



Universidade Federal
do Rio de Janeiro
Escola Politécnica

ANÁLISE DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA ALIMENTADA POR UMA MISTURA DE BIOMASSAS

Ignacio Moura Murta

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Silvio Carlos Anibal de Almeida

RIO DE JANEIRO
AGOSTO DE 2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Departamento de Engenharia Mecânica
DEM/POLI/UFRJ



ANÁLISE DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA ALIMENTADA POR UMA MISTURA DE BIOMASSAS

Ignacio Moura Murta

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Silvio Carlos Anibal de Almeida; D.Sc. (Orientador)

Prof. Thiago Gamboa Ritto; D.Sc.

Prof. Juliana Braga Rodrigues Loureiro; D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2013

Murta, Ignacio Moura

Análise de uma usina sucroalcooleira alimentada por uma mistura de biomassas. / Ignacio Moura Murta. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

X, 60 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Silvio Carlos Anibal de Almeida; D.Sc

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 53-54.

1. Cogeração. 2. Bagaço. 3. Biomassa. 4. Mistura. I. Almeida, Silvio Carlos Aníbal de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Engenharia Mecânica. III. Título

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, Jacqueline Moura da Silva e Flávio Fulgêncio Murta, e meu irmão Pedro Moura Murta por todo apoio ao longo do curso.

À minha namorada Ivy Soares de Barros, pelo apoio e compreensão nesse momento tão importante.

Ao meu orientador Silvio Carlos Anibal de Almeida pela paciência e disposição em sempre ajudar nos momentos de dúvida.

Ao pessoal da DAEQ, em especial aos amigos Betão, Alcir e Gláucio.

Ao amigo Diego Borges, que me acompanha e me dá forças desde o início dessa longa jornada.

Aos meus amigos da faculdade que partilharam essa jornada comigo. Todos sabendo do grande desafio que nos esperava, mas sabendo também que triunfaríamos.

Resumo do projeto de graduação apresentado ao DEM/UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

ANÁLISE DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA ALIMENTADA POR UMA MISTURA DE BIOMASSAS

Ignacio Moura Murta

Agosto/2013

Orientador: Silvio Carlos Anibal de Almeida; D.Sc.

Curso: Engenharia Mecânica

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta que auxilia a análise do funcionamento de usinas sucroalcooleiras com cogeração de energia. A planilha, desenvolvida na plataforma Microsoft Excel, permite avaliar o efeito da variação de alguns parâmetros de operação no desempenho de uma usina: potência gerada nas turbinas, potência de bombeamento, calor fornecido para o processo, índices de desempenho e comercialização de energia.

Além disso, esta ferramenta permite calcular o poder calorífico do bagaço de cana com diferentes teores de umidade e de misturas de bagaço com outras biomassas. Este recurso é original e importante porque a utilização de misturas de biomassas possibilita aumentar o tempo de operação das usinas para além do período da safra, diminuindo o custo de geração de eletricidade. São realizadas duas simulações de uma usina do oeste paulista variando-se o combustível da caldeira e para finalizar, é feita uma análise comparando estas simulações.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEM/UFRJ as a part of fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

ANALYSIS OF A SUGARCANE MILL POWERED BY A BLEND OF BIOMASS

Ignacio Moura Murta

August/2013

Advisor: Silvio Carlos Anibal de Almeida; D.Sc.

Course: Mechanical Engineering

This paper presents the development of a tool that assists the analysis of the operation sugarcane mills with energy cogeneration. The spreadsheet, developed in Microsoft Excel platform, allows evaluate the effect of varying some operating parameters on the performance of a plant: power generated in the turbines, pumping power, heat supplied to the process, performance indices and energy trading.

Furthermore, this tool allows the calculation of the calorific value of bagasse with different levels of moisture and mixtures of bagasse with other biomass. This feature is original and important because the blend of biomass helps to increase the operating time of the plant beyond the harvest's period reducing the cost of electricity generation. Are performed two simulations of a plant of western São Paulo varying the boiler's fuel, beyond an analysis comparing these simulations.

Índice Geral

Índice de Figuras	viii
Índice de Tabelas	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Motivação	1
1.3 Objetivo	2
1.4 Organização do trabalho.....	3
2 Cogeração de Energia no Setor Sucroalcooleiro	4
2.1 Aspectos Gerais	4
2.2 Desenvolvimento da Cogeração no Setor Sucroalcooleiro	6
2.3 Caracterização dos Sistemas de Cogeração do Setor Sucroalcooleiro.....	7
3 Ferramenta para Simulação - Planilha BIOMIX.....	10
3.1 Planilha BIOMIX	11
3.1.1 Aba “Simulador”.....	12
3.1.2 Aba “Validação da Simulação”.....	17
3.1.3 Aba “Safra”	19
3.1.4 Aba “Combustível”	21
3.1.5 Aba “Relatório Comparativo”	30
4 Estudo de Caso	36
4.1 Introdução	36
4.2 Descrição da usina simulada	36
4.3 Caso A – Usina utilizando bagaço como combustível.....	39
4.4 Caso B – Usina utilizando mistura de biomassa com combustível.....	44
5 Conclusões e Recomendações Finais	52
6 Bibliografia.....	53
7 Apêndice A – Planilha BIOMIX configurada para o caso B	55

Índice de Figuras

Figura 1 – Ciclos topping (a) e bottoming (b).	5
Figura 2 – Diagrama de um sistema de cogeração com turbinas a vapor de contrapressão.....	7
Figura 3 – Ciclo com utilização de turbinas de contrapressão e condensação.....	8
Figura 4 – Ciclo com utilização de turbinas de extração-condensação.	8
Figura 5 – Esquema de uma usina com turbina de extração-condensação e eletrificação total.....	9
Figura 6 – Tela de abertura da planilha BIOMIX.	11
Figura 7 – Visualização completa da aba “Simulador”.	12
Figura 8 – Representação esquemática de uma usina sucroalcooleira.....	13
Figura 9 – Visualização completa da aba “Validação da Simulação”.	17
Figura 10 – Gráfico comparativo dos dados reais e simulados.	18
Figura 11 – Visualização completa da aba “Validação da Simulação”.	19
Figura 12 – Visualização completa da aba “Combustível”.....	21
Figura 13 – Botões de resposta.	22
Figura 14 – Caixa de combinação de biomassa.....	24
Figura 15 – Unidade em que será informada a quantidade da biomassa.....	24
Figura 16 – Aba do relatório comparativo do funcionamento da usina.	30
Figura 17 – Planta de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista.	37
Figura 18 – Gráfico comparativo entre valores simulados e reais da usina.	42
Figura 19 – Comparação do tempo de funcionamento da usina.	49
Figura 20 – Comparação da energia elétrica a ser comercializada.	49
Figura 21 – Comparação da receita total da usina com a venda de excedentes.....	50
Figura 22 – Comparação relação combustível-vapor.	50
Figura 23 – Comparação custo da eletricidade.	51

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Dados termodinâmicos da planta estudada (entrada)	13
Tabela 2 – Eficiência dos equipamentos da usina (entrada)	14
Tabela 3 – Demanda dos equipamentos eletrificados (entrada)	14
Tabela 4 – Resultados da simulação da planta.....	16
Tabela 5 – Dados reais da planta original (entrada).....	17
Tabela 6 – Dados da planta simulados pela planilha.	17
Tabela 7 – Erros relativos a simulação.	18
Tabela 8 – Resposta da planilha para simulação validada.....	19
Tabela 9 – Dados da safra de cana-de-açúcar (entrada).	20
Tabela 10 – Resultados da safra de cana-de-açúcar.	21
Tabela 11 – Propriedades do bagaço (entrada).....	22
Tabela 12 – Planilha solicitando valor do PCI do Bagaço (entrada).....	23
Tabela 13 – Planilha fornecendo valor do PCI do Bagaço.	23
Tabela 14 – Propriedades da Biomassa (entrada).....	23
Tabela 15 – Seleção da biomassa para mistura (entrada).....	24
Tabela 16 – Inserindo porcentagem de biomassa misturada.....	25
Tabela 17 – Inserindo toneladas de biomassa para mistura.	25
Tabela 18 – Resultados da Planilha.....	29
Tabela 19 –Custos para operação da usina alimentada com bagaço (entrada).....	30
Tabela 20 – Custos para operação da usina alimentada com o combustível (entrada).	30
Tabela 21 – Preço de venda da eletricidade para operação com bagaço (entrada)....	31
Tabela 22 – Preço de venda da eletricidade para operação com combustível (entrada).	31
Tabela 23 – Poder calorífico inferior do combustível.....	31
Tabela 24 – Consumo total do combustível.	31
Tabela 25 – Potência elétrica líquida para operação com o combustível.	31
Tabela 26 – Poder calorífico inferior do bagaço.	32
Tabela 27 – Consumo total de bagaço.	32
Tabela 28 – Potência elétrica líquida para operação com bagaço.....	32
Tabela 29 – Balanço de energia elétrica na usina alimentada com bagaço.	32
Tabela 30 – Balanço de energia elétrica na usina alimentada com o combustível.....	33
Tabela 31 – Tempo de operação da usina operando o combustível	33
Tabela 32 – Horas de operação da usina com o combustível.	33

Tabela 33 – Relação combustível-vapor operando com o combustível.....	33
Tabela 34 – Tempo de operação da usina operando com bagaço.....	33
Tabela 35 – Horas de operando da usina operando com bagaço.....	33
Tabela 36 – Relação combustível-vapor para operação com bagaço.....	34
Tabela 37 – Custo da eletricidade (COE do combustível).....	34
Tabela 38 – Custo da eletricidade (COE do bagaço)	34
Tabela 39 – Receita com a venda de excedentes para operação com o combustível.	35
Tabela 40 – Receita com a venda de excedentes para operação com bagaço.....	35
Tabela 41 – Dados de safra da usina considerada.	38
Tabela 42 – Parâmetros de operação da usina considerada.	38
Tabela 43 – Potência eletromecânica, térmica, irreversibilidades e eficiência para os equipamentos da planta estudada.	39
Tabela 44 – Parâmetros operacionais configurados no simulador da usina.....	40
Tabela 45 – Eficiências dos equipamentos adotadas no simulador da usina.	40
Tabela 46 – Demanda dos equipamentos eletrificados.....	40
Tabela 47 – Resultados termodinâmicos obtidos da simulação.	41
Tabela 48 – Valores termodinâmicos utilizados para avaliação da simulação.....	41
Tabela 49 – Erros relativos a simulação dos parâmetros termodinâmicos.	42
Tabela 50 – Dados adotados para a análise da safra.	43
Tabela 51 – Resultados obtidos na análise da safra de cana-de-açúcar.....	43
Tabela 52 – Propriedades do bagaço de cana.....	43
Tabela 53 – Análise final da usina – Caso A.....	44
Tabela 54 – Proporção das biomassas na mistura.	45
Tabela 55 – Propriedades da Biomassa adotada (casca de arroz).	45
Tabela 56 – Análise final da usina – Caso B.....	46
Tabela 57 – Custo estimado dos equipamentos da usina e custos com amortização. 47	47
Tabela 58 – valores adotados para análise comparativa.	47
Tabela 59 – Relatório da usina utilizando bagaço como combustivel.....	48
Tabela 60 – Relatório da usina utilizando a mistura como combustivel.....	48

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Um dos grandes desafios encontrados pelo setor energético do governo é o planejamento para atender ao quadro da crescente demanda energética do país. Esse desafio implica não só em pesados investimentos no setor, mas também na escolha da fonte de energia a ser adotada, podendo essa ser renovável ou não.

Dentre todas as fontes de energia existentes, o Brasil tem a característica de ter 42,4% da sua oferta interna oriunda de fontes renováveis, enquanto a média mundial é de 13,2% e de 8% em países desenvolvidos (Ministério de Minas e Energia, 2013).

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2013, em 2012, 76,9% da energia elétrica fornecida no Brasil foi proveniente de usinas hidrelétricas, o que representa uma queda de 4,9% quando comparado ao ano de 2011, apesar do aumento da potência instalada do setor. Isso se deve as condições hidrológicas observadas especialmente na segunda metade do ano de 2012.

Para atender o aumento de 3,8 do consumo final de eletricidade puxado pelas famílias e pelo setor de serviço no ano de 2012, foi necessário o aumento da geração térmica convencional, o que representa uma tentativa da diversificação da matriz energética do país.

Uma das fontes convencionais para a geração térmica no Brasil parte do aproveitamento dos resíduos da indústria da cana. Entre os principais resíduos desta indústria, destaca-se o bagaço que é comumente queimado para a geração de vapor em caldeiras de tecnologia simples, com dois grandes objetivos, o de gerar energia para consumo próprio e ter o mínimo de bagaço excedente possível.

1.2 Motivação

Mesmo havendo um estímulo por parte do governo aos investimentos no setor hidrelétrico, pode ser observado um decréscimo da participação da geração hídrica na matriz energética nacional.

Para evitar uma crise energética como a vivenciada em 2001, onde um período de seca acentuada levou ao baixo nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas, principal fonte de energia elétrica do país, faz-se necessário o investimento em diferentes fontes de energia para a diversificação da matriz energética do Brasil.

Neste cenário, as usinas sucroalcooleiras representam uma excelente alternativa para esta diversificação, pois mesmo não operando durante todo o ano, são umas das principais fontes para a geração térmica do país.

Outro fato que justifica o investimento em usinas de açúcar é o fato de essas se encontrarem em sua maioria no estado de São Paulo, o que facilita a interligação com a rede nacional de distribuição de energia.

O tempo médio de funcionamento de uma usina sucroalcooleira é de aproximadamente 7 meses, principalmente devido ao ciclo da cana de açúcar. Uma alternativa para otimizar as plantas já existentes e elevar a participação deste setor na matriz energética nacional é a diversificação do combustível utilizado, o que poderia prolongar o tempo de operação dessas usinas.

Foi realizado um levantamento bibliográfico e verificado que não há trabalhos relacionados a este tema. Neste sentido, pode-se dizer que este trabalho é original e será de grande utilidade para estudos na área.

1.3 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo simular o funcionamento de uma usina sucroalcooleira que emprega uma mistura de biomassas como combustível para cogeração.

A utilização de mistura de biomassas é um recurso original e possibilita aumentar o tempo de operação da usina durante o ano para além do período da safra, diminuindo o custo de geração de eletricidade, além de prover flexibilidade no emprego do combustível.

Para a realização desta simulação, foi desenvolvida uma ferramenta com a utilização da planilha eletrônica Microsoft Excel, que será apresentada detalhadamente no capítulo 3.

A ferramenta desenvolvida (planilha BIOMIX) permite calcular o PCI das biomassas empregadas e da mistura, analisar a safra de cana de açúcar estimando o

potencial de produção de bagaço, calcular a energia elétrica gerada e a renda obtida com a venda de excedentes além do tempo de operação da usina.

Partindo do estudo da planta real de uma usina do oeste paulista realizado por PASSOLONGO (2011), foi realizado um estudo de caso propondo a mistura do bagaço oriundo da safra de cana-de-açúcar com casca de arroz.

1.4 Organização do trabalho

Para melhor entendimento, além do presente capítulo, este trabalho divide-se em mais 5 capítulos, conforme a seguinte organização:

No capítulo 2 são apresentados os conceitos básico da cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, além de seu desenvolvimento e caracterização dos sistemas neste setor.

No capítulo 3 é enunciado toda a metodologia referente ao desenvolvimento da ferramenta de simulação, apresentando todos os cálculos utilizados e a sua utilização por parte do usuário.

No capítulo 4 é apresentada o estudo de caso escolhido para a análise, sua modelagem no simulador proposto, bem como uma pequena análise dos resultados apresentados.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões relativas a simulação proposta e sugestionado tópicos a serem abordados e explorados em trabalhos futuros.

Por fim, no capítulo 6, são encontradas as referências bibliográficas deste trabalho.

2 Cogeração de Energia no Setor Sucroalcooleiro

2.1 Aspectos Gerais

De acordo com a Resolução ANEEL 235/2006, Art.3, *cogeração é definida como um processo operado para fins da produção combinada das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária de combustível para qualquer que seja o ciclo termodinâmico.*

Normalmente, são utilizados os ciclos Rankine, que são aqueles que empregam turbinas a vapor, e/ou os ciclos Brayton, que utilizam turbinas a gás para a cogeração (FIOMARI, 2004).

Pelo fato de serem obtidas potência térmica e potência mecânica utilizando uma mesma fonte de energia, os sistemas de cogeração tornam-se atrativos por apresentarem eficiências maiores do que aquelas encontradas quando ambas as formas de energia são produzidas em processos independentes. Estas eficiências podem ser da ordem de 75 a 90 % (WALTER, 1994).

O processo sequencial de geração de eletricidade e consumo de energia térmica útil admite duas possibilidades de acordo com a ordem de produção das formas de energia. O ciclo topping é o mais frequentemente encontrado na prática, especialmente no setor sucroalcooleiro. Neste ciclo, o vapor é utilizado para produzir primeiramente potência elétrica, sendo que a energia térmica resultante é recuperada e depois utilizada no processo produtivo. Nos chamados ciclos bottoming, a energia térmica residual associada aos processos industriais que precisam de alta temperatura é empregada para a produção de energia elétrica, situação está mais comum em indústrias químicas (SÁNCHEZ PRIETO, 2003).

Na Figura 1 são mostrados os ciclos topping e bottoming mencionados.

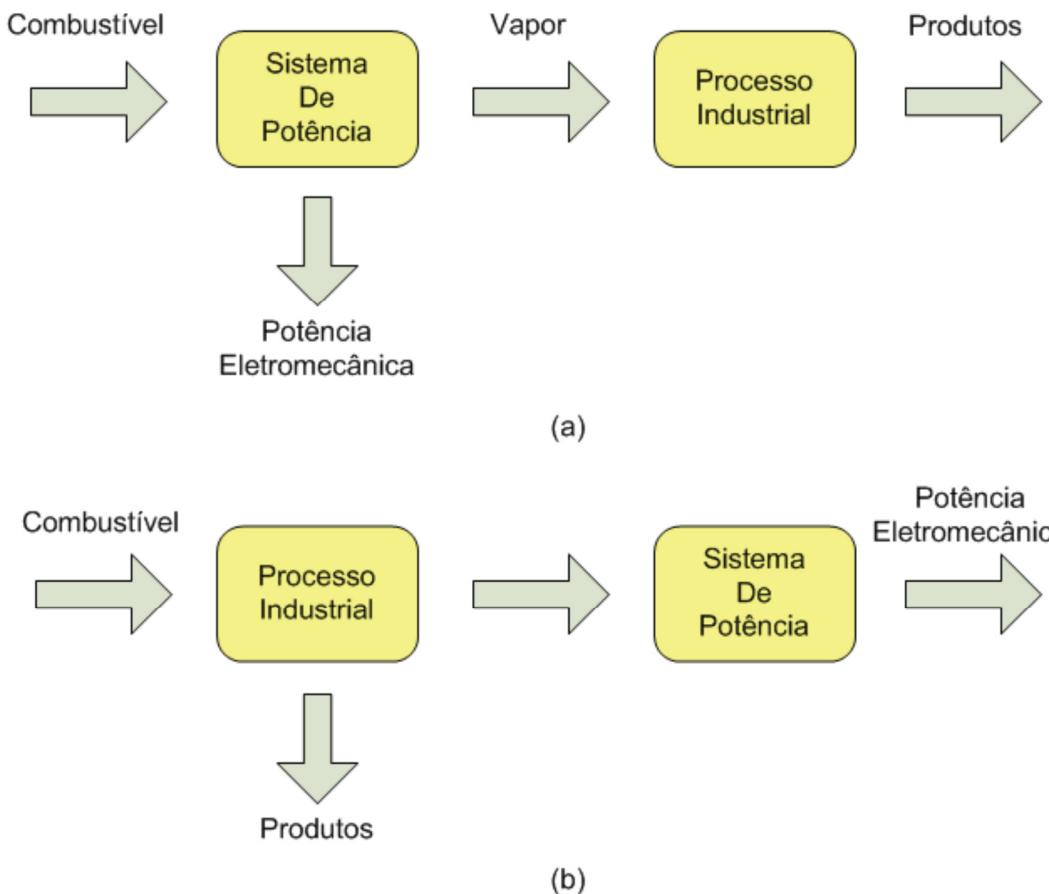


Figura 1 – Ciclos topping (a) e bottoming (b).

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Nos casos das plantas que têm por objetivo produzir excedente de energia elétrica para venda, o vapor é fornecido a um turbo gerador de maior eficiência que rebaixará a pressão do vapor a níveis desejados e produzirá energia elétrica. Após a passagem por esse turbo gerador, o vapor poderá ser direcionado para outras turbinas responsáveis pelo acionamento mecânico de outros equipamentos destinados aos processos de fabricação de açúcar e álcool.

As usinas do setor sucroalcooleiro podem ser consideradas empreendimentos de cogeração, pois a partir da queima de bagaço (fonte primária de energia), geram vapor, que será fornecido às turbinas, gerando potência mecânica (utilizada para acionamento de equipamentos como bombas, moendas, desfibradores, entre outros), e potência elétrica para consumo interno ou fornecimento para a rede elétrica. O vapor extraído das turbinas, chamado de “vapor de escape”, é usado como reservatório térmico no processamento do caldo de cana (FIOMARI, 2004).

2.2 Desenvolvimento da Cogeração no Setor Sucroalcooleiro

A cogeração teve grande aceitação e desenvolvimento no setor sucroalcooleiro devido o combustível empregado ser um rejeito do processo de produção de açúcar e álcool. A energia gerada e o vapor já eram utilizado no próprio processo produtivo e, com os incentivos do governo, houve um interesse crescente em produzir um excedente de energia para ser vendido à rede elétrica.

Inicialmente, quando as usinas utilizavam turbinas somente para o acionamento mecânico e geração de energia elétrica para consumo próprio, os parâmetros de trabalho do vapor eram em torno de 22 bar e 290 °C. Não havia preocupação com eficiência energética, pois a demanda térmica de processo era atendida mesmo com a utilização das turbinas ineficientes.

Após a reestruturação do setor elétrico brasileiro e os incentivos as fontes renováveis de energia, as usinas passaram a se preocupar com a eficiência das suas máquinas térmicas, já que poderiam comercializar o excedente de energia, além de atender suas demandas térmicas e eletromecânicas.

Em um primeiro momento, os níveis de pressão e temperatura do vapor tiveram de ser alterados para 44 bar e 420 °C, devido as necessidades técnicas das novas máquinas utilizadas para elevação da eficiência energética das usinas, sendo logo depois alterados para 66 bar e 480 °C.

Com os avanços tecnológicos, surgiram no mercado equipamentos ainda mais eficientes. No entanto, para que seja possível sua utilização, é necessário que as plantas operem gerando vapor por volta 80 bar e 530 °C. Um problema que deve ser ressaltado é que os níveis de temperatura do vapor e de pressão são limitados pelas restrições dos materiais utilizados em equipamentos e tubulações.

Nas usinas de açúcar e álcool, o vapor é usado em turbinas a vapor que geram potência mecânica. Essa potência pode ser usada diretamente no acionamento de equipamentos como moendas, bombas, desfibradores, picadores, entre outros, ou transformada em potência elétrica nos geradores elétricos, que por sua vez geram a energia para os acionamentos elétricos. Em ambos os casos, há liberação do vapor de baixa pressão, normalmente em torno de 2,45 bar, que é utilizado no processo, nas operações de aquecimento, evaporação, destilação e cozimento.

2.3 Caracterização dos Sistemas de Cogeração do Setor Sucroalcooleiro

As usinas típicas do setor sucroalcooleiro apresentam três configurações fundamentais. Um ciclo completo é mostrado na Figura 2. Nas demais figuras, são mostradas apenas as diferenças em relação à configuração original.

As três configurações fundamentais são:

- Turbinas de contrapressão (Figura 2),
- Combinação de turbinas de contrapressão com outras de condensação (Figura 3) e
- Turbinas de extração-condensação (Figura 4).

A condensação de uma parte do vapor de escape, ou de uma extração de vapor de uma turbina de extração-condensação, garante as necessidades de energia térmica do sistema (FIOMARI, 2004).

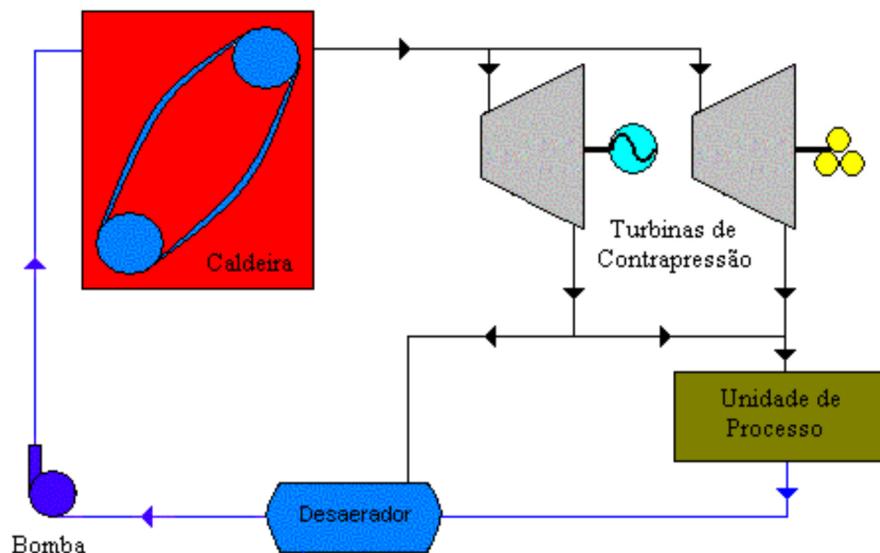


Figura 2 – Diagrama de um sistema de cogeração com turbinas a vapor de contrapressão.

FONTE: FIOMARI, 2004

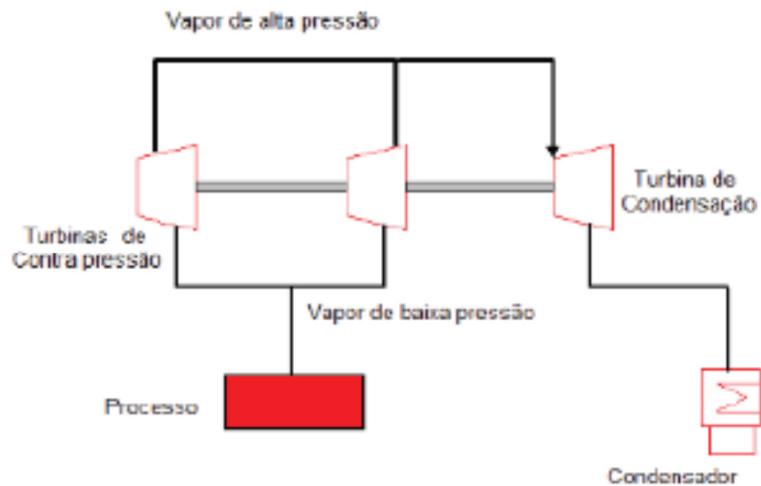


Figura 3 – Ciclo com utilização de turbinas de contrapressão e condensação.

FONTE: ROCHA, 2010

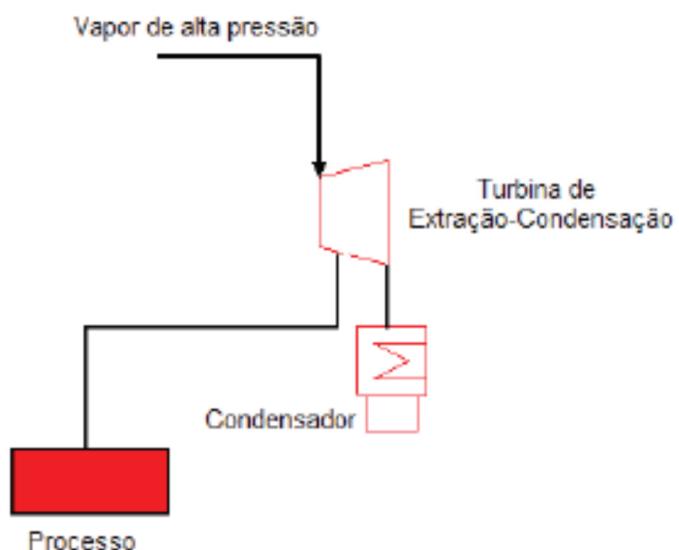


Figura 4 – Ciclo com utilização de turbinas de extração-condensação.

FONTE: ROCHA, 2010

Quando uma indústria precisa de vapor em distintos níveis de pressão, o que pode estar unido à necessidade de estabilizar o fornecimento da energia elétrica às concessionárias, a solução mais adequada, segundo Sánchez Prieto (2003), pode ser a combinação de turbinas a vapor de contração com turbinas de condensação, estrutura que permite uma maior flexibilidade às entregas de energia elétrica e energia

térmica para processo, ainda que o custo de duas turbinas seja maior do que o custo de uma, aliado ao fato da complexidade do ponto de vista operacional.

Se a usina deseja adequar sua instalação para a produção e venda de energia excedente, o uso de turbinas de extração-condensação é a opção mais viável, pois, segundo FIOMARI (2004), os sistemas de condensação com extração regulada permitem variar a relação energia térmica/elétrica em uma ampla faixa.

A Figura 5, mostrada abaixo, representa a configuração de uma planta moderna, com eletrificação total no acionamento de seus equipamentos e turbina de extração-condensação.

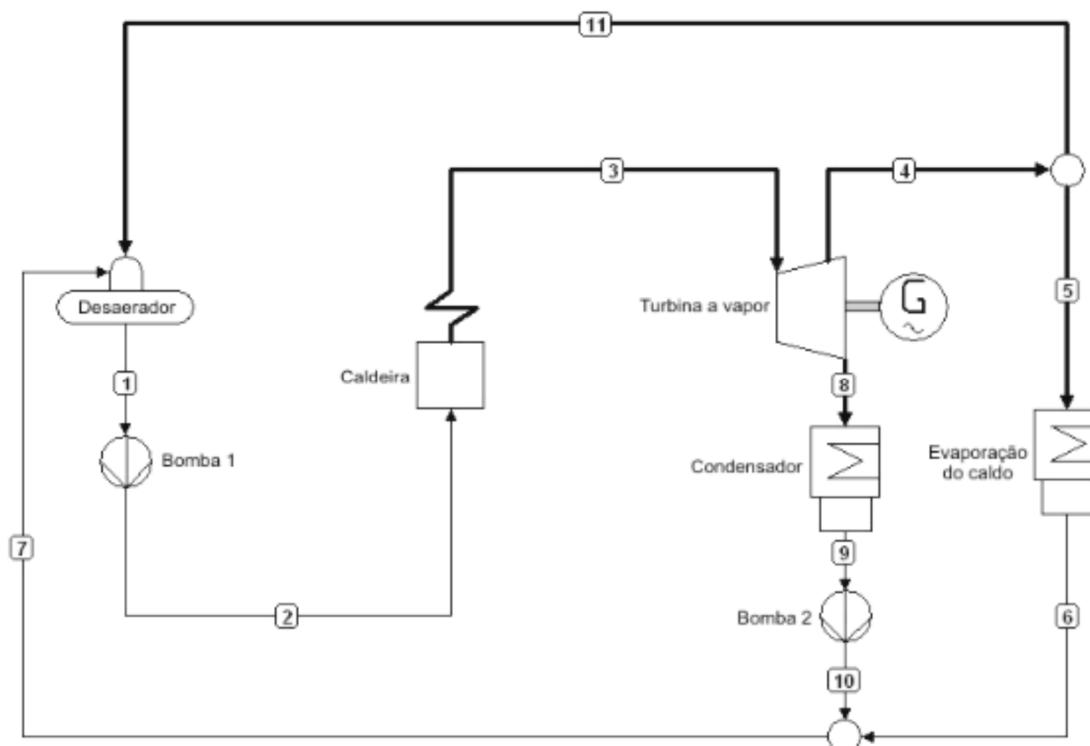


Figura 5 – Esquema de uma usina com turbina de extração-condensação e eletrificação total.

FONTE: FIOMARI et al., 2006

3 Ferramenta para Simulação - Planilha BIOMIX

Neste trabalho é apresentada uma ferramenta que tem por objetivo analisar o funcionamento de uma usina sucroalcooleira.

Além da variação dos parâmetros de operação da usina (pressão na caldeira, massa de vapor, eficiências dos equipamentos, etc), a ferramenta possibilita a simulação de uma usina utilizando diversas misturas de biomassa. Partindo da configuração tradicional (usina operando com bagaço de cana), o modelo permite avaliar o desempenho da usina utilizando misturas de bagaço com biomassas em diversas proporções, como por exemplo: casca de arroz, caroço de açaí, casca de amêndoas, casca de palmito cedro fibra de coco e outras.

A ferramenta foi desenvolvida na plataforma Microsoft Excel, utilizando as seguintes funções do programa:

- ✓ Biblioteca de Funções: permite inserir funções definidas pelo Excel ou criadas pelo próprio usuário;
- ✓ VBA – Virtual Basic for Applications: linguagem de programação integrada no Excel;
- ✓ Macros: sequências de comandos gravados no Excel, constituídas por instruções de VBA, utilizadas para automatizar tarefas repetitivas que envolvem a execução de vários comandos por parte do utilizador. (BRUNI & PAIXÃO, 2011):

Para a obtenção dos dados termodinâmicos, necessários a simulação da usina, foi utilizada a macro “XStem v2.6”, elaborada por Magnus Holmgren. Esta macro, já incorporada à planilha e baseando-se nas tabelas do “International Association for Properties of Water and Steam Industrial Formulation 1997” (IAPWS IF-97), permite a obtenção de todas as propriedades termodinâmicas da água, na faixa de pressão entre 0-1000 bar e na faixa de temperatura entre 0-2000 °C.

A seguir é apresentada a ferramenta e como esta deve ser utilizada pelo usuário, assim como seus cálculos envolvidos.

3.1 Planilha BIOMIX



Figura 6 – Tela de abertura da planilha BIOMIX.

FONTE: Autor

A planilha BIOMIX é composta por diversas abas, onde ao final do preenchimento de cada etapa, pode-se navegar entre elas através dos botões previamente configurados. A Figura 6 apresenta a aba de início com a apresentação da planilha.

Para que a planilha realize corretamente as simulações, recomenda-se seguir a ordem proposta a seguir:

- Primeira aba (Apresentação): tela de inicialização da planilha, contendo informações do trabalho;
- Segunda aba (Simulador): são configurados os parâmetros termodinâmicos necessários para simulação da usina;
- Terceira aba (Validação do Simulador): compara os valores reais da usina aos valores simulados pela planilha, com o objetivo de verificar a simulação realizada;
- Quarta aba (Safra): analisa a safra de cana-de-açúcar e calcula a quantidade de bagaço produzido na safra;
- Quinta aba (Combustível): nesta aba são introduzidos/calculados as propriedades do bagaço e da biomassa (caso exista mistura) utilizados

como combustível da caldeira, além de calcular o tempo de operação da usina.

- Sexta e última aba (Relatório Comparativo): gera um relatório comparando a usina simulada utilizando o combustível configurado e apenas bagaço de cana como combustível da caldeira.

Para melhor configuração da planilha, todos os valores de entrada podem ser selecionados por meio de barras de rolagem (botões com setas), e os dados de saídas são visualizados em tempo real.

É importante destacar que uma coluna à esquerda permite distinguir os dados de entrada, indicados pela cor verde, e os dados de saída, indicados pela cor amarela.

3.1.1 Aba “Simulador”

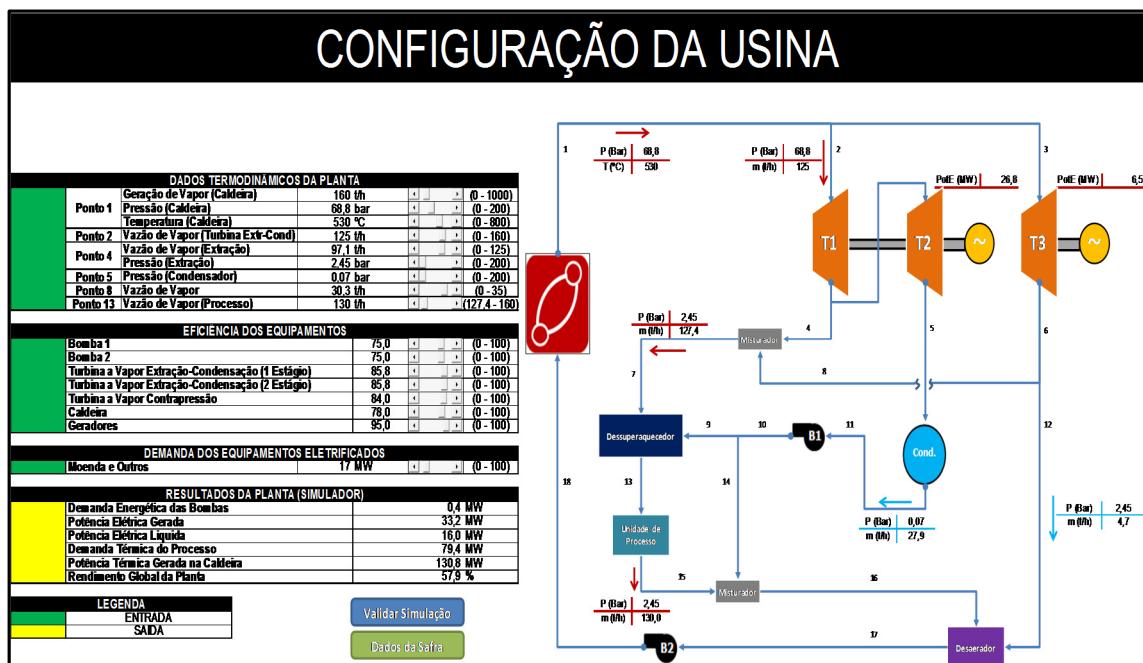


Figura 7 – Visualização completa da aba “Simulador”.

FONTE: Autor.

Inicialmente na planilha, é realizada a configuração da usina que se deseja simular através da aba “Simulador”, mostrada na Figura 7.

Foi utilizada como base para a elaboração desta aba a planta da usina do oeste paulista, que será detalhada no capítulo 4. Esta planta apresenta layout

complexo, porém, através do controle da vazão de vapor nos equipamentos, é possível simular plantas mais simples.

Tabela 1 – Dados termodinâmicos da planta estudada (entrada).

FONTE: Autor.

DADOS TERMODINÂMICOS DA PLANTA						
	Geração de Vapor (Caldeira)	140 t/h	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 1000)
Ponto 1	Pressão (Caldeira)	66 bar	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 200)
	Temperatura (Caldeira)	530 °C	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 800)
Ponto 2	Vazão de Vapor (Turbina Extr-Cond.)	140 t/h	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 140)
Ponto 4	Vazão de Vapor (Extração)	120 t/h	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 140)
	Pressão (Extração)	2,37 bar	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 200)
Ponto 5	Pressão (Condensador)	0,085 t/h	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 200)
Ponto 8	Vazão de Vapor	0 t/h	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 0)
Ponto 13	Vazão de Vapor (Processo)	120 t/h	<input type="button" value="◀"/>	<input checked="" type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(120 - 140)

A Tabela 1 apresenta os parâmetros operacionais necessários para a realização da configuração da usina, enquanto a Figura 8, mostrada abaixo, apresenta uma representação esquemática da planta modelo.

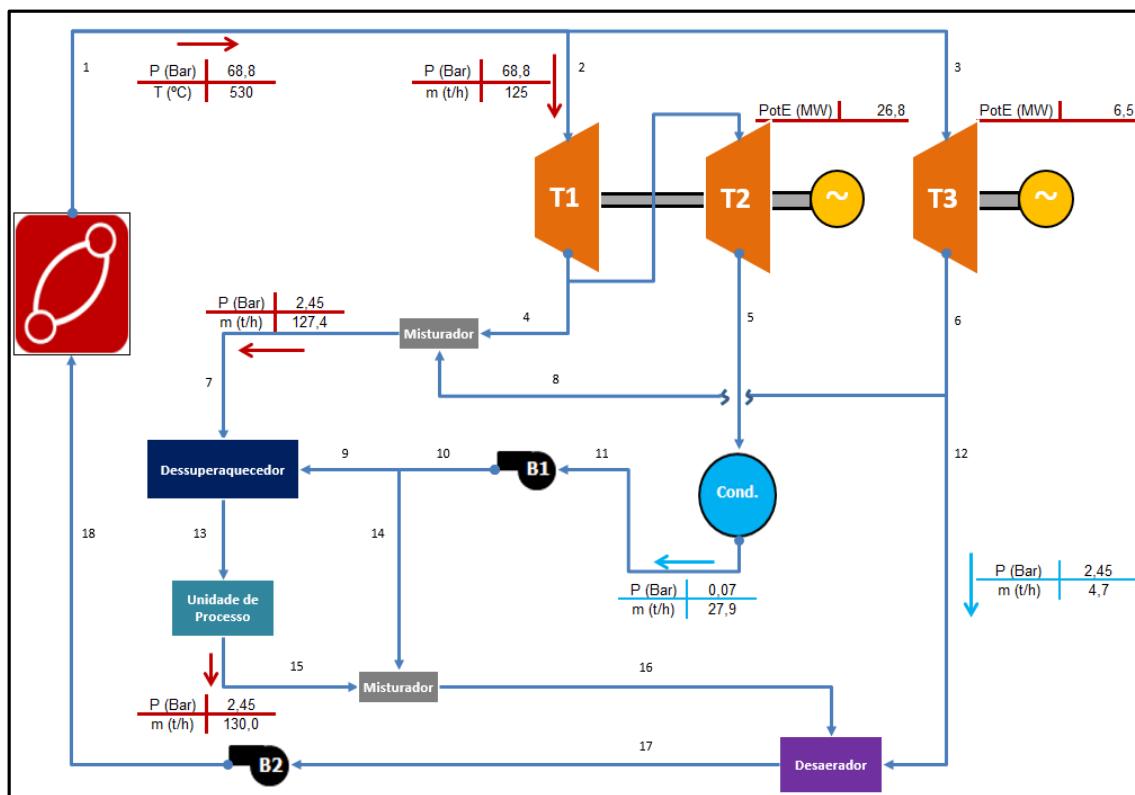


Figura 8 – Representação esquemática de uma usina sucroalcooleira.

FONTE: Autor.

Esta representação esquemática tem por objetivo auxiliar o usuário da planilha no momento da configuração dos parâmetros operacionais da usina, pois possibilita observar em tempo real a vazão de vapor nos principais equipamentos além de servir de referência aos pontos indicados à esquerda da tabela.

Tabela 2 – Eficiência dos equipamentos da usina (entrada).

FONTE: Autor.

EFICIÊNCIA DOS EQUIPAMENTOS					
Bomba 1	80,0	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Bomba 2	80,0	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Turbina a Vapor Extração-Condensação (1 Estágio)	87,0	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Turbina a Vapor Extração-Condensação (2 Estágio)	87,0	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Turbina a Vapor Contrapressão	0,0	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Caldeira	83,4	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Geradores	98,0	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)

Também é fornecida a possibilidade de configurar a eficiência de todos os equipamentos da usina, tais como: bombas, turbinas, caldeira e geradores, conforme mostrado na Tabela 2.

Caso não se possua a eficiência dos equipamentos, pode-se configurar tais parâmetros em 100%, acarretando em uma simulação que não conta com as irreversibilidades dos equipamentos.

Na Tabela 3 é configurada a demanda dos equipamentos de acionamento mecânico da usina que forma substituídos por motores elétricos.

Tabela 3 – Demanda dos equipamentos eletrificados (entrada).

FONTE: Autor

DEMANDA DOS EQUIPAMENTOS ELETRIFICADOS					
Moenda e Outros	17 MW	<input type="button" value="◀"/>	<input type="button" value="■"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)

Após configurados, os dados são direcionados automaticamente para a aba auxiliar responsável pela realização dos cálculos relativos a planta.

Na aba auxiliar, utilizando as funções da macro “Xsteam v2.6”, são calculados: as potências demandadas pelas bombas; as potências produzidas nas turbinas; e o fluxo de calor na caldeira, unidade de processo e condensador.

Para os cálculos relacionados as potências e fluxo de calor, são tomados volumes de controle nos equipamentos e em seguida aplica-se a primeira lei da termodinâmica.

A troca de calor na caldeira e em outros equipamentos tais como condensador e equipamentos de processo, pode ser calculada pela equação (3.1).

$$\dot{Q}_{equip} = \dot{m}_{vapor} \cdot \Delta h_{equip} \quad (3.1)$$

A potência gerada pela turbina e consumida pelas bombas é calculada pela equação (3.2).

$$\dot{W}_{equip} = \dot{m}_{vapor} \cdot \Delta h_{equip} \quad (3.2)$$

onde:

- \dot{W}_{equip} : potência produzida ou demandada pelo equipamento (kW);
- \dot{m}_{vapor} : vazão mássica de vapor no equipamento (kg/s);
- Δh_{equip} : diferença de entalpia específica no equipamento (kJ/kg).

É realizada ainda uma avaliação geral da planta, onde são consideradas todas as potências geradas e demandadas pela usina além da energia proveniente da queima do combustível. Esta análise é conhecida como rendimento global do sistema e é realizada segundo a equação (3.5), baseada na equação proposta por ROCHA (2010).

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_{ele} + \dot{W}_{mec} + \dot{Q}_{proc} - \dot{W}_{bomba} - \dot{Q}_{cond}}{\dot{m}_{bag} \cdot PCI_{bag}} \quad (3.3)$$

Sabendo que:

$$\dot{m}_{bag} \cdot PCI_{bag} = \dot{Q}_{cald} / \eta_{cald} \quad (3.4)$$

temos:

$$\eta_{global} = \frac{\dot{W}_{ele} + \dot{W}_{mec} + \dot{Q}_{proc} - \dot{W}_{bomba} - \dot{Q}_{cond}}{\dot{Q}_{cald} / \eta_{cald}} \quad (3.5)$$

onde:

- \dot{W}_{ele} :potênci a elétrica produzida (kW);
- \dot{W}_{mec} :potênci a mecânica produzida (kW);
- \dot{Q}_{proc} : fluxo de calor útil para processo (kW);
- \dot{W}_{bomba} : potênci a demanda pelas bombas (kW);
- \dot{Q}_{cond} : fluxo de calor no condensador (kW);
- \dot{m}_{bag} : vazão mássica de bagaço consumido na caldeira (kg/s);
- PCI_{bag} :poder calorífico inferior do bagaço (kJ/kg);
- \dot{Q}_{cald} : fluxo de calor na caldeira (kW);
- η_{cald} : eficiênci a da caldeira.

Ao termo de todos os cálculos na aba auxiliar, a planilha direciona os resultados novamente para a aba “Simulador” para que possam ser analisados em tempo real.

Tabela 4 – Resultados da simulação da planta.

FONTE: Autor.

RESULTADOS DA PLANTA (SIMULADOR)		
Demand a Energética das Bombas	0,4	MW
Potênci a Elétrica Gerada	33,1	MW
Potênci a Elétrica Liquida	15,8	MW
Demand a Térmica do Processo	78,8	MW
Potênci a Térmica Gerada na Caldeira	130,0	MW
Rendimento Global da Planta	57,8	%

A Tabela 4 mostra os dados calculados pela aba auxiliar apresentados na parte inferior da aba “Simulador”.

Ao encerrar a etapa de configuração da usina, é recomendada a utilização do botão “Validar Simulação” para ser direcionado a aba “Validação da Simulação”, onde será realizada uma análise da confiabilidade dos dados simulados.

3.1.2 Aba “Validação da Simulação”

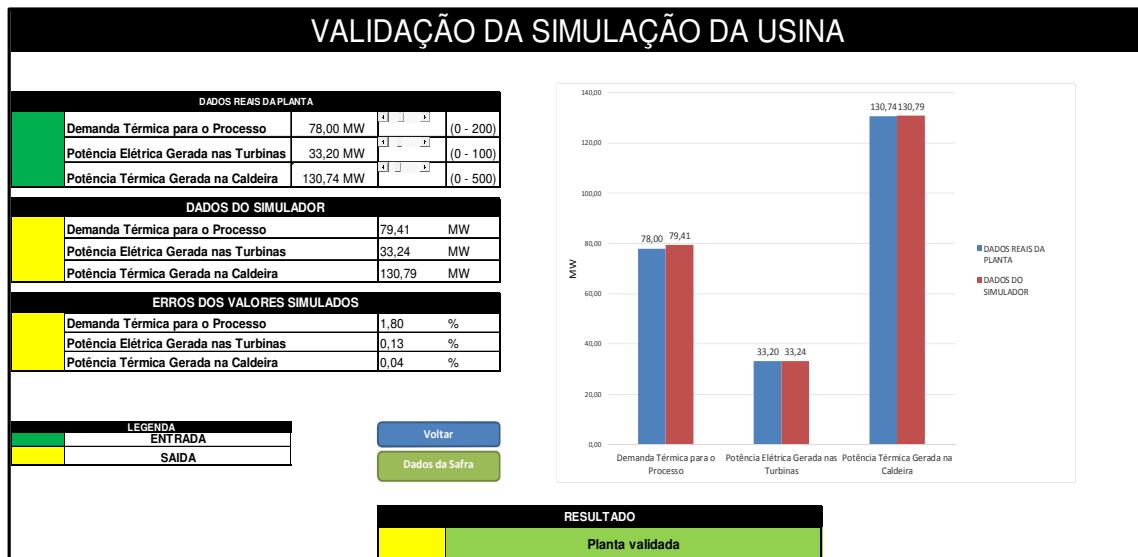


Figura 9 – Visualização completa da aba “Validação da Simulação”.

FONTE: Autor.

A segunda etapa de configuração da planilha, mostrada na Figura 9, é dada como opcional, sendo fornecida a possibilidade de seguir da aba “Simulador” diretamente para a aba seguinte através do botão “Dados da Safra”.

Tabela 5 – Dados reais da planta original (entrada).

FONTE: Autor.

DADOS REAIS DA PLANTA					
	Demandá Térmica para o Processo	73,00 MW	<input type="button"/> <input type="button"/>	<input type="button"/>	(0 - 200)
	Potência Elétrica Gerada nas Turbinas	30,00 MW	<input type="button"/> <input type="button"/>	<input type="button"/>	(0 - 100)
	Potência Térmica Gerada na Caldeira	115,00 MW	<input type="button"/> <input type="button"/>	<input type="button"/>	(0 - 500)

A Tabela 5 permite introduzir os dados reais da usina simulada para serem confrontados com os dados obtidos na simulação realizada pela planilha, com o objetivo da validação do simulador.

Tabela 6 – Dados da planta simulados pela planilha.

FONTE: Autor.

DADOS DO SIMULADOR		
	Demandá Térmica para o Processo	72,58 MW
	Potência Elétrica Gerada nas Turbinas	29,89 MW
	Potência Térmica Gerada na Caldeira	114,78 MW

A Tabela 6 é mostrada na planilha logo abaixo de onde o usuário deve fornecer os dados reais da usina e contém os valores obtidos na simulação para os parâmetros introduzidos.

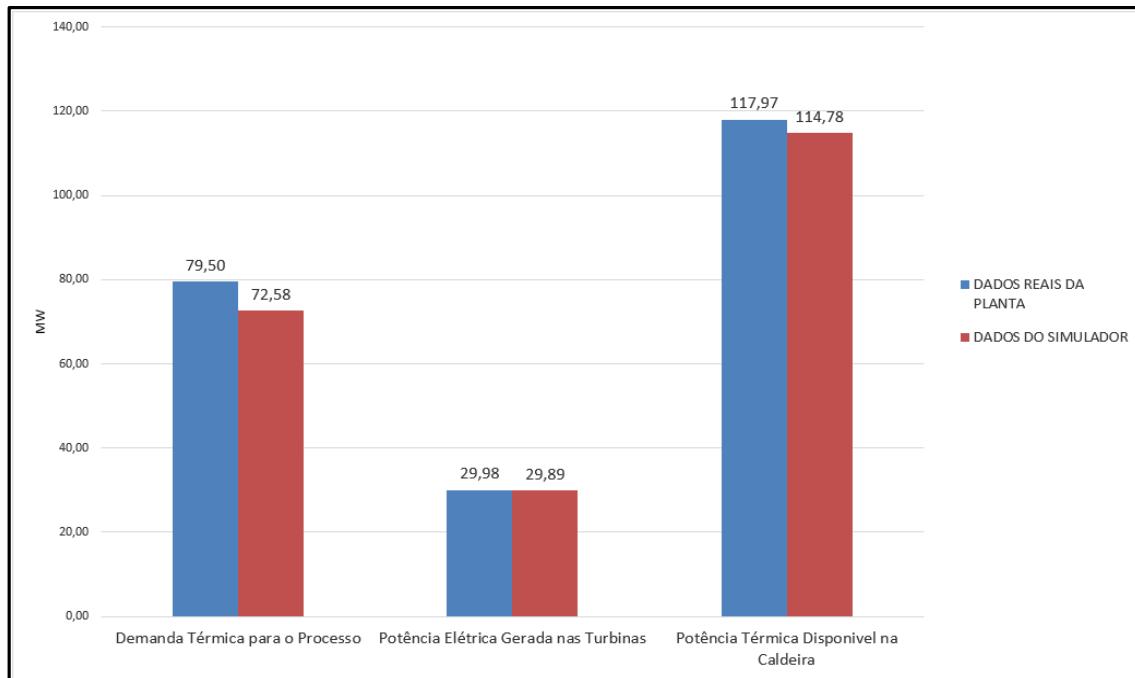


Figura 10 – Gráfico comparativo dos dados reais e simulados.

FONTE: Autor.

Em posse de todos os dados, a planilha plota um gráfico de barras, conforme apresentado na Figura 10, possibilitando uma comparação visual rápida, além de calcular os erros apresentados por cada um dos parâmetros, conforme mostrado na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Erros relativos a simulação.

FONTE: Autor.

ERROS DOS VALORES SIMULADOS		
Demande Térmica para o Processo		0,57 %
Potência Elétrica Gerada nas Turbinas		0,37 %
Potência Térmica Disponível na Caldeira		0,20 %

A Tabela 8 é mostrada na parte inferior da aba “Validação da Simulação” e representa a análise realizada pela planilha sobre a simulação.

Tabela 8 – Resposta da planilha para simulação validada.

FONTE: Autor.

RESULTADO	
Planta validada	

Esta análise tem como base os erros de cada um dos parâmetros calculados pelo simulador. Foi definido que caso esses valores apresentem um valor superior a 10%, a planta simulada é dada como invalida, tornando a Tabela 8 vermelha.

Conforme o resultado apresentado, é possível avançar diretamente para a próxima aba, através do botão “Dados da Safra” ou retornar a configuração da usina, onde pode-se verificar e corrigir os dados iniciais.

3.1.3 Aba “Safra”

Na terceira etapa de configuração, mostrada na Figura 11, é avaliado a safra de cana-de-açúcar, analisando seu potencial para a produção de bagaço.

DADOS DA SAFRA DE CANA-DE-AÇUCAR

DADOS DA SAFRA DE CANA-DE-ACUCAR	
Dias de Moagem	208,23 dias
Safra Anual	1.720.070 Tons
PROPRIEDADES DA CANA-DE-AÇUCAR COLHIDA	
Fibra do Colmo	54,5 %
Fibra do Bagaço	46,0 %

RESULTADOS DA SAFA	
Meses de Moagem	6,91 meses
Horas Fárticas de Moagem	4.960,8 horas
Moagem Horaria Efetiva	240,0 t/h
Porcentagem de Bagaço Produzido	28,29 %
Produção de Bagaço na Safra	399.116,00 tno
Produção Horaria de Bagaço	67,3 t/h

LEGENDA	
ENTRADA	
SÁIDA	

[Voltar para Usina](#) [Dados da Biomassa](#)

Figura 11 – Visualização completa da aba “Validação da Simulação”.

FONTE: Autor.

Para a realização da análise, os parâmetros de entrada são: os dias de moagem; a safra anual; e as porcentagens de fibra do colmo e do bagaço encontrados

na cana-de-açúcar. A Tabela 9 mostra a interface utilizada para se inserir esses dados.

Tabela 9 – Dados da safra de cana-de-açúcar (entrada).

FONTE: Autor.

DADOS DA SAFRA DE CANA-DE-AÇUCAR				
Dias de Moagem	208,33 dias	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	(0 - 365)
Safra Anual	1.200.000 t/ano	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	(0 - 5 MM)
PROPRIEDADES DA CANA-DE-AÇUCAR COLHIDA				
Fibra do Colmo	13,0 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
Fibra do Bagaço	46,0 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)

Com o preenchimento da tabela, a planilha calcula, trivialmente, a quantidade de meses de moagem, as horas efetivas de moagem e a moagem horária efetiva, ou seja, a quantidade de cana moída por hora.

Com os dados fornecidos, também é calculado o percentual em massa de bagaço produzido a partir da cana, após essa passar pelo processo de moagem.

Este percentual é calculado conforme equação (3.6), proposta por ROMÃO (2009), e se mostra uma função dos percentuais de fibra no colmo e no bagaço.

$$\%_{bag} = \frac{\%_{FC}}{\%_{FB}} \quad (3.6)$$

onde:

- $\%_{bag}$: percentual de bagaço gerado a partir da cana-de-açúcar (%);
- $\%_{FC}$: percentual em massa de fibra no colmo (%);
- $\%_{FB}$: percentual em massa de fibra no bagaço (%).

Em posse deste dado é calculada, trivialmente, a produção de bagaço durante a safra e a sua produção horária, o que é importante para saber a disponibilidade de bagaço para operação da usina.

A Tabela 10 é mostrada na parte inferior da aba e contém todos os dados calculados pela planilha mencionados anteriormente.

Tabela 10 – Resultados da safra de cana-de-açúcar.

FONTE: Autor

RESULTADOS DA SAFRA	
Meses de Moagem	6,9 meses
Horas Efetivas de Moagem	4.999,9 horas
Moagem Horaria Efetiva	240,0 t/h
Porcentagem de Bagaço Produzido	28,26 %
Produção de Bagaço na Safra	339.130 t/ano
Produção Horaria de Bagaço	67,8 t/h

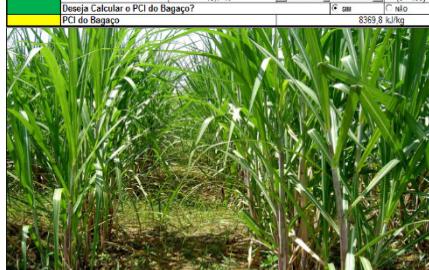
Ao término da avaliação da safra, deve-se seguir para a próxima etapa do simulador, através do botão “Dados da biomassa”.

3.1.4 Aba “Combustível”

COMBUSTIVEL DA CALDEIRA

PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Teor de Açúcar	22,5
Umidade	45,7 %
Deseja Calcular o PCI do Bagaço?	<input checked="" type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não
PCI do Bagaço	8369,8 kJ/kg



BIOMASSA PARA MISTURA

Selecionar a Biomassa para mistura	Fávia de Círculo
Unidade da Quantidade de Biomassa	<input checked="" type="radio"/> PORCENTAGEM <input type="radio"/> TONELADAS
Porcentagem de biomassa misturada	20,0 %
Toneladas de biomassa misturada	84,783

PROPRIEDADE DA BIOMASSA

Umidade	40,0 %
Icer de Hidrogênio	3,0 %
Deseja Calcular o PCI da Biomassa?	<input checked="" type="checkbox"/> sim <input type="checkbox"/> não
PCI da Biomassa	9837,6 kJ/kg





LEGENDA

ENTRADA	
SADA	

RESULTADOS

PCI da Mistura	8663,34 kJ/kg
Consumo Total de Combustível na Caldeira	57,2 t/h
Consumo de Bagaço do Cana	45,7 t/h
Consumo de Biomassa Misturada	11,44 t/h
Relação Biomassa-Vapor	0,41 tbagasse/tvapor

INDICE DE DESEMPENHO DA USINA

Fator de Utilização de Energia - FUE	0,74
Índice de Poupança de Energia - IPE	0,81
Energia e Economia Relativa à Geração - EEC	0,19
Índice de Geração de Potência - IGP	0,59
Histerese Potência e Calor - RPE	0,11

DIAS DE FUNCIONAMENTO DA USINA

308,9 Dias

[Voltar](#)
[Financeiro](#)

Figura 12 – Visualização completa da aba “Combustível”.

FONTE: Autor

A quinta etapa de configuração da planilha, mostrado na Figura 12, é dada como a parte principal da ferramenta.

Conforme falado no início do trabalho, a maior contribuição deste projeto é proporcionar a possibilidade de simular uma usina sucroalcooleira com uma mistura de biomassas.

Para tornar esta simulação possível é necessário o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) da mistura e consequentemente do PCI das biomassas utilizadas em sua formação.

A equação (3.7), proposta por HUGOT (1969), é utilizada para o cálculo do PCI do bagaço, e leva em conta a influência da umidade e do teor de açúcar presentes na biomassas neste cálculo.

$$PCI_{bag} = 4.19 \cdot (4250 - 12 \cdot s - 48.5 \cdot w) \quad (3.7)$$

onde:

- PCI_{bag} : poder calorífico inferior do bagaço (kJ/kg);
- s : teor de açúcar (%);
- w : umidade (%).

Tabela 11 – Propriedades do bagaço (entrada).

FONTE: Autor

PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR					
	Teor de Açúcar	2,2 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
	Umidade	45,7 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="▶"/>	(0 - 100)
	Deseja Calcular o PCI do Bagaço?	<input type="radio"/> SIM		<input checked="" type="radio"/> NÃO	
	PCI do Bagaço				kJ/kg

A Tabela 11 mostra a interface onde o usuário fornece os valores de umidade e teor de açúcar necessários para o cálculo.

Nela também é fornecida a possibilidade de inserir manualmente o valor do PCI, bastando para isso à seleção do botão “NÃO” no momento que questionado se deseja calculá-lo, como mostrado na Figura 13 abaixo.

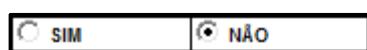


Figura 13 – Botões de resposta.

FONTE: Autor

Tabela 12 – Planilha solicitando valor do PCI do Bagaço (entrada).

FONTE: Autor

PCI do Bagaço	kJ/kg
---------------	-------

Tabela 13 – Planilha fornecendo valor do PCI do Bagaço.

FONTE: Autor

PCI do Bagaço	8369,8 kJ/kg
---------------	--------------

A Tabela 12 exibe a resposta da interface caso seja escolhida a opção de fornecer manualmente o valor do PCI do bagaço e a Tabela 13 caso seja selecionado o botão “SIM”.

Já para o cálculo do PCI das outras biomassas, é utilizada a equação (3.8), proposta por LOO (2008), que leva em conta a influência da umidade e do teor de hidrogênio.

$$PCI_{bio} = PCS_{bio} \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2444 \cdot \frac{w}{100} - 2444 \cdot \frac{h}{100} \cdot 8,936 \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) \quad (3.8)$$

onde:

- PCI_{bio} : poder calorífico inferior da biomassa (kJ/kg);
- PCS_{bio} : poder calorífico superior da biomassa (kJ/kg);
- w : umidade (%);
- h : teor de hidrogênio (%).

A Tabela 14 mostra onde os valores de umidade e teor de hidrogênio são inseridos.

Tabela 14 – Propriedades da Biomassa (entrada).

FONTE: Autor

PROPRIEDADE DA BIOMASSA				
	Umidade	40,0 %	<input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/> <input type="button" value="→"/>	(0 - 100)
	Teor de Hidrogênio	3,0 %	<input type="button" value="↑"/> <input type="button" value="↓"/> <input type="button" value="→"/>	(0 - 10)
	Deseja Calcular o PCI da Biomassa?			
	PCI da Biomassa	9.837,6	kJ/kg	

Como pode ser observado, esta tabela é semelhante a interface do bagaço, inclusive em seu funcionamento.

É relevante ressaltar que a umidade presente nas biomassas não deve ultrapassar 65%, uma vez que o elevado valor deste torna inviável o processo de combustão nas caldeiras.

Na Tabela 15 são inseridas as informações sobre a biomassa que irá ser utilizada na mistura para a formação do combustível da caldeira.

Tabela 15 – Seleção da biomassa para mistura (entrada).

FONTE: Autor

BIOMASSA PARA MISTURA			
Selecionar a Biomassa para mistura	<input type="text" value="Fibra de Côco"/>	<input type="button" value="▼"/>	
Unidade da Quantidade de Biomassa	<input checked="" type="radio"/> PORCENTAGEM	<input type="radio"/> TONELADAS	
Porcentagem de biomassa misturada	20,0 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	(0 - 99)
Toneladas de biomassa misturada	84.783 t/ano	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/>	<input type="button" value="▶"/>

A caixa de combinação, mostrada na Figura 14, fornece 24 opções de biomassas pré-definidas, além da opção “nenhuma”, caso não se queira realizar a mistura e “outra”, para o caso de a biomassa desejada não estar entre as opções.

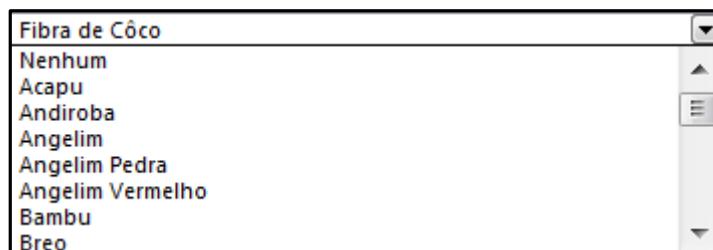


Figura 14 – Caixa de combinação de biomassa.

FONTE: Autor

Depois de selecionar a biomassa, deve se definir a proporção em que esta será misturada ao bagaço, e para isso a planilha oferece duas opções de unidade, conforme mostrado na Figura 15 abaixo.



Figura 15 – Unidade em que será informada a quantidade da biomassa.

FONTE: Autor

Caso seja selecionada a opção “Porcentagem”, a planilha calcula, baseando-se na quantidade de bagaço disponível, a quantidade anual de biomassa que será utilizada, conforme mostrada na Tabela 16 abaixo.

Tabela 16 – Inserindo porcentagem de biomassa misturada.

FONTE: Autor

Porcentagem de biomassa misturada	20,0 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="✖"/>	(0 - 99)
Toneladas de biomassa misturada	84.783 t/ano	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="✖"/>	

Caso seja selecionada a opção “toneladas”, a planilha calcula a porcentagem de biomassa que deverá ser misturada para a produção de uma mistura sempre com a mesma proporção de bagaço e da biomassa, como mostra na Tabela 17 abaixo.

Tabela 17 – Inserindo toneladas de biomassa para mistura.

FONTE: Autor

Porcentagem de biomassa misturada	19,1 %	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="✖"/>	(0 - 99)
Toneladas de biomassa misturada	80.000 t/ano	<input type="button" value="◀"/> <input type="button" value="▶"/> <input type="button" value="✖"/>	

Em posse de todos esses dados, PCIs e proporções das biomassas utilizadas na produção da mistura, é calculado, através da equação (3.9), o PCI da mistura utilizada como combustível.

$$PCI_{mistura} = \left(1 - \frac{\%_{bio}}{100}\right) \cdot PCI_{bag} + \frac{\%_{bio}}{100} \cdot PCI_{bio} \quad (3.9)$$

onde:

- $PCI_{mistura}$: poder calorífico inferior da mistura (kJ/kg);
- PCI_{bag} : poder calorífico inferior do bagaço (kJ/kg);
- PCI_{bio} : poder calorífico inferior da biomassa (kJ/kg);
- $\%_{bio}$: porcentagem de biomassa misturada ao bagaço (%).

Com isso, é realizado um balanço de energia na caldeira da usina e, com o auxílio dos dados do ciclo previamente configurados, é calculada o consumo horário da mistura na caldeira com a equação (3.10).

$$\dot{m}_{mistura} = \frac{\dot{m}_{vapor} \cdot \Delta h_{cald}}{PCI_{mistura} \cdot \eta_{cald}} \quad (3.10)$$

onde:

- $\dot{m}_{mistura}$: vazão mássica da biomassa consumida na caldeira (kg/s);
- \dot{m}_{vapor} : vazão mássica de vapor na caldeira (kg/s);
- $PCI_{mistura}$: poder calorífico inferior da biomassa (KJ/kg);
- Δh_{cald} : diferença de entalpia específica entre a água de alimentação da caldeira e o vapor gerado (kJ/kg);
- η_{cald} : eficiência térmica da caldeira da planta.

A planilha calcula ainda o consumo individual de cada uma das biomassas da mistura e, com base no total de combustível disponível, o tempo de operação esperado para usina.

Para fins de avaliação do desempenho da planta e de seus equipamentos, neste ponto também são calculados alguns índices de desempenho que em muitos casos implicam na comparação de produtos de diferentes qualidades termodinâmicas, tais como energia térmica e potência produzida (SÁNCHEZ PRIETO, 2003).

A relação combustível-vapor ou consumo específico de combustível, indica a quantidade de combustível que é necessário para se produzir 1 (um) kg de vapor na pressão e temperatura desejada. Esta é baseada na equação proposta por ROCHA (2010).

$$R_{comb-vapor} = \frac{\dot{m}_{mistura}}{\dot{m}_{vapor}} \quad (3.11)$$

onde:

- $R_{comb-vapor}$: relação mistura-vapor (ton. mistura/ton. vapor);
- $\dot{m}_{mistura}$: vazão mássica da biomassa consumida na caldeira (kg/s);
- \dot{m}_{vapor} : vazão mássica vapor produzido na caldeira (kg/s).

O FUE (fator de utilização de energia) ou eficiência de primeira lei, mostrado na equação (3.12), é comumente utilizado para avaliar a eficiência dos sistemas de cogeração (FIOMARI, 2004).

$$FUE = \frac{\dot{W}_{total} + \dot{Q}_{util}}{\dot{m}_{mistura} \cdot PCI_{mistura}} \quad (3.12)$$

onde:

- \dot{W}_{total} : potência total (kW);
- $\dot{m}_{mistura}$: vazão mássica da biomassa consumida na caldeira (kg/s);
- \dot{Q}_{util} : fluxo de calor útil da planta (kW);
- $PCI_{mistura}$: poder calorífico inferior da mistura (kJ/kg).

Segundo FIOMARI (2004), este parâmetro é a relação entre a energia térmica e eletromecânica aproveitada no ciclo com a energia do combustível gasto para a geração do vapor.

O IPE (índice de poupança de energia) refere-se à economia de energia de combustível obtida por sistemas de cogeração em comparação com plantas convencionais que produzem separadamente energia elétrica e térmica e é definido pela equação (3.13) (FIOMARI, 2004):

$$IPE = \frac{\dot{m}_{mistura} \cdot PCI_{mistura}}{\dot{W}_{total} / \eta_{term_ref} + \dot{Q}_{util} / \eta_{cald_ref}} \quad (3.13)$$

onde:

- \dot{W}_{total} : potência total (kW);
- $\dot{m}_{mistura}$: vazão mássica da biomassa consumida na caldeira (kg/s);
- \dot{Q}_{util} : fluxo de calor útil da planta (kW);
- $PCI_{mistura}$: poder calorífico inferior da mistura (kJ/kg);
- η_{cald_ref} : eficiência térmica de caldeiras de referência (adotada 77%);
- η_{term_ref} : eficiência térmica das turbinas de uma planta de referência (adotada 40%).

Quanto menor este índice, melhor será o desempenho do sistema comparado as referências de eficiências adotadas.

O EEC (energia economizada devido à cogeração), segundo FIOMARI (2004) é dada pela equação (3.14).

$$EEC = 1 - IPE \quad (3.14)$$

O IGP (índice de geração de potência), mostrado na equação (3.15), é o parâmetro definido para calcular separadamente a eficiência da geração de potência, descontando no insumo de energia aquela utilizada para fins puramente de aquecimento (FIOMARI, 2004):

$$IGP = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{m}_{mistura} \cdot PCI_{mistura} - \dot{Q}_{util} / \eta_{cald}} \quad (3.15)$$

onde:

- \dot{W}_{total} : potência total (kW);
- $\dot{m}_{mistura}$: vazão mássica da biomassa consumida na caldeira (kg/s);
- \dot{Q}_{util} : fluxo de calor útil da planta (kW);
- $PCI_{mistura}$: poder calorífico inferior da mistura (kJ/kg);
- η_{cald} : eficiência pela primeira lei das caldeiras da unidade.

O RPC (razão potência-calor), dada pela equação (3.16), é a relação entre a potência total produzida e a energia térmica utilizada no processo (FIOMARI, 2004).

$$RPC = \frac{\dot{W}_{total}}{\dot{Q}_{util}} \quad (3.16)$$

onde:

- \dot{W}_{total} : potência total (kW);
- \dot{Q}_{util} : fluxo de calor útil da planta (kW).

Esse parâmetro é importante num sistema de cogeração, pois com ele é possível identificar vantagens e/ou desvantagens de um sistema de cogeração em relação a outro (FIOMARI,2004).

A Tabela 18 é mostrada na parte inferior da aba e contém todos os dados calculados.

Tabela 18 – Resultados da Planilha.

FONTE: Autor

RESULTADOS	
PCI da Mistura	6.730,01 kJ/kg
Consumo Total de Combustível na Caldeira	73,6 t/h
Consumo de Bagaço	58,9 t/h
Consumo da Biomassa Misturada	14,72 t/h
Relação Combustível-Vapor	0,53 tcomb/tvapor
INDICE DE DESEMPENHO DA USINA	
Fator de Utilização de Energia - FUE	0,74
Índice de Poupança de Energia – IPE	0,81
Energia a Economizar devido à Cogeração – EEC	0,19
Índice de Geração de Potência – IGP	0,59
Relação Potência-Calor – RPC	0,41
DIAS DE FUNCIONAMENTO DA USINA	
	239,9 Dias

3.1.5 Aba “Relatório Comparativo”

Relatório Comparativo		
Planta com Bagaço de Cana		
Planta com Mistura de Biomassa		
Custo de Capital	R\$ 12.506.023,06	ao Ano
Custo O&M	R\$ -	ao Ano
Custo combustível (Bagaço)	R\$ 15,00	R\$/t
Preço de Venda de Energia Elétrica	150,00	R\$/MWh
Poder Calorífico Inferior	8.029	kJ/kg
Consumo Total de Combustível	469.565	t/ano
Potência Elétrica Líquida	16	MW
Energia Elétrica Gerada	207.623,59	MWh/ano
Energia Elétrica Consumida	107.697,29	MWh/ano
Energia Elétrica a ser Commercializada	99.926,30	MWh/ano
Tempo de Funcionamento da Usina	260,23	Dias
Horas de Operação da Usina	6.245,54	h/ano
Relação Combustível-Vapor	0,47	tcomb/tvapor
Custo da Eletricidade	94,16	R\$/MWh
Receita Total com a Venda de Excedentes	14.988.945,15	R\$/Ano
Custo de Capital	R\$ 12.506.023,06	ao Ano
Custo O&M	R\$ -	ao Ano
Custo combustível (Biomassa)	R\$ 60,00	R\$/t
Preço de Venda de Energia Elétrica	150,00	R\$/MWh
Poder Calorífico Inferior	8.991	kJ/kg
Consumo Total de Combustível	586.957	t/ano
Potência Elétrica Líquida	16	MW
Energia Elétrica Gerada	290.613,66	MWh/ano
Energia Elétrica Consumida	150.745,41	MWh/ano
Energia Elétrica a ser Commercializada	139.868,25	MWh/ano
Tempo de Funcionamento da Usina	364,25	Dias
Horas de Operação da Usina	8.741,97	h/ano
Relação Combustível-Vapor	0,42	tcomb/tvapor
Custo da Eletricidade	91,51	R\$/MWh
Receita Total com a Venda de Excedentes	20.980.237,40	R\$/Ano

Figura 16 – Aba do relatório comparativo do funcionamento da usina.

FONTE: Autor

Nesta última etapa do trabalho, mostrada na Figura 16, é realizado um relatório comparando a usina simulada utilizando o combustível configurado e apenas bagaço de cana como combustível da caldeira.

Inicialmente são configurados os custos referentes a operação da usina. Estes custos devem ser inseridos para ambos os casos comparados (bagaço e combustível configurado), conforme apresentados na Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 19 –Custos para operação da usina alimentada com bagaço (entrada).

FONTE: Autor

Custo de Capital	R\$	6.619.200,00	ao Ano
Custo O&M	R\$	4.801.875,00	ao Ano
Custo combustível (Bagaço)	R\$	-	R\$/t

Tabela 20 – Custos para operação da usina alimentada com o combustível (entrada).

FONTE: Autor

Custo de Capital	R\$	6.619.200,00	ao Ano
Custo O&M	R\$	6.212.870,07	ao Ano
Custo combustível (Bagaço)	R\$	-	R\$/t
Custo combustível (Biomassa)	R\$	20,00	R\$/t

Os custos são referentes aos investimentos da usina (custo capital), despesas com operação e manutenção dos equipamentos (custo O\$M), além dos custos com os combustíveis utilizados (custo combustível) e na maioria dos casos são configurados com os mesmos valores para ambas as situações.

Na Tabela 21 e Tabela 22, são configurados respectivamente, os valores de venda da energia elétrica excedente para o funcionamento da usina com bagaço e com o combustível configurado. O preço de venda da energia elétrica pode variar de acordo com uma série de fatores: incentivos governamentais, empresa encarregada da comercialização de energia, local, etc.

Tabela 21 – Preço de venda da eletricidade para operação com bagaço (entrada).

FONTE: Autor

	Preço de Venda de Energia Elétrica	120,00 R\$/MWh
--	---	-----------------------

Tabela 22 – Preço de venda da eletricidade para operação com combustível (entrada).

FONTE: Autor

	Preço de Venda de Energia Elétrica	120,00 R\$/MWh
--	---	-----------------------

Iniciando a comparação entre os casos, são apresentados à direita da aba, os dados anteriormente calculados pela planilha para o combustível configurado, conforme mostrados na Tabela 23, na Tabela 24 e Tabela 25.

Tabela 23 – Poder calorífico inferior do combustível.

FONTE: Autor

	Poder Calorífico Inferior	8.991 kJ/kg
--	----------------------------------	--------------------

Tabela 24 – Consumo total do combustível.

FONTE: Autor

	Consumo Total de Combustível	586.957 t/ano
--	-------------------------------------	----------------------

Tabela 25 – Potência elétrica líquida para operação com o combustível.

FONTE: Autor

	Potência Elétrica Líquida	16 MW
--	----------------------------------	--------------

Assim como foram obtidos para a operação com o combustível, esses parâmetros são calculados para a usina operando com bagaço, conforme Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28 mostradas à esquerda da aba.

Tabela 26 – Poder calorífico inferior do bagaço.

FONTE: Autor

Poder Calorífico Inferior	8.029 kJ/kg
----------------------------------	-----------------------

Tabela 27 – Consumo total de bagaço.

FONTE: Autor

Consumo Total de Combustível	469.565 t/ano
-------------------------------------	-------------------------

Tabela 28 – Potência elétrica líquida para operação com bagaço.

FONTE: Autor

Potência Elétrica Líquida	16 MW
----------------------------------	-----------------

Em seguida, são calculados para ambos os casos, a energia produzida, demandada e comercializada durante o ano.

Para tal, é utilizada a equação (3.17) e os valores obtidos são apresentados na Tabela 29 para a usina operando com bagaço e na Tabela 30 para esta usina operando com o combustível configurado.

$$E = Pot \cdot h \quad (3.17)$$

onde:

- E : energia elétrica produzida (MWh/ano);
- Pot : potência elétrica produzida pela planta (MW);
- h : horas de operação (horas/ano).

Tabela 29 – Balanço de energia elétrica na usina alimentada com bagaço.

FONTE: Autor

Energia Elétrica Gerada	171.248,78 MWh
Energia Elétrica Consumida	70.832,53 MWh
Energia Elétrica a ser Comercializada	100.416,25 MWh

Tabela 30 – Balanço de energia elétrica na usina alimentada com o combustível

FONTE: Autor

Energia Elétrica Gerada	221.568,95 MWh/ano
Energia Elétrica Consumida	91.646,13 MWh/ano
Energia Elétrica a ser Comercializada	129.922,81 MWh/ano

A Tabela 31, Tabela 32 e Tabela 33 apresentam os valores de tempo de funcionamento, horas de operação e relação combustível-vapor para a usina operando com o combustível configurado, e são apresentados à direita da aba.

Tabela 31 – Tempo de operação da usina operando o combustível

FONTE: Autor

Tempo de Funcionamento da Usina	308,86 Dias
--	--------------------

Tabela 32 – Horas de operação da usina com o combustível.

FONTE: Autor

Horas de Operação da Usina	8.742 h/ano
-----------------------------------	--------------------

Tabela 33 – Relação combustível-vapor operando com o combustível.

FONTE: Autor

Relação Combustível-Vapor	0,41 tcomb/tvapor
----------------------------------	--------------------------

Para fins de comparação, esses valores também são apresentados para a usina operando apenas com o bagaço de cana, conforme Tabela 34, Tabela 35 e Tabela 36 e podem ser visualizados à esquerda da aba (ver Figura 16)

Tabela 34 – Tempo de operação da usina operando com bagaço.

FONTE: Autor

Tempo de Funcionamento da Usina	238,72 Dias
--	--------------------

Tabela 35 – Horas de operando da usina operando com bagaço.

FONTE: Autor

Horas de Operação da Usina	6.246 h/ano
-----------------------------------	--------------------

Tabela 36 – Relação combustível-vapor para operação com bagaço.

FONTE: Autor

Relação Combustível-Vapor	0,42 tcomb/tvapor
----------------------------------	--------------------------

O cálculo do custo da eletricidade (COE) pode ser obtido através da equação (3.18):

$$COE = \frac{CCap + O \& M + CC_{bag} \cdot T_{bag} + CC_{bio} \cdot T_{bio}}{E} \quad (3.18)$$

onde:

- $CCap$: custo de capital (R\$/ano);
- $O \& M$: custo de operação e manutenção (R\$/ano);
- CC_{bag} : custo do bagaço (R\$/t);
- T_{bag} : toneladas de bagaço consumidas no ano (t/ano);
- CC_{bio} : custo da biomassa (R\$/t);
- T_{bio} : toneladas de biomassa consumidas no ano (t/ano);
- E : energia elétrica produzida (MWh/ano).

O custo da eletricidade (COE) é um índice que auxilia na análise das alternativas utilizadas, mostrando o custo de produção para a geração de energia elétrica. A Tabela 37 e Tabela 38 apresentam respectivamente, os valores para a usina operando com o combustível configurado e operando apenas com o bagaço.

Tabela 37 – Custo da eletricidade (COE do combustível).

FONTE: Autor

Custo da Eletricidade	67,48 R\$/MWh
------------------------------	----------------------

Tabela 38 – Custo da eletricidade (COE do bagaço).

FONTE: Autor

Custo da Eletricidade	66,69 R\$/MWh
------------------------------	----------------------

Para finalizar o relatório comparativo, é calculada a receita obtida com a venda da energia elétrica excedente, ou seja, a energia elétrica exportada para a rede, uma vez que parte da energia gerada é utilizada na própria usina.

Os valores encontrados são mostrados na Tabela 39 para a usina operando com o combustível e na Tabela 40 para a usina operando apenas com o bagaço.

Tabela 39 – Receita com a venda de excedentes para operação com o combustível.

FONTE: Autor

Receita Total com a Venda de Excedentes	15.590.737,70 R\$/Ano
--	------------------------------

Tabela 40 – Receita com a venda de excedentes para operação com bagaço.

FONTE: Autor

Receita Total com a Venda de Excedentes	12.049.949,98 R\$/Ano
--	------------------------------

4 Estudo de Caso

4.1 Introdução

Neste capítulo será feito o detalhamento da configuração da planta estudada, partindo de uma planta básica convencional apresentada no estudo de caso realizado por PASSOLONGO (2011).

Inicialmente será realizada a simulação da planta dessa usina sucroalcooleira que utiliza equipamentos modernos e eficientes, incluindo caldeiras que produzem vapor a altos níveis de pressão e temperatura e turbinas de extração-condensação de múltiplos estágios. Além disso, todos os acionamentos (moendas, exaustores, ventiladores, bomba de alimentação de água) são eletrificados.

Esta simulação objetiva avaliar os resultados obtidos para atestar o correto funcionamento do simulador.

Na sequência será apresentada uma simulação tomando como base a mesma usina utilizando uma mistura de biomassas, composta de bagaço de cana e casca de arroz.

A mistura será na proporção de 80% de bagaço e 20% de casca de arroz e tem por finalidade aumentar o tempo de operação da usina.

Deve-se ressaltar que no segundo caso, a massa total de bagaço consumida no ano é a mesma apresentada na usina original e que a casca de arroz adquirida deve ser a necessária para manter a proporção definida.

Como será visto nos resultados, o uso da mistura diminuiu o custo da produção de eletricidade e elevou a receita com a venda de excedentes.

4.2 Descrição da usina simulada

A Figura 17 mostra a planta estudada por PASSOLONGO (2011). Como mencionado no início deste capítulo, esta planta possui equipamentos modernos e eficientes, incluindo uma caldeira que produz 160 t/h de vapor a 68,6 bar e 530 °C, uma turbina de extração-condensação acoplada a um gerador de 32 MW e uma turbina de contrapressão acoplada a um gerador de 12 MW.

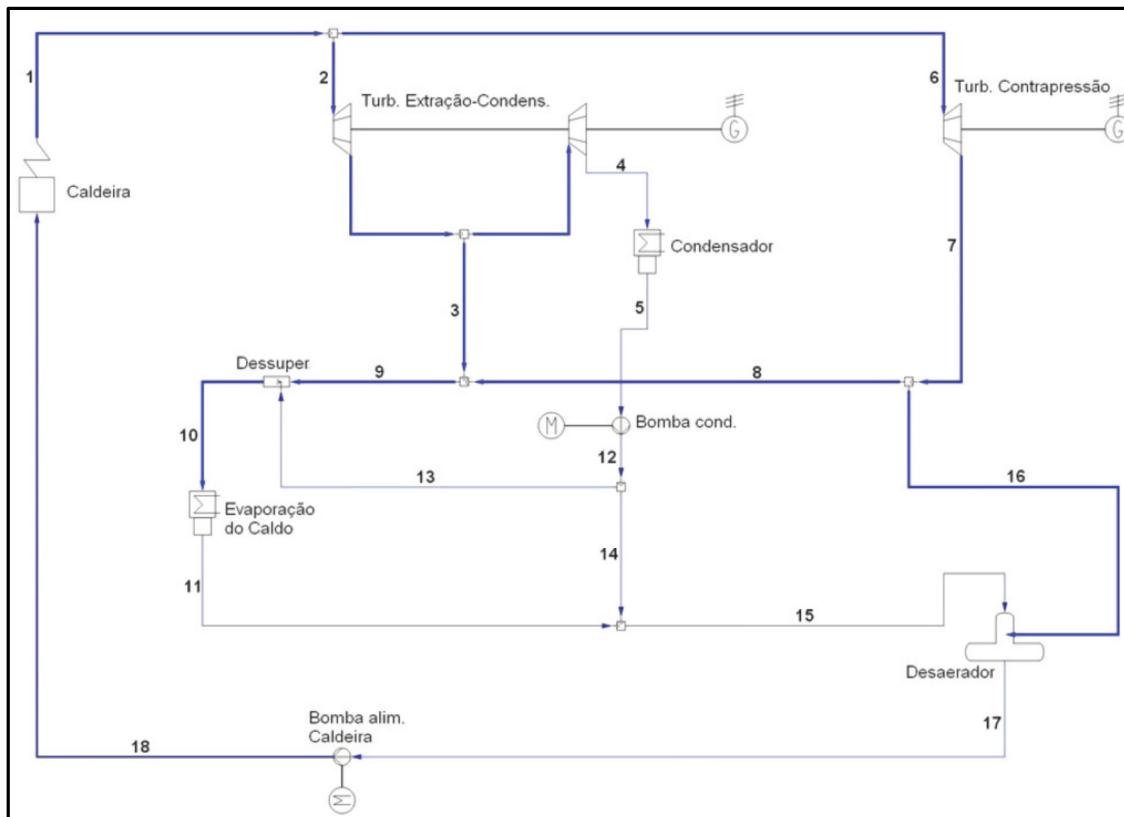


Figura 17 – Planta de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Parte do vapor produzido pela caldeira (125 t/h) é direcionado para a turbina de extração-condensação, sendo destes 97 t/h extraídos a uma pressão de 2,45 bar para o processo de evaporação do caldo e o restante continuando a expandir até a pressão de 0,07 bar (PASSOLONGO, 2011).

O restante do vapor produzido (35 t/h) é direcionado para a turbina de contrapressão e descarregados a uma pressão de 2,45 bar, também destinada a atender a demanda de vapor do processo industrial (PASSOLONGO, 2011).

O processo industrial de evaporação do caldo consome 130 t/h de vapor (cerca de 450 kg de vapor por tonelada de cana moída) a uma temperatura de 135 °C. Como a temperatura do vapor de escape é próxima de 160 °C é necessária a utilização de um dessuperaquecedor, cuja finalidade é reduzir a temperatura até um ponto próximo à saturação, através da injeção de uma determinada quantidade de água líquida a 38 °C (PASSOLONGO, 2011).

A Tabela 41 e a Tabela 42, mostradas abaixo, apresentam respectivamente os dados da safra e os parâmetros característicos da planta desta usina.

Tabela 41 – Dados de safra da usina considerada.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Parâmetros	Valores	Unidades
Cana moída total	1.500.000	t
Dias de safra	240	dias
Moagem horária	286	t/h
Relação bagaço-vapor	0,47	kg/kg
Vazão de bagaço produzido	81,5	t/h
Vazão de bagaço na caldeira	75,2	t/h
Vazão de bagaço excedente	6,3	t/h
Vazão de vapor na caldeira	160	t/h
Consumo de vapor no processo	130	t/h

Tabela 42 – Parâmetros de operação da usina considerada.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Ponto	\dot{m} (t/h)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	ex (kJ/kg)
1	160,0	68,6	530,0	3.485,09	6,902	1.482,64
2	125,0	68,6	530,0	3.485,09	6,902	1.482,64
3	97,1	2,45	159,7	2.786,00	7,228	686,36
4	27,9	0,07	39,0	2.320,92	7,471	149,00
5	27,9	0,07	38,0	159,19	0,546	50,94
6	35,0	68,6	590,0	3.485,09	6,902	1.482,64
7	35,0	2,45	159,7	2.786,00	7,228	686,36
8	30,3	2,45	159,7	2.786,00	7,228	686,36
9	127,4	2,45	159,7	2.786,00	7,228	686,36
10	130,0	2,45	135,0	2.733,61	7,104	671,11
11	130,0	2,45	124,7	524,00	1,579	107,93
12	27,9	2,45	38,0	159,49	0,546	51,19
13	2,6	2,45	38,0	159,49	0,546	51,19
14	25,3	2,45	38,0	159,49	0,546	51,19
15	155,3	2,45	110,7	464,59	1,427	93,82
16	4,7	2,45	159,7	2.786,00	7,228	686,36
17	160,0	2,45	126,8	532,52	1,600	110,06
18	160,0	78,6	128,1	543,37	1,607	118,90

Na Tabela 43 são apresentados alguns dos resultados termodinâmicos obtidos na análise dos equipamentos da usina, tais como: a potência eletromecânica, a

potência térmica, as irreversibilidades geradas e as eficiências pela primeira lei da termodinâmica.

Tabela 43 – Potência eletromecânica, térmica, irreversibilidades e eficiência para os equipamentos da planta estudada.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Equipamento	W (kW)	Q (kW)	I (kW)	η_i (%)
Caldeira	-	167.613,3	36.870,08	78,0
Turb. a Vapor Extr.-Condensação	27.147,52	-	3.594,03	85,8
Turb. a Vapor de Contrapressão	6.527,54	-	944,91	84,0
Bomba da Caldeira	502,16	-	89,66	75,0
Bomba de Condensado	2,39	-	0,45	75,0
Processo	-	79.791,3	40.347,66	-
Condensador	-	16.372,9	1.477,41	-

A análise da usina mostrou ainda que a planta apresenta uma eficiência global de 61,4% e que esta é capaz de produzir 33,2 MW de potência elétrica (PASSOLONGO, 2011).

4.3 Caso A – Usina utilizando bagaço como combustível

Os dados do trabalho de PASSOLONGO (2011) foram introduzidos na planilha BIOMIX.

Abaixo são apresentadas diversas tabelas com os dados de entrada utilizados e resultados concebidos pelo simulador.

Na Tabela 44 e na Tabela 45 são apresentados respectivamente, os parâmetros operacionais e eficiência dos equipamentos configurados na planilha BIOMIX.

Tabela 44 – Parâmetros operacionais configurados no simulador da usina.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Parâmetros	Valores	Unidades
Geração de Vapor (Caldeira)	160	t/h
Pressão (Caldeira)	68,6	bar
Temperatura (Caldeira)	530	°C
Vazão de Vapor (Turbina Extração-Cond.)	125	t/h
Vazão de Vapor (Extração)	97,1	t/h
Pressão (Extração)	2,45	bar
Pressão (Condensador)	0,07	bar
Vazão de Vapor	30,3	t/h
Vazão de Vapor (Processo)	130	t/h

Tabela 45 – Eficiências dos equipamentos adotadas no simulador da usina.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Equipamentos	Eficiências	Unidades
Bomba 1	75,0	%
Bomba 2	75,0	%
Turbina a Vapor Extração-Condensação (1 Estágio)	85,8	%
Turbina a Vapor Extração-Condensação (2 Estágio)	85,8	%
Turbina a Vapor Contrapressão	84,0	%
Caldeira	78,0	%
Geradores*	95,0	%

Na Tabela 46 é apresentada a demanda elétrica dos equipamentos eletrificados configurada na planilha.

Tabela 46 – Demanda dos equipamentos eletrificados.

Equipamentos	Valor	Unidades
Moenda e outros	10	MW

Ao término dos cálculos já indicados, a planilha apresentou os resultados termodinâmicos mostrados na Tabela 47 abaixo.

Tabela 47 – Resultados termodinâmicos obtidos da simulação.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
Demandas Energéticas das Bombas	0,4	MW
Potência Gerada	33,2	MW
Potência Elétrica Líquida	22,8	MW
Demandas Térmicas do Processo	79,4	MW
Calor Transferido ao Vapor na Caldeira	130,8	MW
Rendimento Global da Planta	57,9	%

A análise da confiabilidade dos dados apresentados é realizada pela própria planilha, utilizando a aba “Validação da Simulação”.

A Tabela 48 mostra os resultados obtidos por PASSOLONGO (2011) que foram inseridos na planilha BIOMIX, enquanto a Figura 18 e Tabela 49 apresentam os resultados dessa comparação.

Tabela 48 – Valores termodinâmicos utilizados para avaliação da simulação.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Parâmetros	Valores	Unidades
Demandas Térmicas para o Processo	79,79	MW
Potência Elétrica Gerada nas Turbinas	33,20	MW
Potência Térmica Gerada na Caldeira	130,74*	MW

*Valor encontrado ao multiplicar a potência térmica da caldeira informada e a eficiência da caldeira.

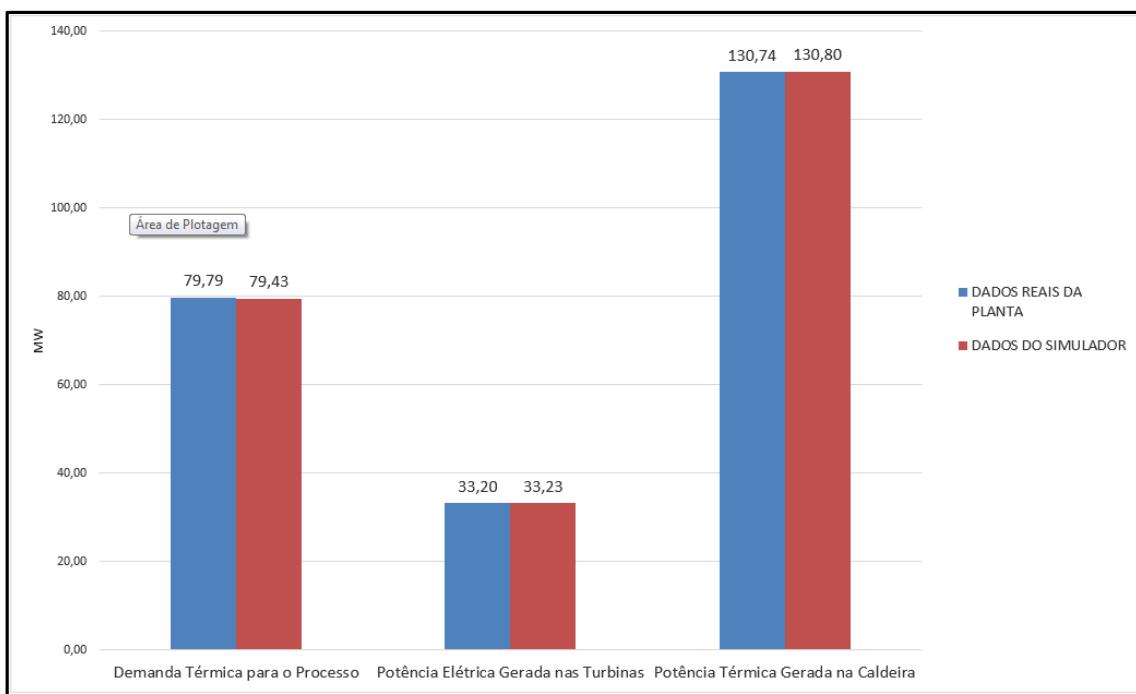


Figura 18 – Gráfico comparativo entre valores simulados e reais da usina.

FONTE: Autor

Tabela 49 – Erros relativos a simulação dos parâmetros termodinâmicos.

FONTE: Autor

Parâmetros	Erro	Unidades
Demanda Térmica para o Processo	0,45	%
Potência Elétrica Gerada nas Turbinas	0,09	%
Potência Térmica Gerado na Caldeira	0,05	%

Como pode ser visto, o erro foi pequeno, indicando confiabilidade do simulador.

Em seguida foi realizada a análise da safra de cana-de-açúcar. PASSOLONGO (2011) não fornece os valores de fibra do colmo e do bagaço, sendo dessa forma necessário estima-los com base em valores, dentro dos padrões geralmente encontrados na cana-de-açúcar, de forma a obter a mesma vazão de produção de bagaço informada.

A Tabela 50 e Tabela 51 mostradas abaixo apresentam respectivamente, os valores inseridos e os resultados apresentados na análise.

Tabela 50 – Dados adotados para a análise da safra.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Parâmetros	Valores	Unidades
Dias de Moagem	240	dias
Safra Anual	1.500.000	t/ano
Fibra do Colmo	14,4	%
Fibra do Bagaço	46,0	%

Tabela 51 – Resultados obtidos na análise da safra de cana-de-açúcar.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
Meses de Moagem	8,0	Meses
Horas Efetivas de Moagem	5.760	Horas
Moagem Horaria Efetiva	260,4	t/h
Porcentagem de Bagaço Produzido	31,30	%
Produção de Bagaço na Safra	469.565	t/ano
Produção Horaria de Bagaço	81,5	t/h

O trabalho de PASSOLONGO (2011) não informa moagem horária efetiva, que é um dos parâmetros necessários para os cálculos da planilha. Na falta dessa informação, foi adotada a hipótese de os dias de moagem serem iguais aos dias de safra informados. No entanto, o valor obtido foi inferior ao apresentado pela usina real (286 dias, ver tabela 53).

Seguindo para a aba “Combustível”, foi configurada as propriedades do bagaço conforme apresentado na Tabela 52.

Tabela 52 – Propriedades do bagaço de cana.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
Teor de Açúcar	2,5	%
Umidade	47,5	%
PCI do Bagaço	8.029,1	kJ/kg

O valor do PCI é calculado pela planilha a partir do teor de açúcar e umidade. Esses valores não são informados no estudo realizado por PASSOLONGO (2011),

sendo necessário estima-los com base em valores geralmente encontrados na literatura especializada.

Os valores foram escolhidos de modo a obter um PCI que forneça a mesma vazão de bagaço na caldeira.

A Tabela 53, mostrada abaixo, apresenta os valores obtidos na análise desta aba.

Tabela 53 – Análise final da usina – Caso A.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
Consumo de Bagaço	75,2	t/h
Relação Combustível-Vapor	0,47	tcomb/tvapor
Fator de Utilização de Energia - FUE	0,672	-
Índice de Poupança de Energia – IPE	0,900	-
Energia a Economizar Devido à Cogeração – EEC	0,100	-
Índice de Geração de Potência – IGP	0,505	-
Relação Potência-Calor – RPC	0,418	-
Dias de Funcionamento da Usina.	260	dias

Pode-se observar que mesmo apresentando equipamentos modernos e eficientes, o tempo de funcionamento desta usina ainda permanece inferior a 1 (um) ano.

Foi decidido pela não realização da configuração do relatório comparativo, uma vez que a função deste é apresentar uma comparação da usina funcionando com bagaço e funcionando com o combustível configurado, que neste caso também foi o bagaço.

4.4 Caso B – Usina utilizando mistura de biomassa com combustível

Como mencionado no início deste capítulo, o segundo estudo é realizado tendo como base a simulação da usina do caso A, alterando apenas a fonte de energia.

Com isso, os dados configurados no caso A foram novamente utilizados na configuração da planilha para o caso B.

Foram inseridos os valores informados na Tabela 44, Tabela 45, Tabela 50 e Tabela 52.

Iniciando a configuração da biomassa utilizada na formação da mistura combustível, foi escolhida, dentre as opções fornecidas pela planilha, a casca de arroz por se tratar de outro resíduo agrícola de grande potencial no setor de geração de energia brasileiro (ANEEL, 2005).

Foi definido que para o estudo, a mistura deveria atender a proporção de biomassa mostrada na Tabela 54, com isso optou-se por fornecer a porcentagem como unidade de entrada da quantidade misturada.

Tabela 54 – Proporção das biomassas na mistura.

FONTE: Autor

Biomassa	Valores	Unidades
Bagaço de cana de açúcar	80	%
Casca de arroz	20	%

Tabela 55 – Propriedades da Biomassa adotada (casca de arroz).

FONTE: LORA, 2012

Parâmetros	Valores	Unidades
Teor de hidrogênio	5,1	%
Umidade	11	%
PCI da Biomassa	12.837,4	kJ/kg

A Tabela 55 apresenta os valores configurados para as propriedades da casca de arroz e foram escolhidos com base em valores médios obtidos para esta biomassa.

O valor do PCI do bagaço foi calculado pela própria planilha utilizando a metodologia já explicada.

A Tabela 56, mostrada abaixo, apresenta os valores obtidos na análise final da usina operando com a mistura de biomassas.

Tabela 56 – Análise final da usina – Caso B.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
PCI da Mistura	8990,78	kJ/kg
Consumo Total de Combustível na Caldeira	67,1	t/h
Consumo de Bagaço	53,7	t/h
Consumo da Biomassa Misturada	13.4	t/h
Relação Combustível-Vapor	0,42	tcomb/tvapor
Fator de Utilização de Energia - FUE	0,672	-
Índice de Poupança de Energia – IPE	0,900	-
Energia a Economizar Devido à Cogeração – EEC	0,100	-
Índice de Geração de Potência – IGP	0,505	-
Relação Potência-Calor – RPC	0,418	-
Dias de Funcionamento da Usina.	364	dias

Observa-se um aumento no tempo de operação da usina para aproximadamente 1 (um) ano, além da redução do consumo de combustível na caldeira.

Esta redução é resultado do aumento do poder calorífico inferior do combustível, o que diminui a vazão de combustível para manter o mesmo fluxo de calor na caldeira.

Para realizar a comparação entre os dois casos, foi utilizado a aba “Relatório Comparativo” presente na planilha BIOMIX.

O custo capital teve de ser determinado utilizando o custo anual dos equipamentos, com amortização, apresentados na Tabela 57 abaixo.

Tabela 57 – Custo estimado dos equipamentos da usina e custos com amortização.

FONTE: PASSOLONGO, 2011

Equipamento	Custo (R\$)	Custo com amortização (R\$/ano)
Caldeira	28.000.000,00	6.478.605,84
Turbina a Vapor Extração-Condensação	17.000.000,00	3.933.439,26
Turbina a Vapor Contrapressão	3.000.000,00	694.136,34
Condensador	800.000,00	185.103,02
Bomba de Condensado	100.000,00	23.137,88
Dessuperaquecedor	150.000,00	34.706,82
Evaporação do Caldo	1.000.000,00	231.378,78
Mistura dos Condensados	200.000,00	46.275,76
Desaerador	2.000.000,00	462.757,56
Bomba da Caldeira	1.800.000,00	416.481,80

Esses valores foram obtidos por PASSOLONGO (2011) levando-se em conta um período de amortização de 20 anos, 12% de taxa de juros (condizente com o cenário econômico brasileiro), 9% de percentual de custo anual fixo associada à operação e manutenção, e um percentual de custo anual variável de operação e manutenção de 1 %, com um fator de carga de 0,75.

A Tabela 58 mostra todos os valores adotados na configuração do relatório comparativo.

Tabela 58 – valores adotados para análise comparativa.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
Custo capital	12.506.023,06	R\$/ano
Custo O&M	-	R\$/ano
Custo do bagaço	15	R\$/t
Custo da biomassa	60	R\$/t
Preço de venda da energia excedente	150	R\$/MWh

Vale ressaltar que o Custo O&M foi configurado como 0 (zero), pois como pode ser visto, o custo capital calculado por PASSOLONGO (2011) já levou em conta os custos de manutenção e operação e que foram adotados valores de mercado para os custos do bagaço e da biomassa para o preço de venda da energia.

As Tabela 59 e Tabela 60 apresentam respectivamente, a análise para a usina operando com bagaço e com a mistura de bagaço + casca de arroz.

Tabela 59 – Relatório da usina utilizando bagaço como combustível.

FONTE: Autor

Parâmetros	Valores	Unidades
Poder calorífico Inferior	8.029	kJ/kg
Consumo total de combustível	469.565	t/ano
Potência elétrica líquida	22,8	MW
Energia elétrica gerada	207.520	MWh
Energia elétrica consumida	65.102	MWh
Energia elétrica a ser comercializada	142.418	MWh
Tempo de funcionamento da usina	260	dias
Horas de operação da usina	6.245	h/ano
Relação bagaço-vapor	0,47	tbag/tvapor
Custo da eletricidade	94,21	R\$/MWh
Receita com venda de excedentes	21.362.747,93	R\$/ano

Tabela 60 – Relatório da usina utilizando a mistura como combustível.

FONTE: Autor.

Parâmetros	Valores	Unidades
Poder calorífico Inferior	8.991	kJ/kg
Consumo total de combustível	586.957	t/ano
Potência elétrica líquida	22,8	MW
Energia elétrica gerada	290.469,22	MWh
Energia elétrica consumida	91.124	MWh
Energia elétrica a ser comercializada	199.345	MWh
Tempo de funcionamento da usina	364	dias
Horas de operação da usina	8.741	h/ano
Relação bagaço-vapor	0,42	tbag/tvapor
Custo da eletricidade	91,55	R\$/MWh
Receita com venda de excedentes	29.901.738,82	R\$/ano

É claramente observado o aumento no tempo de operação da usina com a utilização da mistura.

Devido a esse aumento no tempo de operação a energia consumida também aumentou, o que é compensado pelo aumento da energia gerada e aumento da energia excedente.

A Figura 19 mostra uma comparação entre o tempo de operação da usina nas duas simulações, enquanto a Figura 20 apresenta a comparação da energia excedente.

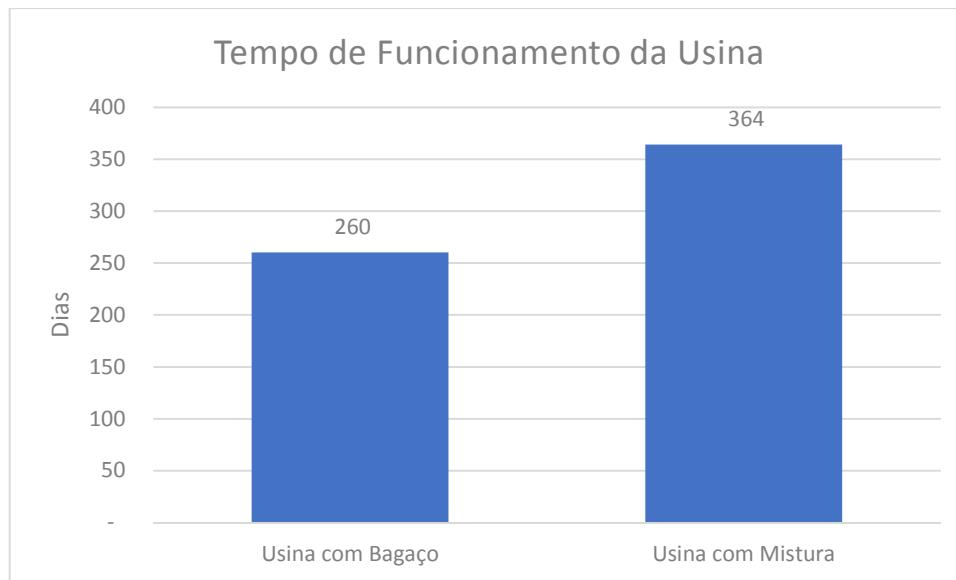


Figura 19 – Comparação do tempo de funcionamento da usina.

FONTE: Autor

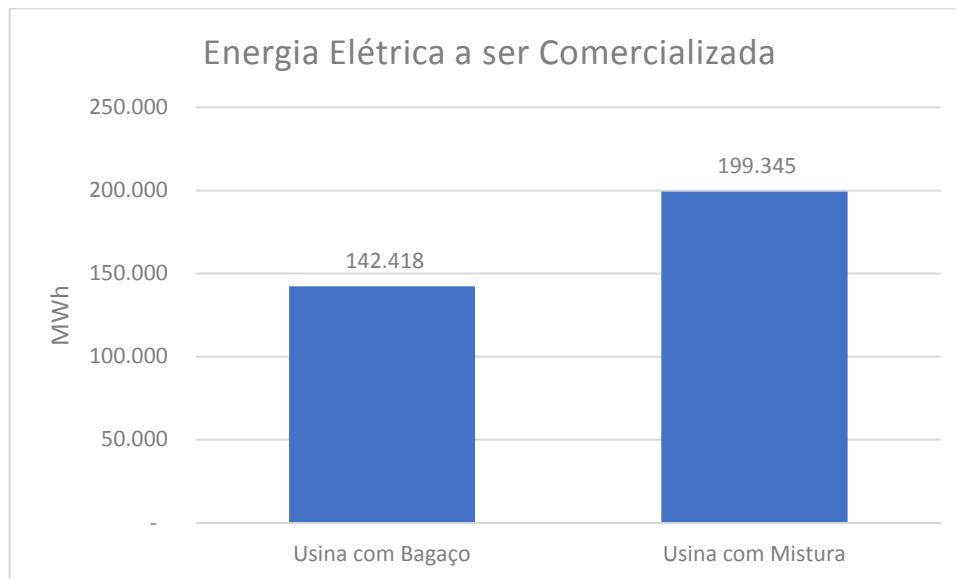


Figura 20 – Comparação da energia elétrica a ser comercializada.

FONTE: Autor

Na Figura 21 é possível visualizar o ganho obtido com a venda dos excedentes de energia com a utilização da mistura, enquanto nas Figura 22 e Figura 23 é observado a diminuição da relação combustível-vapor e do custo da eletricidade respectivamente.

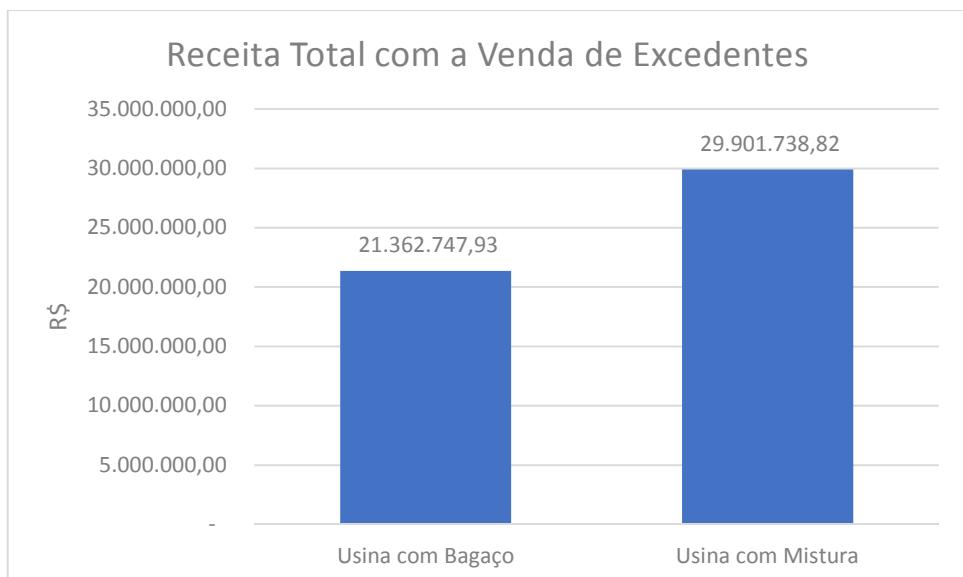


Figura 21 – Comparação da receita total da usina com a venda de excedentes.

FONTE: Autor

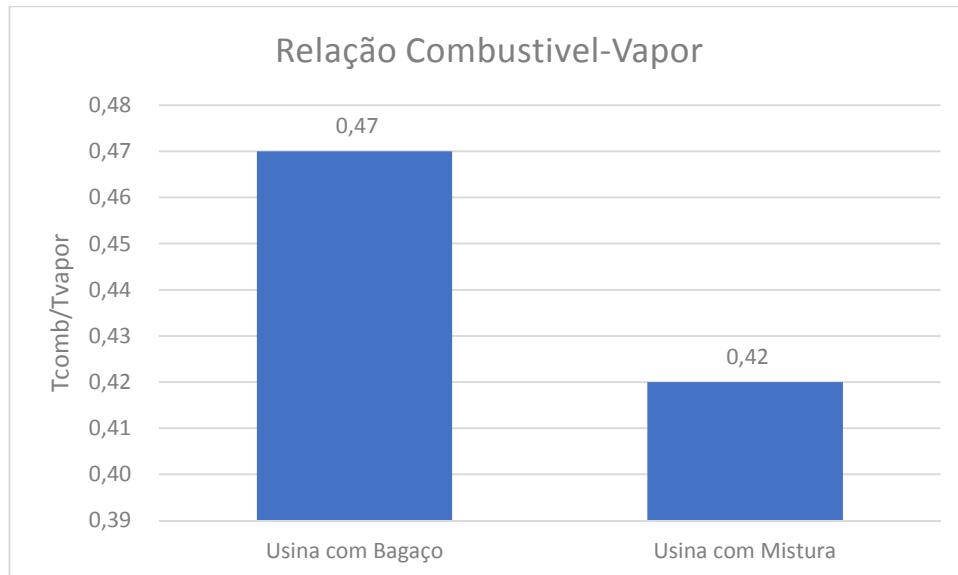


Figura 22 – Comparação relação combustível-vapor.

FONTE: Autor

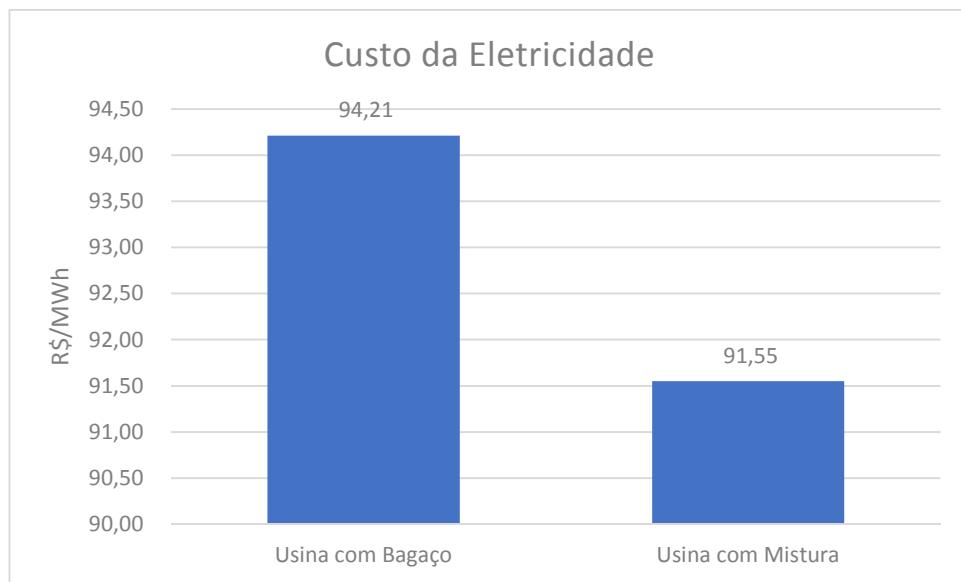


Figura 23 – Comparaçāo custo da eletricidade.

FONTE: Autor

Esses resultados mostram que o uso da mistura de biomassas em usinas sucroalcooleiras é viável, pois além de resultar em maior renda com a venda de excedentes de energia, promove ainda a queda do valor de produção da mesma, gerando maior lucro aos proprietários da usina.

5 Conclusões e Recomendações Finais

O presente trabalho propõe a simulação de uma usina sucroalcooleira empregando uma mistura de biomassas como combustível para cogeração. O objetivo é saber como a utilização desta mistura afeta o funcionamento da usina.

Para a realização deste estudo, foram apresentados os conceitos básicos de cogeração de energia no setor, os parâmetros mais importantes para a análise em usinas sucroalcooleiras e foi escolhido um estudo de caso de uma planta sucroalcooleira do oeste paulista.

Foi desenvolvida uma ferramenta para realizar a simulação da usina em Microsoft Excel. A planilha BIOMIX conta com várias abas, cada uma destinada a realizar uma análise dos diferentes processos da usina, além de permitir realizar a mistura de biomassas para alimentação da caldeira.

Foi simulada inicialmente uma usina utilizando a fonte de energia original (bagaço de cana), onde foram explicadas todas as hipóteses e divergências dos valores obtidos com o simulador. Em uma segunda simulação foi alterada a fonte de energia primária da usina, adicionando casca de arroz ao bagaço.

Os resultados obtidos com a utilização da mistura foram o aumento no tempo de operação de 260 para 364 dias, aumento da energia elétrica excedente em aproximadamente 40%, aumento da receita bruta da usina em aproximadamente 8,5 milhões e diminuição do custo da eletricidade em aproximadamente 3%.

Conclui-se então que o emprego de uma mistura de biomassas em usinas sucroalcooleiras é viável, uma vez que aumenta o tempo de operação e a energia para a comercialização, além de reduzir os custos para a produção o que acarreta em maior lucratividade.

Deixa-se como proposta de continuidade, uma análise mais detalhada do impacto deste tipo de modificação nos equipamentos da usina, sobretudo nas caldeiras, avaliando manutenção e vida útil destes equipamentos. Outra proposta seria a realização de uma análise mais detalhada dos investimentos financeiros necessários, através de análise de fluxo de caixa, para viabilizar economicamente a aplicabilidade das modificações propostas.

6 Bibliografia

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acessado em 9 de Agosto de 2013.
- ANEEL, 2005, Atlas de energia elétrica do Brasil. 2ed. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/download.htm>> Acesso em: 9 ago. 2013.
- BRUNI, A.L., PAIXÃO, R.B., 2011, **Excel Aplicado à Gestão Empresarial**. 2 ed. São Paulo, Editora Atlas
- FIONARI, M.C., 2004, **Análise Energética e Exergética de uma Usina Sucroalcooleira do Oeste Paulista com Sistema de Cogeração de Energia em Expansão**. Tese* de M.Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.
- FIONARI, M.C., MASHIBA, M.H.S., LIMA, R.S. et al., “Análise Termodinâmica e Termoeconômica de uma Usina Sucroalcooleira que Produz Excedente de Energia para Comercialização”. In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, An.6. Campinas, SP, 2006.
- HUGOT, E., 1969, **Manual da Engenharia Açucareira**. 2 Vols. São Paulo, Editora Mestre Jou
- LOO, S. V., KOPPEJAN, J., 2008, **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. 1ed. Londres, Editora Earthscan.
- LORA, E. E. S., VENTURINI, O. J., 2012, **Biocombustíveis**. 2 Vols. Rio de Janeiro, Editora Interciência
- MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acessado em 9 de Agosto de 2013
- NOGUEIRA, M. F. M., 2007, Biomassa Energética: Caracterização de Biomassa. Disponível em: <<http://redenacionaldecombustao.org/escoladecombustao/arquivos/EDC2007/biomassa/>> Acesso em: 9 ago. 2013
- PASSOLONGO, R., 2011, **Avaliação Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica da Integração de Sistemas de Gaseificação da Biomassa em uma Usina Sucroalcooleira**. Tese* de M.Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

ROCHA, G., 2010, **Análise Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica de uma Usina Sucroalcooleira com Processo de Extração por Difusão.** Tese* de M.Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

ROMÃO JUNIOR, R.A., 2009, **Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira.** Tese* de M.Sc., UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

SÁNCHEZ PRIETO, M.G.S., 2003, **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso.** Tese* de D.Sc, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

VAN WYLEN, G., SONNTAG, R., BORGNAKKE, C., 2003, **Fundamentos da Termodinâmica Clássica.** 6 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher

WALTER, A.C., 1994, **Viabilidade e Perspectivas da Cogeração e da Geração Termelétrica Junto ao Setor Sucro-Alcooleiro.** Tese* de D.Sc, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

7 Apêndice A – Planilha BIOMIX configurada para o caso B

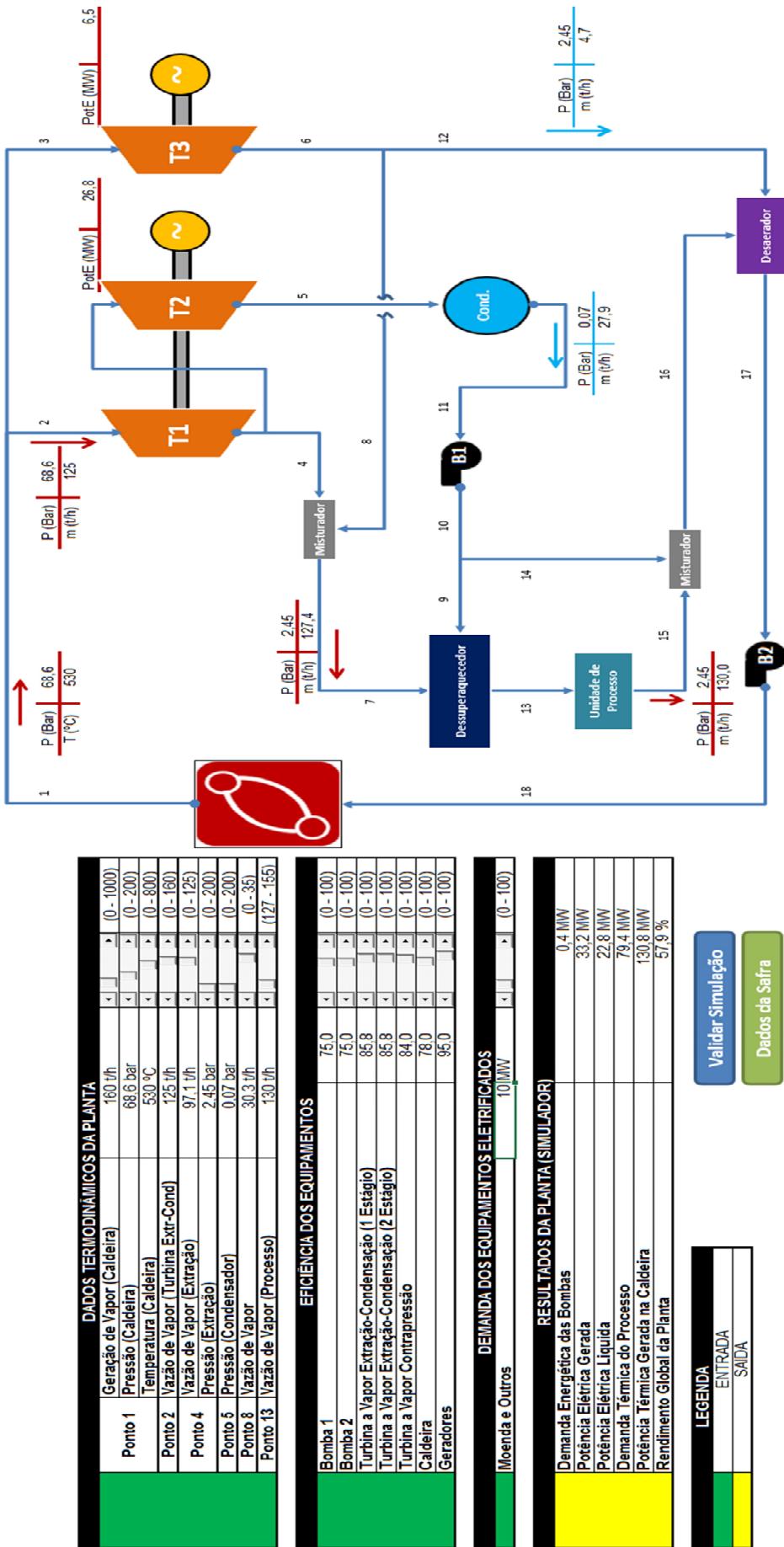
ANÁLISE DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA ALIMENTADA POR UMA
MISTURA DE BIOMASSAS

PLANILHA BIOMIX

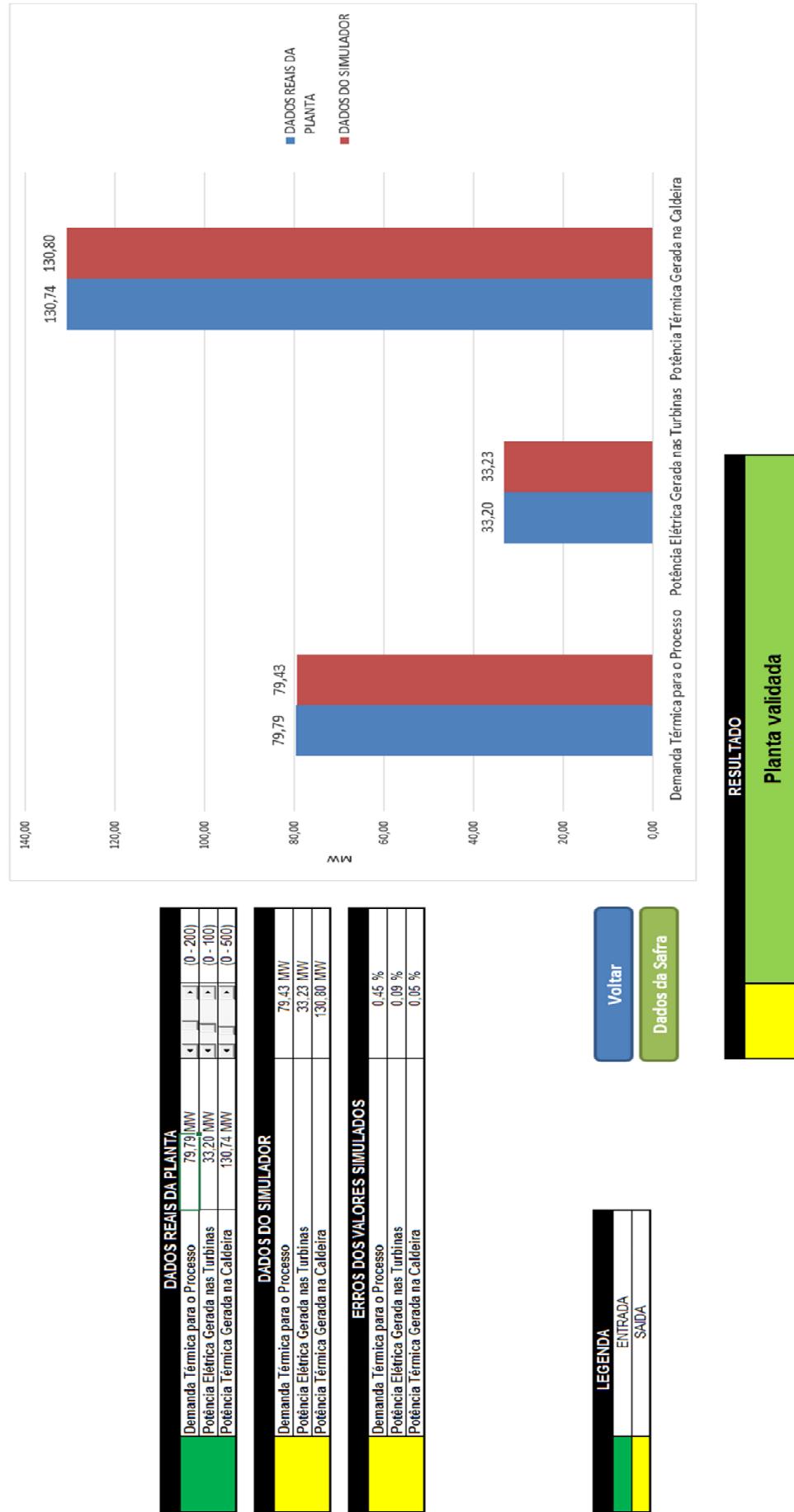
Elaborado por: Ignacio Moura Murtas

INICIAR PLANILHA

CONFIGURAÇÃO DA USINA



VALIDAÇÃO DA SIMULAÇÃO DA USINA



DADOS DA SAFRA DE CANA-DE-AÇUCAR

DADOS DA SAFRA DE CANA-DE-AÇUCAR	
Dias de Moagem	240.000 dias
Safra Anual	1.500.000 t/ano
PROPRIEDADES DA CANA-DE-AÇUCAR COLHIDA	
Filtra do Colmo	14,4 %
Filtra do Bagaceiro	46,0 %



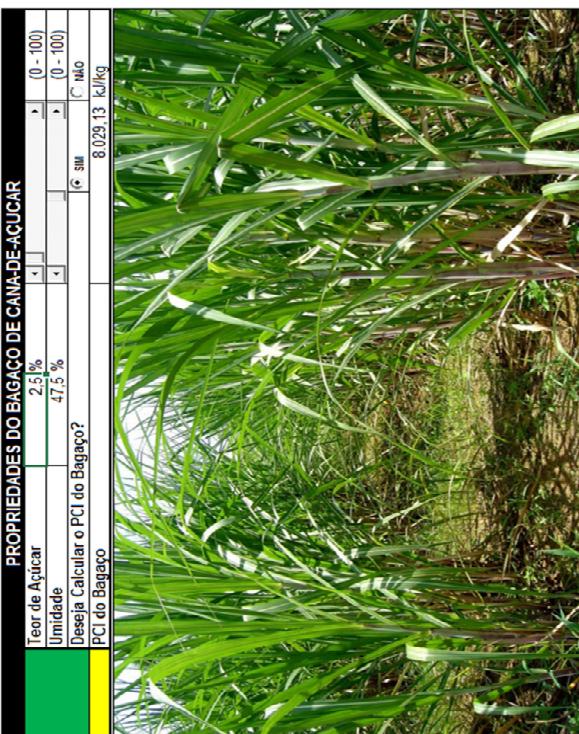
RESULTADOS DA SAFRAS	
Meses de Moagem	8,0 meses
Horas Efetivas de Moagem	5.760,0 horas
Moagem Horária Efetiva	260,4 t/h
Porcentagem de Bagaceiro Produzido	31,30 %
Produção de Bagaceiro na Safra	469.565 t/ano
Produção Horária de Bagaceiro	81,5 t/h

LEGENDA	ENTRADA	SADA
	■	■

[Voltar para Usina](#)

[Dados da Biomassa](#)

COMBUSTÍVEL DA CALDEIRA



PROPRIEDADES DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇUCAR	
Téor de Açúcar	2,5 %
Unidade	47,5 %
Deseja Calcular o PCI do Bagáço?	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NAO
PCI do Bagáço	8.029,13 kJ/kg

BIOMASSA PARA MISTURA	
Selecione a Biomassa para mistura	Casca de Arroz
Unidade da Quantidade de Biomassa	<input checked="" type="radio"/> PORCENTAGEM
Porcentagem de biomassa misturada	20,0 %
Toneladas de biomassa misturada	117,391 t/ano
PROPRIEDADES DA BIOMASSA	
Unidade	<input checked="" type="radio"/> SIM <input type="checkbox"/> NAO
Téor de Hidrogénio	11,0 %
Deseja Calcular o PCI da Biomassa?	<input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NAO
PCI da Biomassa	12.837,42 kJ/kg

RESULTADOS

PCI da Mistura	8.930,76 kJ/kg
Consumo Total de Combustível na Caldeira	67,1 t/h
Consumo de Bagáço	53,7 t/h
Consumo da Biomassa Misturada	13,4 t/h
Relação Combustível/Vapor	0,42 (combustível/vapor)
ÍNDICE DE DESEMPEÑHO DA USINA	
Fator de Utilização de Energia - FUE	0,672
Índice de Poupança de Energia - IPF	0,900
Energia a Economizar Devido à Cogeração - EEC	0,100
Índice de Geração de Potência - IGP	0,505
Relação Potência-Calor - RPC	0,418
DIAS DE FUNCIONAMENTO DA USINA	
364 Dias	

LEGENDA
ENTRADA
SÍLIDA

[Voltar](#) [Comparativo](#)

Relatório Comparativo

Planta com Bagacão de Cana

Custo de Capital	R\$ 12.506.023,06	ao Ano
Custo O&M	R\$ -	ao Ano
Custo combustível (Bagacão)	R\$ 15,00 R\$/t	

Preço de Venda de Energia Elétrica	150,00 R\$/MWh	
Poder Calorífico Inferior	8.029 kJ/kg	

Consumo Total de Combustível	469.566 t/ano	
Potência Elétrica Líquida	22,8 MW	

Energia Elétrica Gerada	207.520 MWh/ano	
Energia Elétrica Consumida	65.102 MWh/ano	
Energia Elétrica a ser Comercializada	142.418 MWh/ano	

Tempo de Funcionamento da Usina	260 Dias	
Horas de Operação da Usina	6.245 h/ano	

Relação Combustível/Vapor	0,47 tcomb/tvapor	
Custo da Eletricidade	94,21 R\$/MWh	

Receita Total com a Venda de Excedentes	21.362.747,93 R\$/Ano	
Receita Total com a Venda de Excedentes	29.301.738,82 R\$/Ano	

Voltar

Planta com Mistura de Biomassa

Custo de Capital	R\$ 12.506.023,06	ao Ano
Custo O&M	R\$ -	ao Ano
Custo combustível (Bagacão)	R\$ 15,00 R\$/t	
Custo combustível (Biomassa)	R\$ 60,00 R\$/t	

Preço de Venda de Energia Elétrica	150,00 R\$/MWh	
Poder Calorífico Inferior	8.991 kJ/kg	

Consumo Total de Combustível	686.957 t/ano	
Potência Elétrica Líquida	22,8 MW	

Energia Elétrica Gerada	290.469 MWh/ano	
Energia Elétrica Consumida	91.124 MWh/ano	
Energia Elétrica a ser Comercializada	199.345 MWh/ano	

Tempo de Funcionamento da Usina	364 Dias	
Horas de Operação da Usina	8.741 h/ano	

Relação Combustível/Vapor	0,42 tcomb/tvapor	
Custo da Eletricidade	91,55 R\$/MWh	

Receita Total com a Venda de Excedentes	29.301.738,82 R\$/Ano	
Receita Total com a Venda de Excedentes	21.362.747,93 R\$/Ano	