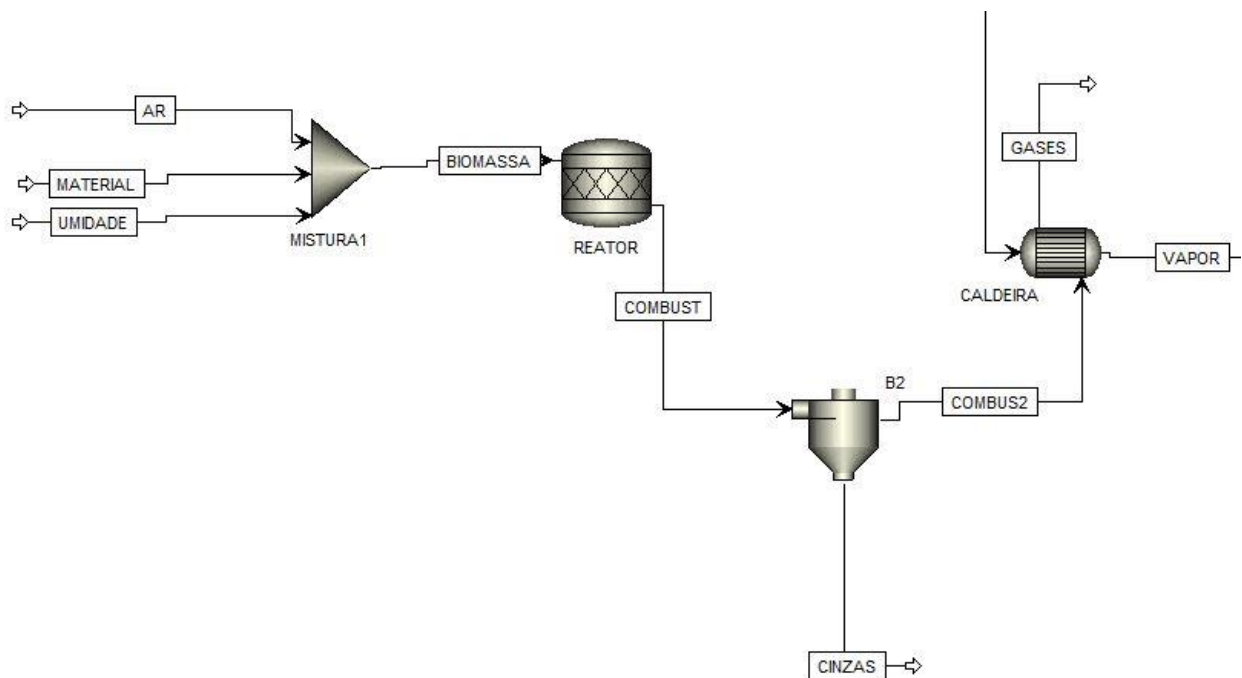


Figura 8. Bloco Reator-Caldeira.

O Vapor, em alta pressão, formado pela transferência de calor do gás de escape do processo de combustão e direcionando ao Bloco Turbina, tem por necessidade estar dentro dos parâmetros (Temperatura, pressão, composição e vazão) característicos dos

equipamentos, demonstrados nas Tabelas III, IV e V na sessão de 4.3 Simulação. O vapor em alta pressão, ao alcançar o conjunto de pás da turbina, transfere parte de sua energia para produzir rotação no mesmo, e conseqüentemente produz trabalho, o que acarreta uma redução de pressão e temperatura. Após passar pelo bloco Turbina, o Vapor2 é direcionado ao terceiro e último bloco, Resfriamento-Reciclo. A Figura 9 ilustra os elementos que compõem o bloco Turbina.

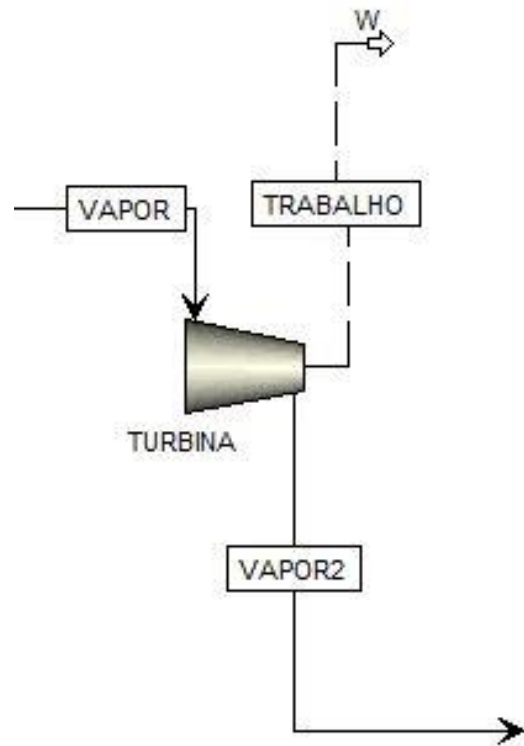


Figura 9. Bloco Turbina.

Ao deixar o bloco Turbina, Vapor2, que dispõe de pressão reduzida, conecta-se ao bloco Resfriamento-Reciclo, onde no condensador, foi resfriado e encaminhado para a bomba. Após ter a temperatura reduzida, a Água foi bombeada novamente a Caldeira, garantindo a continuidade do processo em ciclo fechado. A Figura 10 representa o bloco Resfriamento-Reciclo.



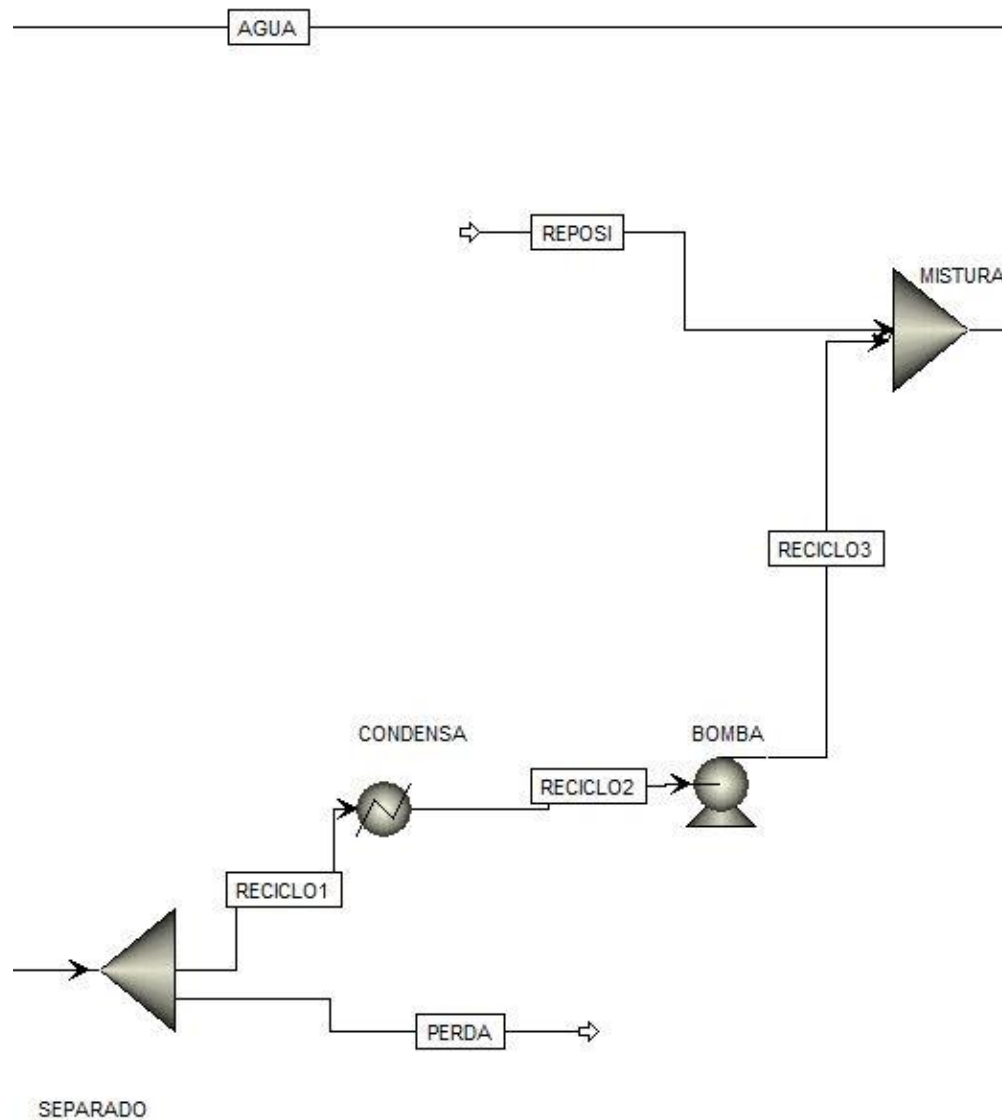


Figura 10. Bloco Resfriamento-Reciclo.

Nota-se, que as simulações foram realizadas respeitando as condições de operação de todos os equipamentos envolvidos, de acordo com os requisitos (temperatura, pressão, entalpia, vazão, composição e outros) cedidos pelos fornecedores, demonstrados nas Tabelas II, III e IV na seção 4.3 de Simulação. Os dados das correntes encontram-se dispostos nas Tabelas VI, VII, e VIII da variação genética 7, nas pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar.





Preparado o modelo, e introduzidas as condições de operações, iniciou-se as simulações e a coleta de informações, no caso desta etapa do trabalho, foram encontrados os valores de trabalho teórico e a eficiência do processo. As simulações foram realizadas para todas as 40 amostras, nas pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar, como pode ser observado nas tabelas IX, X e XI.

Tabela IX. Potência encontrada na simulação realizada com equipamentos com pressão de operação da caldeira a 40 bar.

POTÊNCIA PARA PRESSÃO 40 bar		
Nº do genótipo	Trabalho teórico (Aspen) (kW)	Eficiência (%)
7	23567,87	22,00
2	21584,71	
1	20136,95	
19	19552,71	
35	19380,40	
27	19077,48	
29	18818,78	
13	18590,07	
21	18573,38	
25	17882,70	
15	17640,02	
36	17590,53	
20	17310,09	
28	17252,37	
21	16978,00	
16	16673,14	
39	16584,78	
14	16157,00	
30	16089,98	
31	15727,89	
40	15730,19	
32	15718,63	
11	15623,63	
26	14801,72	
5	14620,29	
3	14159,36	
8	13446,16	
23	13372,85	

*Continuação*

POTÊNCIA PARA PRESSÃO 40 bar		
Nº do genótipo	Trabalho teórico (Aspen) (kW)	Eficiência (%)
9	13155,68	22,00
10	13044,21	
33	12856,97	
37	12068,89	
17	11863,80	
6	11834,45	
4	11061,33	
38	10675,75	
34	10331,01	
24	10145,87	
12	9928,83	
18	8699,19	

Tabela X. Potência encontrada na simulação realizada com equipamentos com pressão de operação da caldeira a 70 bar.

POTÊNCIA PARA PRESSÃO 70 bar		
Nº do genótipo	Trabalho teórico (Aspen) (kW)	Eficiência (%)
7	27172,77	26,00
2	24882,20	
1	23224,59	
19	22541,34	
35	22366,51	
27	21991,96	
29	21680,15	
13	21401,81	
21	21425,20	
25	20624,76	
15	20316,84	
36	20262,31	
20	19954,58	
28	19906,05	
21	19543,24	
16	19214,35	
39	19131,18	
14	18620,02	

*Continuação*

Nº do genótipo	Trabalho teórico (Aspen) (kW)	Eficiência (%)
30	18560,77	26,00
31	18149,88	
40	18138,66	
32	18139,50	
11	18007,25	
26	17077,42	
5	16850,42	
3	16317,05	
8	15506,38	
23	15426,01	
9	15131,88	
10	15037,90	
33	14818,46	
37	13911,30	
6	13654,23	
17	13686,84	
4	12764,42	
38	12299,58	
34	11907,26	
24	11675,82	
12	11451,73	
18	10033,20	

Tabela XI. Potência encontrada na simulação realizada com equipamentos com pressão de operação da caldeira a 140 bar.

POTÊNCIA PARA PRESSÃO 140 bar		
Nº do genótipo	Trabalho teórico (Aspen) (KW)	Eficiência (%)
7	30368,43	29,00
2	27873,75	
1	25996,24	
19	25223,28	
35	25021,53	
27	24612,75	
29	24285,55	
13	23979,32	

*Continuação*

POTÊNCIA PARA PRESSÃO 140 bar		
Nº do genótipo	Trabalho teórico (Aspen) (KW)	Eficiência (%)
21	23966,68	29,00
25	23113,70	
15	22764,85	
36	22690,73	
20	22341,16	
28	22279,67	
21	21897,32	
16	21510,92	
39	21428,92	
14	20849,58	
30	20779,01	
31	20297,23	
40	20286,73	
32	20284,09	
11	20151,50	
26	19120,91	
5	18851,83	
3	18257,49	
8	17259,32	
23	16927,37	
9	16816,28	
10	16808,43	
33	16580,40	
37	15579,82	
6	15307,99	
17	15286,01	
4	14273,88	
38	13759,54	
34	13327,45	
24	13081,17	
12	12824,30	
18	11224,32	

A partir da análise das respostas obtidas, torna-se importante ressaltar a influência que a condição de operação, pressão de entrada, tem sobre a eficiência do processo e

consequentemente sobre a produção de energia elétrica. Com base nas Tabelas IX, X e XI, coluna de eficiência, nota-se, portanto, que o resultado do trabalho teórico obtido é proporcional à pressão.

Realizadas as simulações, notou-se que independente da pressão, o Genótipo N<sup>o</sup>7 foi o mais indicado para ser utilizada para fins energéticos.

Verifica-se nas Tabelas IX, X e XI que a diferença de produção de trabalho entre o genótipo mais indicado para bioenergia, Genótipo N<sup>o</sup> 7, e o menos indicado, Genótipo N<sup>o</sup> 18, foi de 37%, independente da pressão. Por este fato, tornou-se necessário estudos que avaliassem quais propriedades eram mais significativas estatisticamente: umidade, cinzas, hemicelulose, celulose e lignina, ou seja, que mais influenciavam na resposta de trabalho, interferindo positivamente ou negativamente.

#### **5.1.1. VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO**

Após a construção do modelo do processo de conversão da biomassa em energia elétrica, realizou-se a validação da simulação. A validação é a etapa que demonstra se o modelo computacional adotado tem precisão necessária para representar o modelo real.

A validação neste trabalho foi realizada de duas formas, por determinação da potência teórica e experimental, e também por determinação do poder calorífico.

Caso os resultados de validação não se apresentassem em um limite de confiança previamente decidido (2% comparação entre os trabalhos e 5% comparação entre os valores de PCS), ajustes deveriam ser realizados no modelo de simulação novamente, pois espera-se do trabalho a aproximação com valores apresentados na realidade.



### 5.1.1.1. DETERMINAÇÃO DA POTÊNCIA TEÓRICA E EXPERIMENTAL

Utilizando-se as temperaturas de entrada e saída da turbina, obteve-se as entalpias necessárias no Smith, Van Ness e Abbott (2007). As entalpias consultadas foram introduzidas na Equação 11 para o cálculo do Trabalho Teórico.

A comparação entre o trabalho experimental e teórico foi realizada com todas as 40 amostras das variações genéticas do capim elefante cedidas pela EMBRAPA – Juíz de Fora. Os resultados dos trabalhos e as respectivas porcentagens (não superiores a 2%) de diferença podem ser visualizados apresentadas na Tabela XII.

Tabela XII. Validação por determinação de trabalho teórico e experimental.

Nº do genótipo	Entalpia vapor de entrada (kJ/Kg)	Entalpia vapor de saída (kJ/Kg)	Trabalho Teórico (MW)	Trabalho Experimental (Aspen) (MW)	% (Experimental/Teórico)
39	3325,44	2728,42	12,64	12,77	1,03
27	3324,98	2728,42	13,94	14,09	1,07
33	3324,90	2728,42	10,19	10,30	1,08
31	3324,75	2728,42	12,64	12,78	1,09
11	3324,07	2728,42	7,69	7,78	1,16
14	3324,13	2728,42	15,04	15,22	1,16
29	3324,00	2728,42	12,94	13,09	1,17
5	3323,72	2728,42	9,33	9,44	1,19
12	3323,59	2728,42	12,54	12,69	1,20
15	3323,63	2728,42	14,25	14,42	1,20
17	3322,96	2728,42	6,63	6,71	1,26
18	3322,98	2728,42	9,33	9,45	1,26
22	3323,04	2728,42	15,02	15,21	1,26
8	3322,87	2728,42	19,22	19,47	1,27
32	3322,84	2728,42	12,60	12,76	1,28
20	3322,60	2728,42	15,84	16,05	1,30
35	3322,54	2728,42	15,70	15,91	1,30
38	3322,57	2728,42	8,31	8,42	1,30
21	3322,47	2728,42	13,66	13,84	1,31
26	3322,51	2728,42	14,46	14,65	1,31
6	3322,42	2728,42	11,66	11,82	1,32
2	3322,31	2728,42	17,58	17,81	1,33
9	3322,22	2728,42	10,39	10,53	1,33

*Continuação*

Nº do genótipo	Entalpia vapor de entrada (kJ/Kg)	Entalpia vapor de saída (kJ/Kg)	Trabalho Teórico (MW)	Trabalho Experimental (Aspen) (MW)	% (Experimental/Teórico)
16	3322,28	2728,42	13,41	13,59	1,33
10	3322,14	2728,42	10,31	10,45	1,34
4	3321,99	2728,42	11,26	11,41	1,36
36	3321,96	2728,42	14,18	14,37	1,36
30	3321,69	2728,42	15,21	15,42	1,39
37	3321,68	2728,42	9,49	9,62	1,39
23	3321,33	2728,42	7,84	7,95	1,42
7	3321,21	2728,42	10,65	10,80	1,43
25	3321,25	2728,42	11,80	11,97	1,43
40	3321,25	2728,42	13,32	13,51	1,43
19	3320,97	2728,42	13,92	14,13	1,45
24	3322,22	2728,42	10,59	10,74	1,46
1	3324,56	2730,50	16,34	16,58	1,47
13	3320,76	2728,42	12,93	13,12	1,47
28	3320,66	2728,42	15,40	15,63	1,48
34	3320,73	2728,42	8,00	8,11	1,48
3	3314,42	2728,42	8,55	8,72	2,09

Os resultados da Tabela XII foram ilustrados no gráfico de medidos e preditos apresentado na Figura 11.

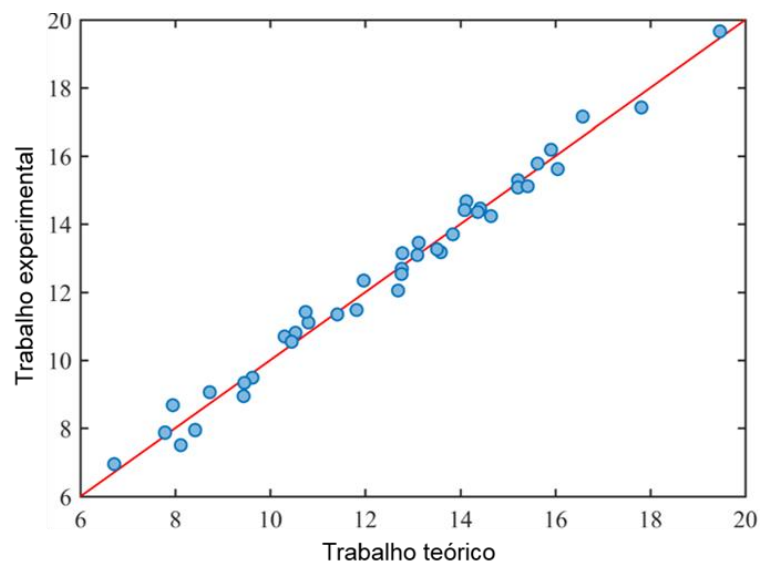


Figura 11. Valores preditos e medidos do trabalho gerado na turbina.

Nota-se na Tabela XII que as amostras, exceto Genótipo Nº 3, tiveram resultados próximos entre os trabalhos teóricos e trabalhos experimentais, com a diferença máxima entre as respostas igual a 2%. Na Figura 11, o gráfico de medidos e preditos, por apresentar os pontos de coincidência próximos a linha do ideal, demonstra claramente a aproximação entre os dados apresentados entre Trabalhos Teóricos e Trabalhos Experimentais.

### 5.1.1.2. DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO

A comparação entre os valores de PCS obtidos pela simulação e pelo calorímetro, além dos resultados de limite de confiança (não superiores a 5%), calculados para todas as 40 amostras das variações genéticas do capim elefante cedidas pela EMBRAPA – Juíz de Fora, podem ser visualizados apresentadas na Tabela XIII.

Tabela XIII. Validação por determinação do PCS.

Nº do Genótipo	ASPEM PCS (MJ/Kg)	CALORÍMETRO PCS (MJ/Kg)	PCS calorímetro/PCS Aspen (%)
21	18,72	18,59	0,71
22	17,95	17,95	1,00
5	18,44	18,08	1,96
1	18,73	18,32	2,21
17	18,64	18,22	2,23
6	18,63	18,19	2,36
18	18,59	18,14	2,42
8	18,62	18,13	2,61
11	18,55	18,06	2,67
39	18,76	18,24	2,74
9	18,51	17,99	2,79
13	18,96	18,43	2,82
37	18,76	18,21	2,94
3	18,66	18,09	3,04
23	18,52	17,94	3,13

*Continuação*

Nº do Genótipo	ASPEM PCS (MJ/Kg)	CALORÍMETRO PCS (MJ/Kg)	PCS calorímetro/PCS Aspen (%)
24	18,52	17,93	3,18
38	18,76	18,15	3,26
31	18,63	18,01	3,36
33	18,81	18,15	3,47
29	18,74	18,09	3,47
15	18,64	17,97	3,59
40	18,75	18,06	3,68
4	18,76	18,07	3,68
25	18,64	17,93	3,79
14	18,78	18,02	4,01
12	18,78	17,97	4,28
27	19,01	18,19	4,29
34	18,99	18,16	4,35
26	18,77	17,88	4,73
28	19,02	18,11	4,83
19	19,21	18,28	4,86
30	18,97	18,04	4,87
36	18,82	17,89	4,95
10	18,88	17,93	5,03
7	19,56	18,57	5,08
2	18,63	17,67	5,15
20	19,10	18,11	5,18
35	19,25	18,17	5,60
16	18,60	17,53	5,75
32	18,90	17,58	7,03

Observa-se que as amostras, exceto os genótipos de número 7, 2, 20, 35, 16, e 32, tiveram resultados satisfatórios entre os valores de PCS obtidos na simulação e no calorímetro, com a diferença máxima entre as respostas igual a 5%.

Nota-se na Figura 12, que o gráfico de medidos e preditos por apresenta os pontos de coincidência próximos a linha do ideal, demonstrando claramente a aproximação entre os dados apresentados entre PCS obtidos na simulação e no calorímetro.

O gráfico de medidos e preditos com os dados da Tabela XIII ilustram a precisão que a validação obteve, observa-se na Figura 12.

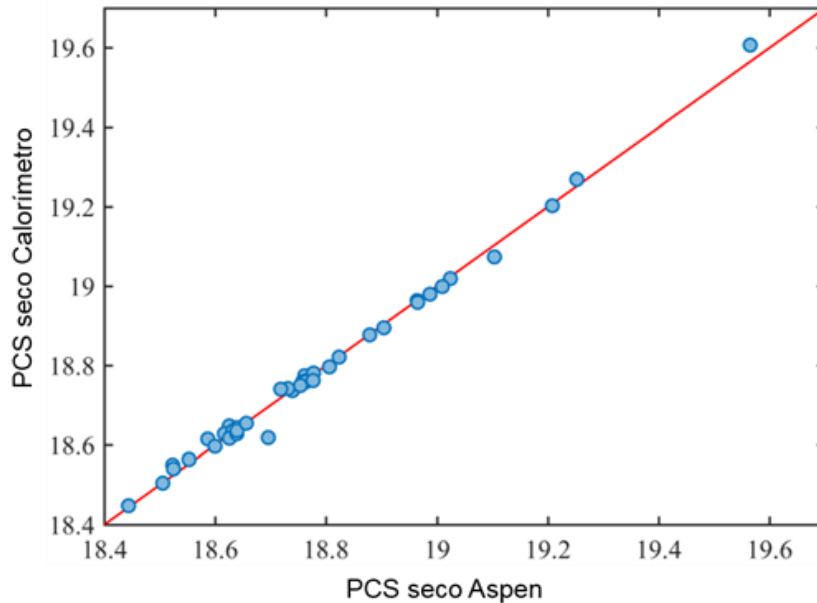


Figura 12. Gráfico medido e predito dos valores de PCS seco.

## 5.2. ANÁLISE ESTATÍSTICA

A necessidade da utilização de uma ferramenta estatística para analisar e interpretar uma grande quantidade de informações foi comprovada por meio da observação do conjunto de dados obtidos nesta proposta de trabalho, e avaliou-se, aplicando o método dos mínimos quadrados parciais, quais variáveis afetam a potência gerada na turbina.

Um pré-processamento dos dados foi necessário para atribuir pesos equivalentes às percentagens nas amostras. Assim, os dados foram auto-escalados antes de serem submetidos à análise de componentes principais.

A Figura 13 apresenta dois gráficos, *loadings* e *scores*. O gráfico *loadings* mostra o posicionamento no primeiro, segundo, terceiro e quarto quadrante, que as

composições químicas de celulose, lignina, hemicelulose, umidade e cinzas das amostras exercem maior influência sobre a potência da turbina. O gráfico scores, é a apresentação da distribuição das amostras entre os quadrantes de acordo com a composição química que têm maior influência no potencial energético da variedade genética.

Observa-se na Figura 13 que houve distribuição uniforme entre as 5 grandezas da composição química das variedades genéticas analisadas neste trabalho, e conseqüentemente, distribuição uniforme entre os quadrantes do gráfico scores, não apresentando formação de grupos. Todos os dados apresentaram-se dentro da margem de confiança exigida pelo trabalho, exceto a amostra 37, que se nota no gráfico scores, estar fora da linha de confiança.

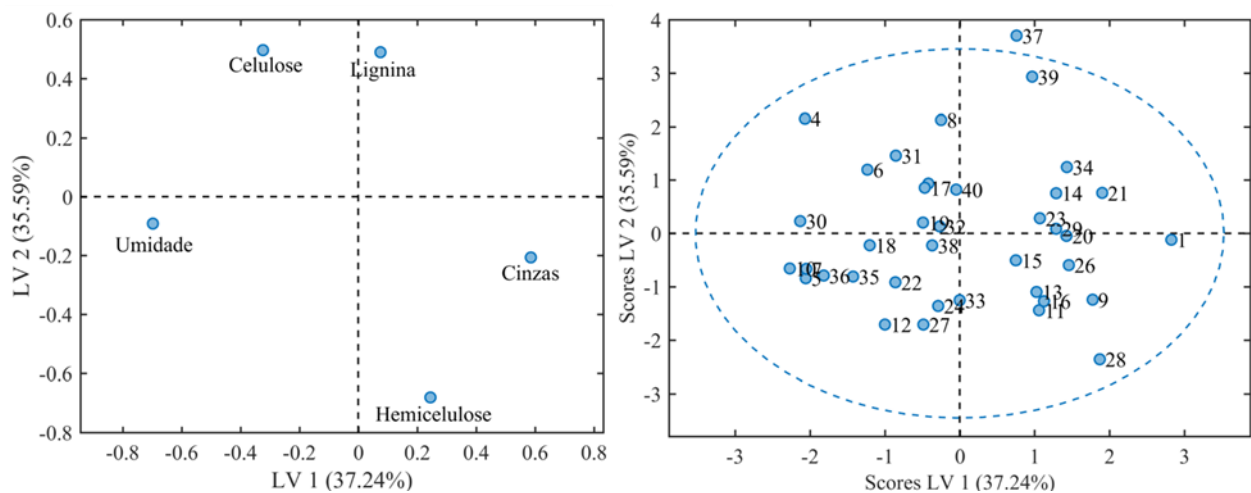


Figura 13. Gráficos scores e loadings para as 40 amostras de capim elefante.

Pela Figura 13, observa-se quais variedades genéticas têm o seu potencial energético mais influenciado pelas composições químicas de celulose, lignina, hemicelulose, umidade e cinzas, mas nota-se também a ineficiência dos gráficos em quantificar se a influência contribui positivamente ou negativamente. Por este fato os dados foram também apresentados no gráfico de coeficiente de regressão para os componentes químicos do capim elefante (Figura 14).

Pela Figura 14 observa-se que a umidade diminui o potencial energético da variedade genética, pois o coeficiente de regressão é negativo assim como a hemicelulose e as cinzas. A lignina e a celulose aumentam a potência da turbina, pois o coeficiente de regressão é positivo. Assim, a variável que mais afeta negativamente a potência é umidade, e positivamente, a lignina.

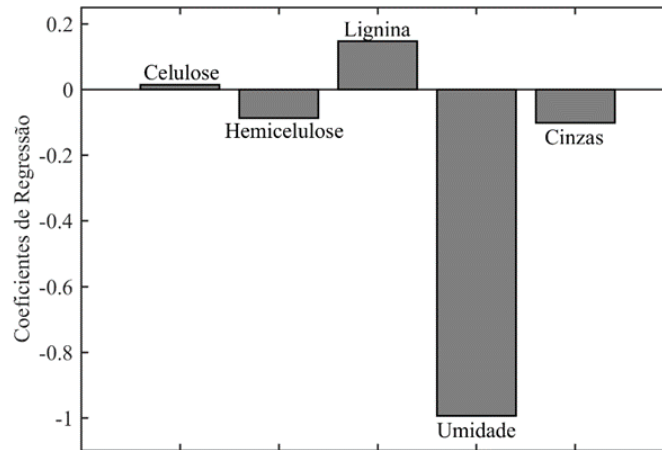


Figura 14. Gráfico de coeficiente de regressão para componentes do capim elefante.

### 5.3. ANÁLISE ECONÔMICA

O objetivo desta seção é fornecer e comparar as informações relativas aos custos de produção e da viabilidade econômica do uso das diferentes variações genéticas do capim elefante para a produção de energia elétrica. Os resultados a seguir referem-se à composição química do genótipo 7, que apresentou maior potencial energético, e para os outros genótipos foram utilizados a mesma metodologia de cálculo.

#### 5.3.1. CUSTOS DE EQUIPAMENTOS

Os custos de compra do turbo gerador completo (sistema de condensação, unidade hidráulica, painel de controle, acessórios, serviços de supervisão de instalação,

comissionamento e partida para as três configurações de processo) foram obtidos a partir de fornecedores.

Nota-se que os custos dos equipamentos aumentam de acordo com as três configurações de processo (pressões de operação da caldeira), cujo valores representativos são 40 bar, 70 bar e 140 bar, de acordo com as simulações realizadas no programa computacional Aspen Plus. O aumento do investimento nas diferentes configurações é devido ao fato que todo o conjunto operacional é modificado devido ao aumento da pressão e conseqüentemente a capacidade de produção. Nas Tabelas XIV, XV e XVI estão apresentados os custos dos equipamentos.

Tabela XIV. Custos de equipamentos com pressão de 40 bar.

CAPEX	
TURBO GERADOR COMPLETO (SISTEMA DE CONDENSAÇÃO, UNIDADE HIDRÁULICA, PAINEL DE CONTROLE, ACESSÓRIOS, SERVIÇOS DE SUPERVISÃO DE INSTALAÇÃO, COMISSIONAMENTO E PARTIDA).	R\$ 17.500.000,00
CALDEIRA (110 TON/H, 40BAR, 450°C)	R\$ 25.000.000,00
VALOR TOTAL	R\$ 42.500.000,00

Tabela XV. Custos de equipamentos com pressão a 70 bar.

CAPEX	
TURBO GERADOR COMPLETO (SISTEMA DE CONDENSAÇÃO, UNIDADE HIDRÁULICA, PAINEL DE CONTROLE, ACESSÓRIOS, SERVIÇOS DE SUPERVISÃO DE INSTALAÇÃO, COMISSIONAMENTO E PARTIDA).	R\$ 18.000.000,00
CALDEIRA (110 TON/H, 70BAR, 530°C)	R\$ 35.000.000,00
VALOR TOTAL	R\$ 53.000.000,00

Tabela XVI. Custos de equipamentos com pressão a 140 bar.

CAPEX	
TURBO GERADOR COMPLETO (SISTEMA DE CONDENSAÇÃO, UNIDADE HIDRÁULICA, PAINEL DE CONTROLE, ACESSÓRIOS, SERVIÇOS DE SUPERVISÃO DE INSTALAÇÃO, COMISSIONAMENTO E PARTIDA).	R\$ 18.400.000,00
CALDEIRA (110 TON/H, 140BAR, 540°C)	R\$ 47.000.000,00
VALOR TOTAL	R\$ 65.400.000,00



### 5.3.2. CAPITAL FIXO INVESTIDO E CAPITAL DE GIRO

O capital necessário para as instalações da planta e fábrica (área fabril) é chamado de capital fixo investido (FCI), enquanto que o capital necessário para a operação da planta é denominado capital de giro (WC). A soma do capital fixo investido e do capital de giro é conhecido como investimento de capital total (TCI). O capital fixo pode ser subdividido em capital fixo investido de manufatura, também conhecido como custo direto e capital fixo investido de não-manufatura, também conhecido como custo indireto (PETERS, IMMERSHAUS e WEST, 2003). Nas Tabelas XVII, XVIII e XIX são apresentadas as percentagens típicas para estimar o capital fixo investido baseado no custo de compra total dos equipamentos obtido no item 4.3.1 para a configuração de baixa pressão, média pressão e alta pressão.

Tabela XVII. Capital fixo investido em equipamentos (pressão a 40 bar).

Custos com equipamentos a 40 bar	
	Valor calculado, milhões R\$
Custos diretos	
Custo total de equipamentos	42,50
Instalação equipamentos	16,57
Instrumentação e controle	11,05
Tubulação (instalada)	13,17
Instalações elétricas	4,25
Construção civil	12,32
Pátio e jardinagem	5,10
Instalações dos serviços	23,37
Totais custos diretos	128,35
Custos indiretos	
Engenharia e supervisão	13,60
Despesas de construção	14,45
Pagamentos com empreiteiras	1,70
Taxa contrato	8,07
Contingências	15,72
Totais custos indiretos	53,55
Capital fixo investido	181,90
Capital giro	31,87
Investimento capital total	213,77

Tabela XVIII. Capital fixo investido em equipamentos (pressão a 70 bar).

Custos com equipamentos a 70 bar	
	Valor calculado, milhões R\$
Custos diretos	
Custo total de equipamentos	53,00
Instalação equipamentos	20,67
Instrumentação e controle	13,78
Tubulação (instalada)	16,43
Instalações elétricas	5,30
Construção civil	15,37
Pátio e jardinagem	6,36
Instalações dos serviços	29,15
Totais custos diretos	160,06
Custos indiretos	
Engenharia e supervisão	16,96
Despesas de construção	18,02
Pagamentos com empreiteiras	2,12
Taxa contrato	10,07
Contigências	19,61
Totais custos indiretos	66,78
Capital fixo investido	226,84
Capital giro	39,75
Investimento capital total	266,59

Tabela XIX. Capital fixo investido em equipamentos (pressão a 140 bar).

Custos com equipamentos a 140 bar	
	Valor calculado, milhões R\$
Custos diretos	
Custo total de equipamentos	65,40
Instalação equipamentos	25,50
Instrumentação e controle	17,00
Tubulação (instalada)	20,27
Instalações elétricas	6,54
Construção civil	18,96
Pátio e jardinagem	7,84
Instalações dos serviços	35,97
Totais custos diretos	197,50
Custos indiretos	
Engenharia e supervisão	20,92
Despesas de construção	22,23
Pagamentos com empreiteiras	2,61
Taxa contrato	12,42

*Continuação*

Custos com equipamentos a 140 bar	
	Valor calculado, milhões R\$
Custos indiretos	
Contigências	24,19
Totais custos indiretos	82,40
Capital fixo investido	279,91
Capital giro	49,05
Investimento capital total	328,96

Na Tabela XX está apresentado o investimento de capital fixo e capital de giro, baseado no custo total de compra dos equipamentos para as diferentes pressões de operação da planta de geração de energia elétrica. Observa-se que quanto maior o custo dos equipamentos maior é o investimento e o capital de giro.

Tabela XX. Valores de investimento de capital fixo e capital de giro.

Despesas	40 bar	70 bar	140 bar
Investimento de capital fixo (R\$ milhões)	213,70	266,60	328,90
Capital de giro (R\$ milhões)	31,80	39,75	49,05

### 5.3.3. CUSTOS MATÉRIA PRIMA

Os custos do capim elefante foram cedidos pela equipe da EMBRAPA, em colheitas realizadas numa área da empresa Gado e Leite, implantada em Juiz de Fora (MG), região da Zona da Mata. Os custos relativos a biomassa inclui preparo e correção do solo, as mudas, o plantio, os tratos culturais, colheita e ensilagem. Na Tabela XXI são apresentados os valores adotados para os cálculos de valores anuais gastos com água e capim elefante de acordo com a necessidade dos equipamentos que operaram em diferentes pressões (40, 70 e 140).

Tabela XXI. Custos anuais das matérias primas.

	Material	Preço (R\$/Kg)	Quantidade anual, milhões ao ano	Valor anual Milhões R\$ ao ano
Custos (40 bar)	Capim Elefante (Kg)	0,11	723,60	59,69
	Água (100 m <sup>3</sup> )	0,41	0,03 - 0,10	0,01 - 0,04
Custos (70 bar)	Capim Elefante (Kg)	0,11	723,60	59,69
	Água (m <sup>3</sup> )	0,41	0,03 - 0,11	0,01 - 0,04
Custos (140 bar)	Capim Elefante (Kg)	0,11	723,60	59,69
	Água (m <sup>3</sup> )	0,41	0,03 - 0,09	0,01 - 0,04

#### 5.3.4. CUSTOS DE UTILIDADES

As utilidades da planta de geração de energia elétrica a partir do capim elefante foram água de resfriamento e ar. Os custos de água foram cedidos por fornecedores, e diferentemente da água de processos, a água de resfriamento não necessariamente precisa passar por um processo de pré-tratamento, isso justifica a diferença de preço entre as duas, onde uma apresenta valor de R\$ 0,20 e a outra R\$ 0,41. A Tabela XXII apresenta as quantidades utilizadas fornecidas pelo programa computacional Aspen Plus e os valores anuais em milhões.

Tabela XXII. Custos anuais das utilidades.

	Utilidade	Custo (R\$/100 m <sup>3</sup> )	Quantidade anual, milhões m <sup>3</sup> /ano	Valor anual Milhões R\$/ano
Custos 40 bar	Água de resfriamento (m <sup>3</sup> )	0,2	17,19 - 46,49	3,44 - 9,30
	Ar (m <sup>3</sup> )	0,4	715,5 - 1185,67	2,86 - 4,74
Custos 70 bar	Água de resfriamento (m <sup>3</sup> )	0,2	17,19 - 46,49	3,44 - 9,30
	Ar (m <sup>3</sup> )	0,4	715,5 - 1185,67	2,86 - 4,74
Custos 140 bar	Água de resfriamento (m <sup>3</sup> )	0,2	15,78 - 42,70	3,17 - 8,54
	Ar (m <sup>3</sup> )	0,4	715,5 - 1185,67	2,86 - 4,74

### 5.3.5. CUSTO TOTAL ANUAL DO PRODUTO

Na Tabela XXIII, são apresentados os dados necessários para calcular o custo total do produto (CTP), como o investimento de capital fixo, calculado no item 5.3.2, quantidades anuais de matéria-prima na seção 5.3.3, utilidades no tópico 5.3.4 e mão-de-obra. Os itens restantes foram fornecidos com os valores especificados. Os dados utilizados na Tabela XXIII são referentes a variedade genética 7, por essa ser o de maior potencial energético, e a pressão de operação na caldeira igual a 40 bar.

Para os devidos cálculos do CTP, utilizou-se a equação 12. Nota-se, que na equação 12, os valores de A(n) representam os valores dos custos dos Itens (A) em milhões anuais.

$$ANUAL (CTP) = \frac{(A1) + (A2) + (A3) + \dots + (A18) + (A19) + (A20)}{1 - (B8) - (B9) - (B19) - (B20)} \quad (12)$$

*Item (A)*: os valores dos custos dos Itens (A), R\$/ano;

*Fator (B)*: fator de multiplicação;

*Custo base (D)*: Custo base, milhões R\$/ano.

$$ANUAL(CTP) = 126,97R\$ /ano$$

Tabela XXIII. Demonstrativo de dados requeridos para calcular custo total.

Item (A)	Fator (B)	Custo base, milhões R\$/ano (D)	Custo, milhões R\$/ano (E)
1. Matéria-prima			59,70
2. Mão-de-obra (M)			0,29
3. Supervisão	0,15	0,29	0,04

Continuação

Item (A)	Fator (B)	Custo base, milhões R\$/ano (D)	Custo, milhões R\$/ano (E)
4.Utilidades			11,67
5.Manutenção e reparos (MR)	0,06	287,53	17,25
6.Fornecedores	0,15	17,25	2,59
7.Laboratório	0,15	0,29	0,04
8.Royalties	0,01	126,97	1,27
9.Catalisadores e solventes	0,00		0,00
Custos variáveis			92,85
10. Taxas (propriedades)	0,02	287,53	5,75
11.Financiamento (juros)	0,00	287,53	0,00
12.Seguro	0,01	287,53	2,88
13.Aluguel	0,00	287,53	0,00
14.Depreciação	Calculado separadamente		
Custos fixos			8,63
15. Despesas gerais	0,60	17,58	10,55
16.Despesas gerais planta			10,55
17.Custo manufatura			112,03
18.Administração	0,20	17,58	3,52
19.Distribuição & vendas	0,05	126,97	6,35
20.Pesquisa & desenvolvimento	0,04	126,97	5,08
Despesas gerais			14,94
Custo total anual do produto sem depreciação = $c_0$			126,97

Nas Tabelas XXIV, XXV e XXVI são apresentados os resultados do custo de produção de energia elétrica para todas os genótipos referentes as pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar, respectivamente. Observa-se que quanto maior a pressão de operação, menor teor de umidade e maior teor de lignina, menor é o custo de energia elétrica considerando uma mesma variedade. Nas condições de operação, com pressões de vapor da caldeira nos valores de 40 bar, 70 bar e 140 bar, a variedade genética 7, foi a que apresentou o menor custo. Conforme observado no item 5.1 Simulação, essa variedade apresentou o maior trabalho produzido. De acordo com a análise dos quadrados mínimos parciais a umidade tem o maior efeito na potência produzida, influenciando negativamente, e a lignina é a composição química que mais interfere positivamente, o que justifica a variedade genética 7 ser a mais apta entre as 40.

Tabela XXIV. Custos de produção anual a pressão de 40 bar.

Nº do genótipo	Custo de produção	Produção anual, milhões KWh/ano	Custo R\$/KWh
7	139,15	189,49	0,73
2	138,12	173,54	0,80
1	137,20	161,90	0,85
19	136,86	157,20	0,87
35	136,79	155,82	0,88
27	136,56	153,38	0,89
29	136,44	151,30	0,90
13	136,32	149,46	0,91
21	136,34	149,33	0,91
25	135,95	143,78	0,95
15	135,74	141,83	0,96
36	135,72	141,43	0,96
20	135,60	139,17	0,97
28	135,12	138,71	0,97
21	135,44	136,50	0,99
16	135,22	134,05	1,01
39	135,19	133,34	1,01
14	134,91	129,90	1,04
30	134,88	129,36	1,04
31	134,63	126,47	1,06
40	134,75	126,45	1,07
32	134,62	126,38	1,07
11	134,67	125,61	1,07
26	134,04	119,01	1,13
5	134,04	117,55	1,14
3	133,75	113,84	1,17
8	133,35	108,11	1,23
23	133,23	107,52	1,24
9	133,11	105,77	1,26
10	133,07	104,88	1,27
33	132,99	103,37	1,29
37	132,56	97,03	1,37
17	132,47	95,38	1,39
6	132,46	95,15	1,39
4	131,93	88,93	1,48
38	131,75	85,83	1,54
34	131,52	83,06	1,58
24	131,34	81,57	1,61

*Continuação*

Nº do genótipo	Custo de produção	Produção anual, milhões KWh/ano	Custo R\$/KWh
12	131,25	79,83	1,64
18	130,52	69,94	1,87

Tabela XXV. Custos de produção anual a pressão de 70 bar.

Nº do genótipo	Custo de produção	Produção anual, milhões KWh/ano	Custo R\$/KWh
7	144,83	218,47	0,66
2	143,19	200,05	0,72
1	142,94	186,73	0,77
19	141,87	181,23	0,78
35	142,53	179,83	0,79
27	142,31	176,82	0,80
29	142,20	174,31	0,82
13	142,09	172,07	0,83
21	142,10	172,26	0,82
25	141,72	165,82	0,85
15	141,52	163,35	0,87
36	141,50	162,91	0,87
20	141,39	160,43	0,88
28	141,27	160,04	0,88
21	141,32	157,13	0,90
16	141,02	154,48	0,91
39	140,99	153,81	0,92
14	140,71	149,70	0,94
30	140,69	149,23	0,94
31	140,44	145,93	0,96
40	139,98	145,83	0,96
32	140,44	145,84	0,96
11	140,49	144,78	0,97
26	139,87	137,30	1,02
5	139,88	135,48	1,03
3	139,59	131,19	1,06
8	139,21	124,67	1,12
23	139,09	124,03	1,12
9	138,98	121,66	1,14
10	138,94	120,90	1,15
33	138,86	119,14	1,17



*Continuação*

Nº do genótipo	Custo de produção	Produção anual, milhões KWh/ano	Custo R\$/KWh
37	138,45	111,85	1,24
17	138,35	109,78	1,26
6	138,35	110,04	1,26
4	137,84	102,63	1,34
38	137,84	98,89	1,39
34	137,43	95,73	1,44
24	137,27	93,87	1,46
12	137,18	92,07	1,49
18	136,47	80,67	1,69

Tabela XXVI. Custos de produção anual a pressão de 140 bar.

Nº do genótipo	Custo de produção	Produção anual, milhões KWh/ano	Custo R\$/KWh
7	153,04	244,16	0,63
2	152,07	224,10	0,68
1	151,21	209,01	0,72
19	150,88	202,80	0,74
35	150,82	201,17	0,75
27	150,60	197,89	0,76
29	150,49	195,26	0,77
13	150,40	192,79	0,78
21	150,39	192,69	0,78
25	150,03	185,83	0,81
15	149,83	183,03	0,82
36	149,82	182,43	0,82
20	149,71	179,62	0,83
28	149,59	179,13	0,84
21	149,65	176,05	0,85
16	149,35	172,95	0,86
39	149,32	172,29	0,87
14	149,05	167,63	0,89
30	149,03	167,06	0,89
31	148,79	163,19	0,91
40	148,79	163,11	0,91
32	148,78	163,08	0,91
11	148,84	162,02	0,92
26	148,23	153,73	0,96

*Continuação*

Nº do genótipo	Custo de produção	Produção anual, milhões KWh/ano	Custo R\$/KWh
5	148,25	151,57	0,98
3	147,97	146,79	1,01
8	147,47	138,76	1,06
23	147,38	136,10	1,08
9	147,34	135,20	1,09
10	147,42	135,14	1,09
33	147,26	133,31	1,10
37	146,85	125,26	1,17
17	146,77	123,08	1,19
6	146,76	122,90	1,19
4	146,27	114,76	1,27
38	146,10	110,63	1,32
34	145,87	107,15	1,36
24	145,71	105,17	1,39
12	145,63	103,11	1,41
18	144,94	90,24	1,61

### 5.3.6. ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO

O estudo para análise da viabilidade econômica baseou-se na montagem de um fluxo de caixa considerando os recursos necessários para a implantação e operação da planta de eletricidade (despesas) e os recursos disponíveis para o pagamento destes custos (receitas).

A operação das plantas foi assumida em modo contínuo por 8040 horas por ano com uma taxa de imposto de 20%. O tempo de vida da planta foi definido em 10 anos, com retorno de investimento de 15% ao ano, tempo de retorno de 3,6 anos e valor presente líquido igual a zero (PETERS, IMMERHAUS e WEST, 2003).

Essas três últimas medidas de rentabilidade são calculadas de acordo com as equações 13, 14 e 15 respectivamente. O procedimento de depreciação (desvalorização financeira da planta ao final do processo comparado ao seu valor inicial) usado foi o

Modified Accelerated Cost Recovery System (MACRS). Entende-se por depreciação a desvalorização financeira da planta ao final do processo comparado ao seu valor inicial. Nesse método, linear de MACRS, calcula-se uma nova percentagem de depreciação que foi incluída nos cálculos a cada ano da vida útil do ativo, ou seja, aplica-se somente a vida útil restante do ativo em vez da vida útil de depreciação original. Como citado já citado, o fluxo de caixa deve cumprir com 3 requisitos, e estes calcula-se utilizando as equações 13, 14 e 15.

$$\text{Retorno de investimento} = \frac{100 \cdot \text{Lucro líquido anual}}{((\text{Tempo}_{(\text{ano})}) \cdot (\text{Capital de investimento total}))} \quad (13)$$

$$\text{Tempo de retorno} = \frac{\text{Capital fixo de investimento}}{\left( \frac{\text{Fluxo de caixa operacional anual}}{\text{Tempo}_{(\text{ano})}} \right)} \quad (14)$$

$$\text{Retorno líq.} = \frac{\text{Lucro líq. anual}}{\text{Tempo}_{(\text{ano})}} + (\text{Capital total de invest.}) * (\% \text{ desconto de composição anual}) \quad (15)$$

Para demonstrar a estrutura da montagem do fluxo de caixa utilizado neste trabalho, utilizou-se os valores econômicos da variedade genética que apresentou maior potencial em conversão da biomassa para energia elétrica, o capim elefante cujo genótipo é identificado neste trabalho como N° 7. Acrescenta-se, que a configuração de operação utilizada na conversão da variedade genética, que será apresentada na Tabela XXVII, foi pressão de vapor da caldeira igual 40 bar. Na Tabela XXVII é apresentada a montagem do fluxo de caixa utilizada para a variedade genética N° 7 e para todas as outras 39 variedades.

Tabela XXVII. Fluxo de caixa para o genótipo de capim elefante Nº 7.

Itens	Tempo (ano)														Soma
	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1. Terra, R\$10^6		0,00	0,00	0,00										0,00	0,00
2. Investimento de capital fixo, R\$10^6		-27,29	-64,94	-94,62											-186,85
3. Capital de giro, R\$10^6				-32,74										32,74	0,00
4. Valor do salvamento, R\$10^6														0,00	0,00
5. Investimento de capital total, R\$10^6		-27,29	-64,94	-127,37											-219,59
6. Investimento anual, R\$10^6					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7. Custo de início, R\$10^6					-18,68										
8. Taxa de operação					0,50	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
9. Vendas anuais, R\$10^6					115,59	208,06	231,17	231,17	231,17	231,17	231,17	231,17	231,17	231,17	2173,02
10. Custo total anual do produto (s/ depreciação), R\$10^6					-86,13	-134,75	-149,40	-152,39	-155,43	-158,54	-161,71	-164,95	-168,25	-171,61	-1503,16
11. Fator de depreciação, 1/ano					0,20	0,32	0,19	0,12	0,12	0,06					
12. Desvalorização anual, R\$10^6/ano					37,37	59,79	35,87	21,52	21,52	10,76					186,85
13. Lucro bruto anual, R\$10^6					-26,60	13,52	45,9	57,26	54,21	61,87	69,46	66,22	62,93	59,56	464,33
14. Lucro líquido anual, R\$10^6					-26,60	10,81	36,72	45,81	43,37	49,49	55,57	52,98	50,34	47,65	366,14
15. Fluxo de caixa operacional anual, R\$10^6					10,77	70,61	72,59	67,33	64,9	60,26	55,57	52,98	50,34	47,65	552,99
16. Total do fluxo de caixa anual, R\$10^6	0,00	-27,29	-64,94	-127,37	10,77	70,61	72,59	67,33	64,9	60,26	55,57	52,98	50,34	47,65	333,4
17. Posição de caixa acumulada, R\$10^6	0,00	-27,29	-92,22	-219,59	-208,82	-138,22	-65,62	1,71	66,61	126,86	182,43	235,41	285,75	333,4	

A partir do fluxo de caixa mostrado na Tabela XXVII foi possível determinar o preço de venda de energia elétrica, considerando as medidas de rentabilidade expressas nas equações 5, 6 e 7. As Tabelas XXVIII, XIX e XXX apresentam o preço de energia elétrica para os genótipos de capim elefante nas pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar. Como discutido no item 4.1 observa-se também que quanto maior o teor de lignina, menor o teor de umidade e a pressão de operação da caldeira menor é o preço de venda de energia elétrica.

Tabela XXVIII. Estudo de viabilidade (40 bar).

Nº do genótipo	Custo R\$/KWh	Preço de venda (R\$/KWh)
7	0,73	1,22
2	0,80	1,33
1	0,85	1,42
19	0,87	1,46
35	0,88	1,47
27	0,89	1,49
29	0,90	1,51
13	0,91	1,53
21	0,91	1,53
25	0,95	1,58
15	0,96	1,60
36	0,96	1,61
20	0,97	1,63
28	0,97	1,64
21	0,99	1,66
16	1,01	1,69
39	1,01	1,70
14	1,04	1,74
30	1,04	1,75
31	1,06	1,79
40	1,07	1,79
32	1,07	1,79
11	1,07	1,80
26	1,13	1,89
5	1,14	1,92
3	1,17	1,98
8	1,23	2,08
23	1,24	2,09
9	1,26	2,12

*Continuação*

Nº do genótipo	Custo R\$/KWh	Preço de venda (R\$/KWh)
10	1,27	2,14
33	1,29	2,17
37	1,37	2,30
17	1,39	2,34
6	1,39	2,35
4	1,48	2,51
38	1,54	2,59
34	1,58	2,68
24	1,61	2,72
12	1,64	2,78
18	1,87	3,16

Tabela XXIX. Estudo de viabilidade (70 bar).

Nº do genótipo	Custo R\$/KWh	Preço de venda (R\$/KWh)
7	0,66	1,17
2	0,72	1,27
1	0,77	1,35
19	0,78	1,39
35	0,79	1,40
27	0,80	1,43
29	0,82	1,45
13	0,83	1,46
21	0,82	1,46
25	0,85	1,52
15	0,87	1,54
36	0,87	1,54
20	0,88	1,56
28	0,88	1,57
21	0,90	1,60
16	0,91	1,62
39	0,92	1,63
14	0,94	1,67
30	0,94	1,68
31	0,96	1,71
40	0,96	1,71
32	0,96	1,71
11	0,97	1,73

*Continuação*

26	1,02	1,81
5	1,03	1,84
3	1,06	1,90
8	1,12	1,99
23	1,12	2,00
9	1,14	2,04
10	1,15	2,05
33	1,17	2,08
37	1,24	2,21
17	1,26	2,25
6	1,26	2,25
4	1,34	2,40
38	1,39	2,49
34	1,44	2,57
24	1,46	2,62
12	1,49	2,67
18	1,69	3,03

Tabela XXX. Estudo de viabilidade (140 bar).

Nº do genótipo	Custo R\$/KWh	Preço de venda (R\$/KWh)
7	0,63	1,16
2	0,68	1,26
1	0,72	1,35
19	0,74	1,39
35	0,75	1,40
27	0,76	1,42
29	0,77	1,44
13	0,78	1,46
21	0,78	1,46
25	0,81	1,51
15	0,82	1,53
36	0,82	1,53
20	0,83	1,56
28	0,84	1,56
21	0,85	1,59
16	0,86	1,62
39	0,87	1,62
14	0,89	1,66

*Continuação*

30	0,89	1,67
31	0,91	1,71
40	0,91	1,71
32	0,91	1,71
11	0,92	1,72
26	0,96	1,81
5	0,98	1,83
3	1,01	1,89
8	1,06	2,00
23	1,08	2,03
9	1,09	2,05
10	1,09	2,05
33	1,10	2,08
37	1,17	2,21
17	1,19	2,24
6	1,19	2,25
4	1,27	2,40
38	1,32	2,49
34	1,36	2,57
24	1,39	2,61
12	1,41	2,66
18	1,61	3,03

O valor médio de venda da energia proveniente dos equipamentos de 40 bar apresenta diferença significativa comparando-se com os valores de energia relacionados aos equipamentos de 70 e 140 bar. Diferente desta situação, encontra-se os valores praticamente iguais de venda de energia originadas dos equipamentos cuja limitações são 70 e 140 bar. Esta situação deve-se a baixa eficiência dos equipamentos a 40 bar, 22% (Tabela IX), e o custo relativamente alto, R\$ 42.500.000,00.



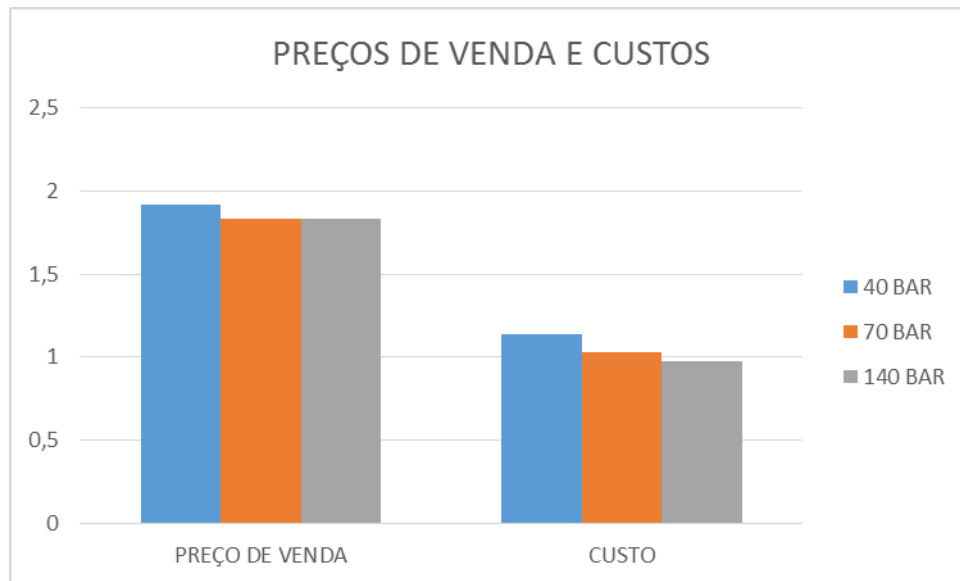


Figura 15. Preços de venda e custos médios das 40 amostras de capim elefante.

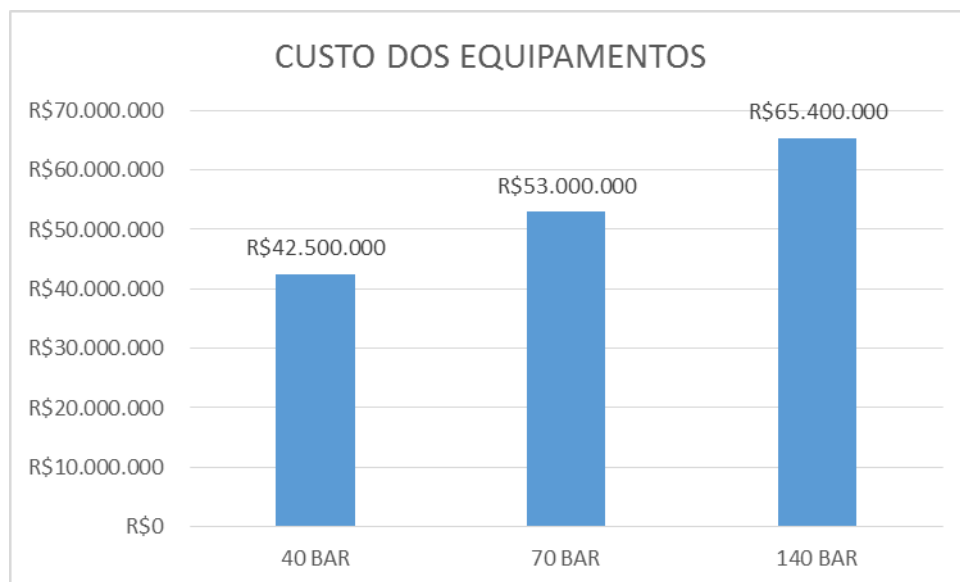


Figura 16. Custos dos equipamentos para as pressões de 40 bar, 70 bar e 140 bar.

Na Tabela XXX, observa-se que o preço de venda do capim elefante é rentável, desde que respeite as medidas de rentabilidade, tais como retorno de investimento (15 % ao ano), tempo de retorno (3,6 anos) e valor presente líquido (0). Deste modo, o preço

mais acessível de venda da energia elétrica ficaria em R\$ 1,16 por KWh, para uma vazão de 1500 kg/min de capim elefante, umidade de 60% e pressão de operação da caldeira de 140 bar. No entanto, de acordo com a Tabela XXXI este valor é superior aos praticados nas usinas para as regiões Sudeste, Centro Oeste, Nordeste e Norte. Além disso, não estão incluídos os custos com transporte e distribuição da energia gerada até o consumidor e encargos e tributos.

Os preços médios entre os meses de janeiro de 2017 e janeiro de 2018 são apresentados na Tabela 30.

\*SE/CO: Sudeste/Centro Oeste; S: Sul; NE: Nordeste; N: Norte 2018.

Tabela XXXI. Preço médio mensal da energia por região entre 01/2017 e 01/2018 (R\$/KWh) (CCEE, 2017).

\*SE/CO: Sudeste/Centro Oeste; S: Sul; NE: Nordeste; N: Norte 2018.

Mês	Submercado			
	SE/CO*	S*	NE*	N*
jan/18	0,18	0,18	0,18	0,14
dez/17	0,24	0,24	0,23	0,23
nov/17	0,43	0,43	0,43	0,43
out/17	0,53	0,53	0,53	0,53
set/17	0,52	0,52	0,52	0,52
ago/17	0,51	0,51	0,51	0,51
jul/17	0,28	0,28	0,28	0,28
jun/17	0,12	0,66	0,14	0,13
mai/17	0,41	0,41	0,42	0,17
abr/17	0,37	0,37	0,37	0,34
mar/17	0,22	0,22	0,28	0,34
fev/17	0,13	0,13	0,16	0,82
jan/17	0,12	0,12	0,14	0,12

Assim, foram realizadas variações paramétricas nos custos dos equipamentos, na vazão e no preço de capim elefante para tornar o preço da energia encontrada nesse trabalho dentro dos preços praticados na Tabela XXXI,

Considerando uma vazão de capim elefante 25% maior, as temperaturas de entrada de vapor na turbina bem como a vazão de vapor foram superiores as especificações técnicas das Tabelas III, IV e VII, portanto, com o aumento da vazão de capim elefante não foi possível diminuir tanto o custo quanto o preço de venda da energia elétrica.

Reduzindo o preço do capim elefante em 25%, o preço de energia seria de R\$ 1,00 por KWh. Nota-se pela Tabela XXXI que para o preço da energia fique competitivo, R\$ 0,65 por KWh no Sul, o preço do capim elefante teria que ser R\$ 10,00 a tonelada. Assim, a planta de geração de energia poderia ser implantada onde o preço seria mais próximo do encontrado neste trabalho. O custo de produção do capim também é uma variável fundamental no preço da energia.

Supondo que a usina de geração de energia elétrica já existe ou tenha os custos de investimento pagos (prazo de retorno 3,6 anos), o preço da energia diminui e torna-se competitivo no mercado, e torna-se dependente da vida útil da planta industrial. Os valores de venda da energia são apresentados na tabela XXXII.

Tabela 32. Valor de venda da energia de acordo com a vida útil da planta industrial.

Vida útil da planta industrial	Valor de venda (R\$/KWh)
10 anos	0,67
20 anos	0,42

Considerando a variedade genética nº 33, com 68% de umidade, a variedade genética nº 7, com 60% de umidade e teores próximos de lignina, o preço diminui de R\$ 2,17 por KWh para R\$ 1,22 por KWh, ou seja, houve uma redução de 44%. Portanto, a umidade é uma das principais variáveis que afeta o preço da energia. Estudo de novos processos que possam melhorar as características do capim elefante como combustível, por exemplo a secagem, são alternativas para diminuir o preço da energia elétrica

produzida, uma vez que a umidade é uma das principais variáveis que afeta a potência, de acordo com a análise estatística da seção 4.2, e conseqüentemente o preço de venda.

## 6. CONCLUSÃO

O processo de produção de energia elétrica a partir do capim elefante foi desenvolvido no Aspen Plus® a partir dos dados de caracterização cedidos pela EMBRAPA – Juíz de Fora, e dados encontrados na literatura, comprovando o programa, ser uma ótima ferramenta de análise para casos de produção de energia elétrica utilizando a queima de biomassa como fonte de energia.

A avaliação da influência da composição química da biomassa realizada utilizando o método dos mínimos quadrados parciais provou-se eficiente, e encontrou-se que quanto maior a concentração de lignina no capim elefante, maior será a potência gerada na conversão em energia. Diferente da umidade, que interfere de forma negativa.

Ao realizar testes de comparação entre os trabalhos teóricos e experimentais, e correlacionar os valores de PCS da simulação e o PCS do calorímetro, os resultados conferidos apresentaram valores semelhantes e dentro do limite de confiança, o que certifica a confiabilidade das respostas encontradas na simulação.

Realizou-se os estudos de viabilidade técnica e econômica utilizando o programa computacional Aspen Plus® incluindo comparações com os valores de venda do produto final no mercado. Os melhores preços de venda (R\$/KWh) obtidos em cada configuração dos equipamentos e respeitando as medidas de rentabilidade, e analisando a melhor variedade genética (BAGCE 23 - Napier S.E.A.) foram: R\$ 1,22 para 40 bar, R\$ 1,17 para 70 bar e R\$ 1,16 para 140 bar. O preço do produto final após pagar o investimento é de R\$ 0,42 por kWh, demonstrando ser competitivo no mercado de energia.

## 7. REFERÊNCIAS

ASPENTECH. **Aspen Plus**, v.9. 2017.

CARDOSO, B. M. **Uso da biomassa como alternativa energética**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

CCEE. Câmara de comercialização de energia elétrica. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/inicio?\\_afLoop=223790264255705#!%40%40%3F\\_afLoop%3D223790264255705%26\\_adf.ctrl-state%3D17ba5gnu7k\\_49](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/inicio?_afLoop=223790264255705#!%40%40%3F_afLoop%3D223790264255705%26_adf.ctrl-state%3D17ba5gnu7k_49). Acessado em 20 de fevereiro de 2018.

CERON, L. F. e PORTO, L. P. CONVENCÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS: Protocolo de Kyoto e a Política Nacional Sobre Mudança do Clima. **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v. 8, p. 529-540, 2013.

COELHO, C. D.; SILVA, D. D.; SEDIYAMA, G. C.; MOREIRA, M. C.; PEREIRA, S. B. e LANA, Â. M. Q. Comparison of the water footprint of two hydropower plants in the Tocantins River Basin of Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 164-175, 2017.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. e GÓMEZ, E. I. (Org.). **Biomassa para energia**. Editora da UNICAMP, 2008.

DIAS, M. O. S. **Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir da cana-de-açúcar**. 2011. Tese de Doutorado. D Sc. Thesis, FEQ/Unicamp, Campinas, (in portuguese).

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Disponível em: <[www.embrapa.br](http://www.embrapa.br)>. Acesso em: 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Paginas/default.aspx>>. Acessado em 12 de abril de 2017.

FERREIRA, L. C. C. Caracterização do potencial energético entre a produção de etanol celulósico e a cogeração a partir do bagaço de cana. 2012.

FONTOURA, C.F.V.T. **Avaliação de projeto de investimento em usina termelétrica à capim-elefante: uma abordagem pela teoria de opções reais**. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 86 f. 2011.

GÍRIO, F. M.; FONSECA, C.; CARVALHEIRO, F.; DUARTE, L. C.; MARQUES, S. e BOGEL-LUKASIK. Hemi-celluloses for fuel ethanol: A review. **Bioresource Technology**, v.101, p. 4775 -4800, 2010.

GOLDEMBERG, José. Biomass and energy. *Química nova*, v. 32, n. 3, p. 582-587, 2009.

JANNUZZI, G. D. M. Uma avaliação das atividades recentes de P&D em energia renovável no Brasil e reflexões para o futuro. **Energy Discussion Paper**, n. 2.64-01, p. 03, 2003.

JENKINS, B. M.; BAXTER, L. L.; MILES JR, T. R. e MILES, T. R. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, p. 17-46, 1998.

JORGENSEN, H.; KRISTENSEN, J. B. e FELBY, C. Enzymatic conversion of lignocellulose into ferment-able sugars: challenges and opportunities. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v.1, n. 2, p. 119-134, 2007.

KAUSHAL, P. e TYAGI, R. Advanced simulation of biomass gasification in a fluidized bed reactor using ASPEN PLUS. **Renewable Energy**, v. 101, p. 629-636, 2017.

LEITE, R. C. D. C. e LEAL, M. R. L. O biocombustível no Brasil. **Novos estudos-CEBRAP**, n. 78, p. 15-21, 2007.

LIBONI, L. B. e CEZARINO, L. O. Impactos sociais e ambientais da indústria da cana-de-açúcar. **Future Studies Research Journal**, v.4, n.1, p.202-230, 2012.

LOPES, Guilherme de Andrade. **Uso energético de resíduos madeireiros em um pólo de produção de cerâmicas vermelhas do Estado de São Paulo**. 2012. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, 2012.

MME. Ministério de Minas e Energia. Disponível em < <http://www.mme.gov.br/>>. Acessado em 09 de maio de 2017.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta et al. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. ANEEL, 2000.

OLIVEIRA, N. A. B. **O uso do sorgo biomassa para cogeração: aspectos técnicos e econômicos**. Dissertação (mestrado) - Escola de Economia de São Paulo, da Fundação Getúlio Vargas – EESP/FGV, 94 f. 2016.



PATRIZI, C. R. F.; MADRUGA JÚNIOR, T. P.; MINETTO, E. E. e NOGUEIRA, M. G. Efeito de aditivos biológicos comerciais na silagem de capim-elefante (*Pennisetum purpureum Schum*). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 56, n. 392, p. 392-397, 2004.

PETERS M. S., TIMMERHAUS K.D., WEST R. E., **Plant Design and Economics for Chemical Engineers**. 5 ed. McGraw-Hill Education. Colorado. 2002.

PERALTA-ZAMORA, P.; MORAIS, J. L. e NAGATA, N. Por que otimização multivariada. **Nota técnica Eng. Sanitária e ambiental**, v. 10, n. 2, p. 106-110, 2005.

PEREIRA, M. P. D. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L.; CARNEIRO, A. D. C. O. e COSTA, A. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 269-275, 2016.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S. e AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, v. 89, p. 100-106, 2005.

QUOILIN, S.; VAN DEN BROEK, M.; DECLAYE, S.; DEWALLEF, P. e LEMORT, V. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 168–186, 2013;

RABELO, S. C.; CARRERE, H.; MACIEL FILHO, R. e COSTA, A. C. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. **Bioresource Technology**, v.102, p. 7887-7895, 2011.

REIS, R. A.; RODRIGUES, L. R. A. e PEREIRA, J. R. A. A suplementação como estratégia de manejo da pastagem. Simpósio sobre manejo da pastagem, v. 13, p. 123-150, 1997.

SANTOS, F. A. Biocombustíveis: prós e contras. Vila Real. UTAD. 18pp.

SEABRA, J. E. A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil.** Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos), Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

SILVA, E. D. Eucalipto e capim elefante: características e potencial produtivo de biomassa. **Revista Agrogeoambiental**, v. 2, n. 1, 2010.

SIMIONI, C. A. **O Uso de Energia Renovável Sustentável na Matriz Energética Brasileira: obstáculos para o planejamento e ampliação de políticas sustentáveis.** Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento) – Programa de Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SMEETS, E. M. W. e FAAIJ, A. P. C. The impact of sustainability criteria on the costs and potentials of bioenergy production—Applied for case studies in Brazil and Ukraine. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, n. 3, p. 319-333, 2010.

SMITH, V. N.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química.** 7a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

STREZOV, V.; EVANS, T. J. e HAYMAN, C. Thermal conversion of elephant grass (Pennisetum Purpureum Schum) to bio-gas, bio-oil and charcoal. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 8394-8399, 2008.

TAVARES, L. S. e SILVA, R. C. Integração energética de uma planta de produção de monocloreto de vinila utilizando a Análise Pinah. 2017.

TELMO, C. e LOUSADA, J. Heating values of wood pellets from different species. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 35, p. 2634-2639, 2011.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resources 2016**. World Energy Council, 2016.

WOOLEY, R. J.; PUTSCHE, V. Development of an ASPEN PLUS Physical Property Database for Biofuels Components. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado 80401-3393, April 1996.