

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ISABELE OLIVEIRA DE PAULA

**MODELAGEM TERMODINÂMICA E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DE UM
SISTEMA DE COGERAÇÃO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA**

Ilha Solteira
2020

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ISABELE OLIVEIRA DE PAULA

MODELAGEM TERMODINÂMICA E OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO DE UMA USINA SUCROALCOOLEIRA

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Conhecimento: Ciências Térmicas

Orientador:

Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos

Coorientador:

Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P324m Paula, Isabele Oliveira de.
Modelagem termodinâmica e otimização numérica de um sistema de cogeração de uma usina sucroalcooleira / Isabele Oliveira de Paula. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020
80 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Ciências Térmicas, 2020

Orientador: Ricardo Alan Verdú Ramos
Coorientador: Leandro Oliveira Salviano
Inclui bibliografia

1. Otimização. 2. Cana-de-açúcar. 3. Energia renovável.

Raiane da Silva Santos
Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Modelagem termodinâmica e otimização numérica de um sistema decogeração de uma usina sucroalcooleira

AUTORA: ISABELE OLIVEIRA DE PAULA

ORIENTADOR: RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS

COORIENTADOR: LEANDRO OLIVEIRA SALVIANO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA MECÂNICA, Área: Ciências Térmicas, pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. RICARDO ALAN VERDÚ RAMOS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. JOAO BATISTA CAMPOS SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP



Prof. Dr. AUGUSTO SALOMÃO BORNSCHLEGELL (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia / Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

Ilha Solteira, 21 de dezembro de 2020.

Dedicado à minha mãe. Que foi pai, mãe, inspiração de força, resiliência e mulher. Tudo por ela. Tudo para ela.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades e pelas séries de acontecimentos e coincidências na minha vida que me trouxeram até aqui e só podem ter sido proporcionadas por ele.

Agradeço a minha família, especialmente a minha mãe, pelo apoio incondicional e a confiança depositadas em mim e nos meus estudos ao longo de toda a minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Ricardo Alan Verdú Ramos e meu coorientador Prof. Dr. Leandro Oliveira Salviano pela paciência e dedicação a mim e meu trabalho. Suas contribuições foram indispensáveis para a execução dessa dissertação.

Agradeço a CAPES pelo auxílio financeiro.

Agradeço aos meus amigos pelo apoio e companheirismo ao longo de todos esses anos. Destaco aqui aqueles que estiveram junto desde o início, Laís Bandini, Mateus Faria de Andrade, Renato Candido Reis e o que chegou por último, Gabriel Coelho.

Agradeço especialmente ao Renato pelo tempo gasto me ajudando a desbravar e superar os desafios do *software* IPSEpro®.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho.

RESUMO

A biomassa, fonte de energia renovável, tem forte potencial de utilização no mundo para substituição de fontes fósseis. Como destaque, temos a cana de açúcar, biomassa mais utilizada no Brasil, devido ao fato de ser matéria-prima da fabricação de açúcar e álcool nas usinas sucroalcooleiras. Um dos resíduos dessa produção, o bagaço de cana, é comumente utilizado no processo de cogeração de energia (produção de vapor e energia elétrica) nas próprias usinas. Nesse processo, é interessante que se tenha sempre o melhor rendimento possível a fim de promover o máximo aproveitamento dos resíduos e maior retorno financeiro para a usina. Uma forma de garantir o máximo rendimento possível é a otimização, que consiste no emprego de técnicas computacionais que buscam maximizar ou minimizar uma função objetivo. Esse trabalho propõe uma análise termodinâmica e a otimização numérica de uma planta de produção de vapor e eletricidade baseada em uma usina sucroalcooleira do noroeste paulista. Todas as análises foram realizadas a partir do *software* IPSEpro[®]. Foram analisados cinco casos, nos quais foram avaliados a variação do *mix* de produção, a diminuição do calor de processo, a variação do teor de umidade do bagaço e a quantidade de calor requerida pelo processo. O método de otimização utilizado foi o dos algoritmos genéticos. A função objetivo foi a maximização da geração de energia das turbinas e as variáveis de decisão foram as frações de fluxo, fluxo de massa, temperaturas e pressões de saída das turbinas. Os resultados mostraram que a primeira configuração da planta não apresentava um bom aproveitamento da energia disponível, sendo feita, portanto uma substituição da caldeira por uma nova de maior capacidade. Depois disso, as otimizações foram realizadas nessa nova planta. A otimização mostrou bons resultados na melhora da geração de energia em todos os casos em que foi possível realizar modificações nas configurações da planta. Os resultados mais expressivos foram obtidos quando havia menor demanda de vapor para processo e quando essa demanda é suprida pela segunda turbina.

Palavras-chave: Otimização. Cana-de-açúcar. Energia renovável.

ABSTRACT

Biomass, a renewable energy source, has a strong potential for use in the world to replace fossil sources. As a highlight, we have sugarcane, the most widely used biomass in Brazil, due to the fact that is the raw material for the manufacture of sugar and alcohol in sugar and alcohol plants. One of the residues from this production, the sugarcane bagasse, is commonly used in the energy cogeneration process (production of steam and electricity) at the plants themselves. In this process, it is always interesting have the best efficiency in order to promote the maximum use of waste and greater financial return for the plant. One way to guarantee the maximum possible yield is an optimization, which consists of using computational techniques that seek to maximize or minimize an objective function. This work proposes a thermodynamic analysis and numerical optimization of a steam and electricity production plant based on a sugar and alcohol plant in the northwest of São Paulo. All analyzes were performed using the IPSEpro[®] software. We selected five cases that evaluated the variation of the production mix, the reduction of the process heat and the variation of the bagasse moisture content. The optimization method used was genetic algorithms. The objective function was to maximize the power generation of the turbines and as decision variables were flow fractions, mass flow, prices and pressures of turbines output. The results required that the first configuration of the plant did not show a good use of the available energy, being, therefore, made a replacement of the boiler by a new one of greater capacity. After that, the optimizations were carried out on this new plant. The optimization results led to the improvement of the generation of energy in all the cases in which it was possible to carry out the configurations of the plant. The optimization results led to better results when there was less demand for process steam and when the second turbine supplies that demand.

Keywords: Optimization. Sugarcane. Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia final por fonte no Brasil.	15
Figura 2 - Parte aérea da cana-de-açúcar.	17
Figura 3 - Poder calorífico de amostras de bagaço de cana com diferentes teores de umidade.....	18
Figura 4 - Rotas de processamento da cana-de-açúcar e seus resíduos.	20
Figura 5 - Mapa das usinas sucroalcooleiras no Brasil.	21
Figura 6 - Bioeletricidade sucroenergética (GWh) ofertada para a rede em 2018 e Bandeira Tarifária no mês.	23
Figura 7 - Bioeletricidade sucroenergética (GWh) ofertada para a rede entre 2010 e 2018.	23
Figura 8 - Equipamentos da biblioteca APP.	39
Figura 9 - Planta de cogeração de uma usina sucroalcooleira.....	41
Figura 10 - Variação na geração de energia de acordo com o <i>mix</i> de produção.	61
Figura 11 - Variação da vazão mássica de vapor no processo.	64
Figura 12 - Energia total gerada em função da variação do calor de processo.	67
Figura 13 - Variação da energia gerada de acordo com o teor de umidade do bagaço.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição média típica da cana (em kg / 100 kg de cana) entregue as usinas em diferentes países.....	16
Tabela 2 - Comparação das eficiências energéticas de sistemas de geração de energia térmica.....	25
Tabela 3 - Balanços de massa e energia para os diversos componentes da planta.	34
Tabela 4 - Dados operacionais do turbo gerador de 32 MW.....	42
Tabela 5 - Variáveis de entrada das simulações numéricas.....	43
Tabela 6 - Casos a serem otimizados.....	44
Tabela 7 - Parâmetros utilizados durante as otimizações.....	44
Tabela 8 - Vapor de processo de acordo com o <i>mix</i> de produção.....	45
Tabela 9 - Vapor de processo e fluxo de massa total do sistema de acordo com o <i>mix</i> de produção.....	46
Tabela 10 - Poder calorífico inferior do bagaço em função do teor de umidade.....	47
Tabela 11 - Análise termodinâmica da planta inicial.....	49
Tabela 12 - Testes de otimização variando-se o tamanho da população e número gerações.....	51
Tabela 13 - Testes de otimização com diversas combinações de valores de probabilidades de cruzamento e mutação.....	52
Tabela 14 - Resultados da otimização 1: Planta sem modificação.....	53
Tabela 15 - Resultados da geração de energia da planta inicial antes e depois da otimização.....	53
Tabela 16 - Análise termodinâmica da nova planta com geração de vapor de 58,33 kg/s.....	55
Tabela 17 - Resultados da otimização 2: <i>Mix</i> de produção.....	56
Tabela 18 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 2: <i>Mix</i> de produção.....	57
Tabela 19 - Resultados da otimização 3: <i>Mix</i> de produção com alteração na massa total do sistema.....	59
Tabela 20 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 3: <i>Mix</i> de produção com alteração na massa total do sistema.....	60
Tabela 21 - Resultados da otimização 4: Avaliando a diminuição no calor de processo.....	63

Tabela 22 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 4: Avaliando a diminuição do calor de processo.	66
Tabela 23 - Calor de entrada da caldeira em função do teor de umidade.....	68
Tabela 24 - Resultados da otimização 5: Impacto da umidade do bagaço.	69
Tabela 25 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 5: Impacto da umidade do bagaço.	70

PREFÁCIO

Este trabalho está inserido dentro das linhas de pesquisa do NUPLEN (Núcleo de Planejamento Energético, Geração e Cogeração de Energia) do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP), sendo o mesmo dividido em 5 Capítulos, conforme será descrito a seguir.

O Capítulo 1 trata da introdução do trabalho, com informações para inserir o leitor no contexto do estudo e definir os seus objetivos. São apresentados aspectos de estudo no setor sucroalcooleiro, como o histórico da cana-de-açúcar, o setor sucroalcooleiro, cogeração de energia no setor, além de aspectos do processo de otimização.

No Capítulo 2 são apresentados resumidamente alguns trabalhos acadêmicos publicados que, de alguma forma, trazem alguma contribuição para a dissertação.

No Capítulo 3 são apresentadas a fundamentação teórica da análise termodinâmica, a metodologia de otimização, o detalhamento do *software* utilizado e, também, dos casos estudados.

No Capítulos 4 são descritos os resultados das análises termodinâmica e os resultados das otimizações dos casos em função das condições de operação e considerações feitas.

No Capítulo 5 conclui-se o trabalho com uma verificação dos aspectos estudados e com sugestões para o desenvolvimento de estudos no setor sucroalcooleiro.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 HISTÓRICO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	14
1.2 A COMPOSIÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS RESÍDUOS.....	15
1.3 USINAS SUCROALCOLEIRAS E PROCESSAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	19
1.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA	24
1.5 OTIMIZAÇÃO DE PLANTAS TÉRMICAS E DE POTÊNCIA	26
1.6 OBJETIVOS.....	27
2 REVISÃO DA LITERATURA	28
3 METODOLOGIA	33
3.1 ANÁLISE TERMODINÂMICA	33
3.2 OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA	35
3.2.1 Método de otimização utilizado: Algoritmos Genéticos	35
3.2.2 Declaração de um problema de otimização	37
3.3 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO: IPSEpro®	38
3.3.1 Biblioteca APP	39
3.3.2. Módulos auxiliares do IPSEpro®	40
3.3.3 Método de Solução do PSE	40
3.4 DESCRIÇÃO DA PLANTA.....	41
3.5 DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DO SOFTWARE	42
3.6 CASOS A SEREM OTIMIZADOS	43
3.6.1 Otimização 1: Planta Inicial	44
3.6.2 Otimização 2: Mix de produção	45
3.6.3 Otimização 3: Mix de produção com alteração na massa total do sistema	45
3.6.4 Otimização 4: Efeito da diminuição do fluxo de vapor de processo	46

3.6.5	Otimização 5: Impacto da umidade do bagaço	46
4.	RESULTADOS.....	48
4.1	ANÁLISE TERMODINÂMICA	48
4.2	CONSIDERAÇÕES PARA AS OTIMIZAÇÕES	49
4.2.1	Declaração de otimização e restrições	49
4.2.2	Estudo das variáveis de otimização (parâmetros do <i>solver</i>)	51
4.3	OTIMIZAÇÃO 1: PLANTA SEM MODIFICAÇÃO.....	52
4.4	OTIMIZAÇÃO 2: <i>MIX</i> DE PRODUÇÃO.....	55
4.5	OTIMIZAÇÃO 3: <i>MIX</i> DE PRODUÇÃO COM ALTERAÇÃO NA MASSA TOTAL DO SISTEMA.....	58
4.6	OTIMIZAÇÃO 4: AVALIANDO A DIMINUIÇÃO DO CALOR DE PROCESSO	62
4.7	OTIMIZAÇÃO 5: IMPACTO DA UMIDADE DO BAGAÇO	68
5.	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS	76

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial e do consumo de energia, juntamente com as atuais mudanças climáticas, gera uma preocupação em relação ao abastecimento a partir de fontes energéticas convencionais (não-renováveis), considerando seu impacto destrutivo para o meio ambiente. Segundo dados do BEN - Balanço Energético Nacional (EPE, 2019), a geração de energia elétrica no Brasil em 2018 a partir de fontes não renováveis representou 17,6% do total nacional, contra 20,8% em 2017.

Uma alternativa para esse problema é a geração de energia a partir da biomassa, que engloba toda matéria vegetal e animal produzida para a obtenção de energia. A energia do Sol é armazenada nos vegetais terrestres e aquáticos pelo processo da fotossíntese e, também, nos animais que se alimentam desses vegetais (ABBASI; ABBASI, 2010).

Como o processo de fotossíntese absorve CO₂, a biomassa quando é queimada libera novamente esse gás para a atmosfera, o que gera uma combustão com saldo neutro de emissão de gás carbônico. Dessa forma, a biomassa é uma ótima alternativa para a redução dos impactos causados na atmosfera pelo efeito estufa (SINGH; MAHANTA; BORA, 2017).

Além das vantagens ambientais, a biomassa é de fácil produção com custo atrativo, enquanto combustíveis fósseis não são de fácil exploração resultando em custos elevados. Entre outras vantagens, a biomassa contribui para a diminuição na dependência dos combustíveis fósseis (GARCÍA *et al.*, 2013).

A biomassa pode ser originada de diversas fontes, tais como: culturas agrícolas, madeira, resíduos industriais, excrementos de animais e plantas aquáticas (DEMIRBAS, 2004). Essas matérias-primas podem ser aproveitadas de várias formas, sendo que todas elas se tratam da conversão da biomassa (gaseificação, combustão, pirólise, etc.) em um produto intermediário que em seguida será utilizado na produção de energia, por exemplo, em uma máquina motriz como uma turbina a vapor (BRASIL, 2008).

As biomassas provenientes da cana-de-açúcar têm uma fundamental importância nesse contexto, devido inicialmente à histórica importância do setor canavieiro nas economias paulista e brasileira. Além da notável importância mundial na produção de açúcar e etanol, esse setor vem protagonizando um novo segmento

de crescente ascensão: o energético. Logo, o setor sucroenergético vem se destacando também pelos produtos secundários gerados no processamento da cana-de-açúcar. Esses subprodutos, que até poucas décadas eram na sua maioria descartados, têm se tornado potenciais matérias-primas à cogeração de energia elétrica e à produção de etanol de segunda geração (TROMBETA; FILHO, 2017).

1.1 HISTÓRICO E CONTEXTUALIZAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L) é uma planta fina de formato cilíndrico, folhas grandes e pode alcançar até seis metros de altura. Trata-se de uma cultura semi-perene, o que significa que, após o plantio, ela é cortada e brota várias vezes antes de ser replantada. Seu ciclo produtivo é, em média, de seis anos com cinco cortes (NOVACANA, 2019a, b).

A cana é uma planta semi-perene da família das gramíneas cujas condições climáticas ideais para seu crescimento são: uma estação quente e úmida, que propicia a germinação, o brotamento e o desenvolvimento da planta, e uma estação seca e fria, que promove a maturação dos colmos e o acúmulo de sacarose (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2014).

A cana-de-açúcar é originária do sudeste asiático, onde é cultivada desde tempos remotos. Cruzamentos dessa espécie com outras quatro do mesmo gênero deram origem à diversas variedades com características melhoradas, incluindo resistência às doenças (LEMOS; STRADIOTTO, 2012).

A cana-de-açúcar foi introduzida no Nordeste e no Sudeste brasileiro pelos portugueses no início do século XVI e foi o segundo ciclo econômico durante a colonização. Mesmo após diversas crises e a predominância de outros ciclos econômicos, o cultivo da planta, que era usada principalmente para a produção de açúcar, se expandiu pelo país (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

Com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) em 1933 e depois, em 1975, do Programa Brasileiro do Alcool (PROÁLCOOL), houve grande aumento das áreas plantadas de cana, devido, principalmente, ao incentivo à produção de etanol (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

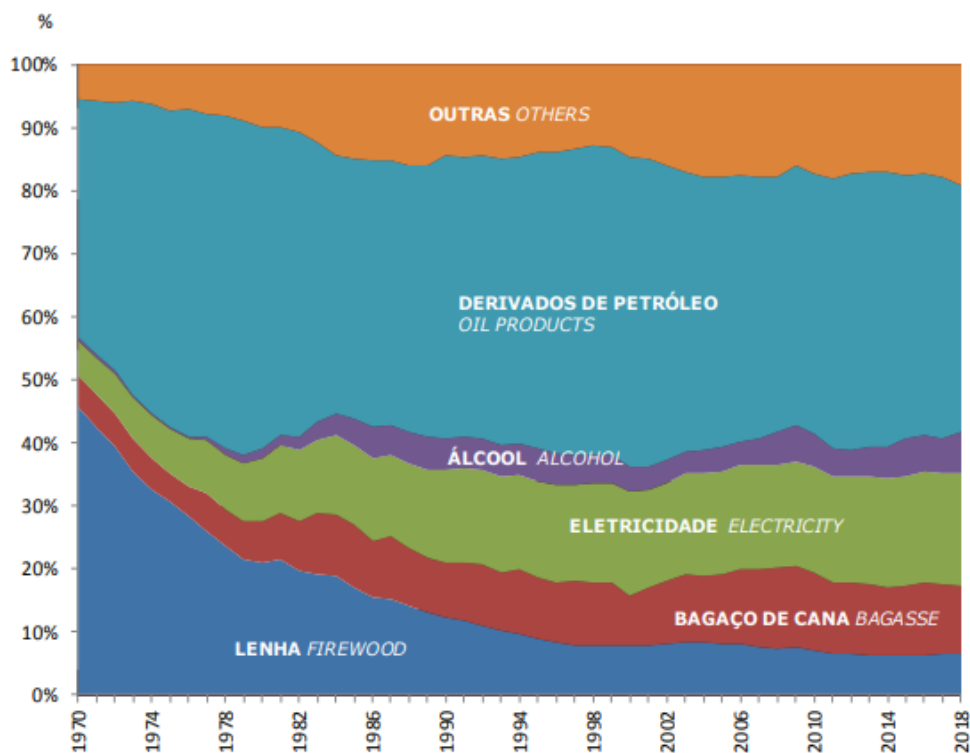
O Brasil é considerado o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com 746,8 milhões de toneladas produzidas em 2018, que representa 39,16% da produção mundial, que no mesmo ano foi de 1,9 bilhões de toneladas (FAO, 2019). De acordo com dados do BEN (EPE, 2019), a produção de cana-de-açúcar no ano de 2018 foi

de 624,5 milhões de toneladas, quantidade 1,7% inferior ao registrado no ano anterior, a produção de açúcar foi de 29,3 milhões de toneladas, enquanto a do etanol foi de 33,198 milhões m³.

Em 2018, 45,3% da oferta interna de energia brasileira foi constituída por energias renováveis, sendo 17,4% por derivados da cana-de-açúcar (EPE, 2019). Sendo assim, a cana-de-açúcar é a segunda principal maior fonte primária para produção de energia no país, ficando atrás somente do petróleo e derivados. Em se tratando do consumo, 10,7% da energia consumida no país foi oriunda do bagaço de cana, enquanto 6,4% foi do etanol.

A Figura 1 representa o consumo de energia final por fonte (EPE, 2019).

Figura 1 - Consumo de energia final por fonte no Brasil



Fonte: EPE (2019).

1.2 A COMPOSIÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR E SEUS RESÍDUOS

A composição da cana depende de diversos fatores, como a idade da cana, a variedade, condições de desenvolvimento, uso de maturadores e sanidade. O teor de fibra dos colmos limpos pode variar de 10 a 18 g / 100 g de cana. O teor de sacarose na cana fornecida da usina varia entre 8 e 17 g / 100 g de cana. Na cana de boa qualidade, fresca e limpa, a pureza do caldo está ao redor de 90%, assim os sólidos

dissolvidos podem variar entre 10 e 19 g /100 g de cana. Depois desses componentes, o que sobra é a água, que geralmente é cerca de 70 g / 100 g de cana (REIN, 2013).

O POL e o BRIX são teores que medem a pureza do caldo extraído da moagem da cana-de-açúcar e teor de sacarose da cana. POL é a porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução e seu valor é determinado pelo desvio provocado pela solução no plano de vibração da luz polarizada. BRIX é a porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução e é determinado em refratômetro digital com correção automática de temperatura (UDOP, 2006).

A Tabela 1 apresenta a composição média típica da cana em diferentes países.

Tabela 1 - Composição média típica da cana (em kg / 100 kg de cana) entregue as usinas em diferentes países

Propriedade	Brasil	Austrália	África do Sul	Colômbia	Filipinas	EUA
POL	14,0	14,6	12,8	13,2	10,0	14,0
BRIX	16,2	16,4	15,0	15,0	12,5	16,0
Pureza aparente (%)	86,0	89,0	85,0	88,0	80,0	85,0
Umidade	70,5	69,3	70,0	70,0	72,5	71,0
Fibra	13,3	14,3	15,0	15,0	15,0	13,0

Fonte: Rein (2013).

A variação na composição de cana durante a safra também depende das condições durante o período de safra. Se os fatores climáticos permanecem relativamente constantes durante a safra, há uma variação mínima na composição da cana na safra. Caso a temperatura se altere significativamente durante a safra, a variação na composição pode ser completamente evidenciada (REIN, 2013).

A colheita da cana-de-açúcar pode ser realizada de duas formas: manualmente (precedida ou não de queimada) ou mecanicamente, por meio de maquinário especial. A colheita manual envolve o uso intensivo de mão de obra e já foi alvo de críticas nacionais e internacionais pelo trabalho extenuante e pelas condições de trabalho precárias e hoje já está quase extinta.

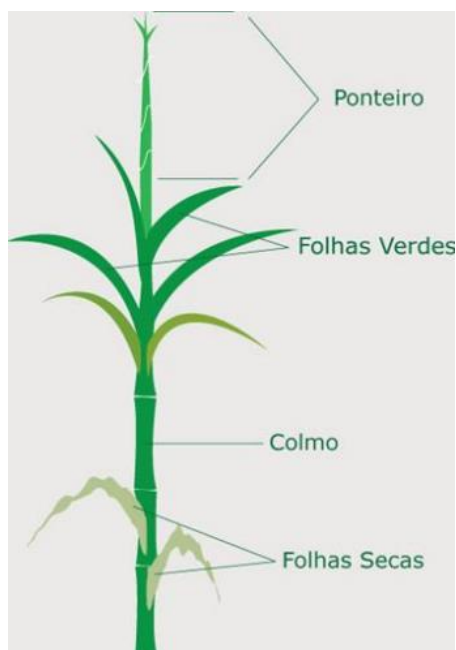
A cana-de-açúcar é um produto agrícola amplamente cultivado no Brasil, sendo sua principal utilização para a produção de açúcar e álcool nas chamadas usinas sucroalcooleiras. Os resíduos dessa produção, como bagaço e o palhiço, podem ser queimados diretamente nas caldeiras e o vapor resultante pode ser utilizado em

diferentes configurações para atender tanto ao processo de produção de açúcar e álcool quanto à produção de energia elétrica.

O uso da biomassa de cana-de-açúcar se destaca, devido à quantidade e à economicidade, afinal sua disponibilidade vem da produção de açúcar e etanol, produtos que tem grande espaço no mercado nacional e internacional (EPE, 2016).

A Figura 2 ilustra uma representação esquemática da parte aérea da cana-de-açúcar.

Figura 2 - Parte aérea da cana-de-açúcar



Fonte: CTC (2005), citado por EPE (2016).

A parte aérea da cana é composta por colmos, folhas e pontas. Os colmos são as estruturas que a planta armazena os açúcares e são caracterizados por nós bem marcados e entrenós distintos. Na extremidade superior do colmo fica o ponteiro, região de formação de novas folhas e que tem pouco teor de açúcares, assim ele é cortado na colheita (EPE, 2016).

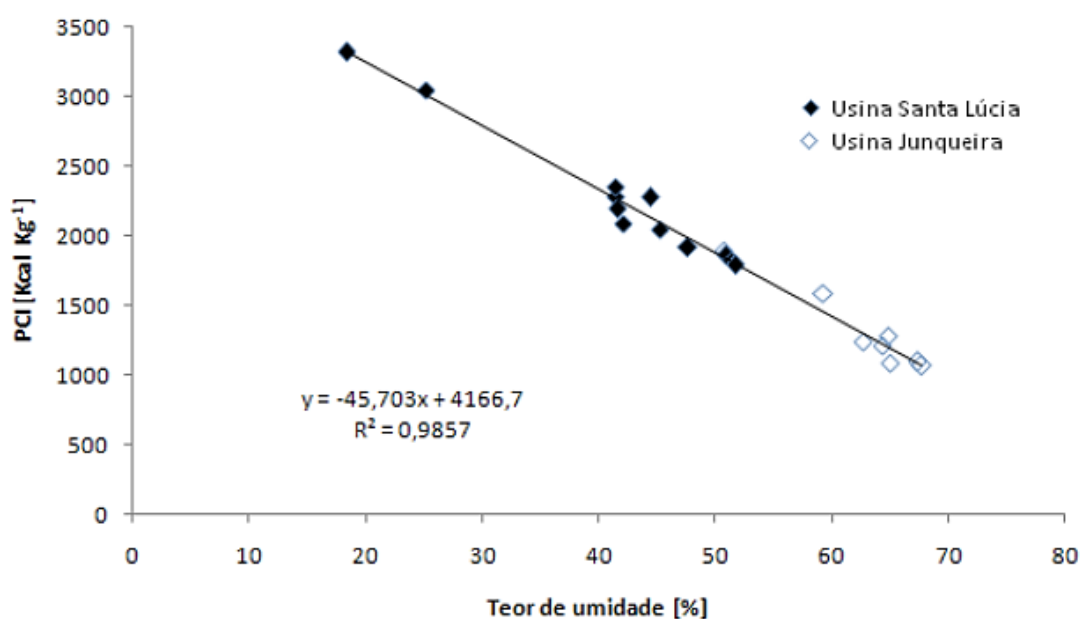
A produção de açúcar e etanol gera dois tipos principais de resíduos, o agrícola e o industrial. O primeiro grupo é composto principalmente de palha de cana, que antes era queimada e agora é picada no processo de colheita. Já na indústria, são gerados cinco tipos principais de resíduos: cinza, bagaço, bolo de filtro, melaço e vinhaça. O bagaço é um dos resíduos de biomassa mais usados na produção de energia no mundo (SILVA *et al.*, 2014).

O bagaço de cana-de-açúcar é um material fibroso que resulta da prensagem da cana para extração do seu caldo. A composição do bagaço varia de 9 a 10% de água, 2 a 2,7% de cinzas, 32 a 35% de celulose, 16 a 25% de hemicelulose, 23 a 32% de lignina, dependendo da variedade da cana e das condições climáticas durante o cultivo (LEMOS; STRADIOTTO, 2012).

O teor de umidade do bagaço é uma característica muito importante, pois, assim como em todas as biomassas, ele é diretamente ligado com o poder calorífico do material. O teor de umidade diminui a quantidade de energia disponível que pode ser usada em sistemas de geração ao promover a diminuição do poder calorífico da biomassa. Além disso, o alto teor de umidade influencia na perda de matéria e no desenvolvimento de esporos micro fúngicos durante a estocagem do material (BRAND *et al.*, 2011).

Oliveira (2010) mostrou que o teor de umidade influencia significativamente no poder calorífico do bagaço. Além disso, com a redução de umidade de 67% para 18% em base úmida, consegue-se um incremento energético da ordem de, aproximadamente, 68%. Isso pode ser verificado pelos dados de duas usinas sucroalcooleiras apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Poder calorífico de amostras de bagaço de cana com diferentes teores de umidade



Fonte: Oliveira (2010).

A palha de cana é basicamente a folha da cana que fica no solo após a colheita mecanizada da cultura. Esta matéria orgânica fornece nutrientes à terra, como potássio, nitrogênio e fósforo, além de servir como uma camada protetora contra erosões. Além disso, a folha da cana ajuda no “sequestro” de carbono, processo em que o gás carbônico absorvido pelas plantas durante a fotossíntese fica “retido” no solo, reduzindo o avanço do efeito estufa. Com a palha, é possível produzir energia elétrica e etanol celulósico, conhecido como “etanol de segunda geração” (NOVACANA, 2019c).

A palha no momento da colheita tem cerca de 50% de umidade, sendo que após uma ou duas semanas no campo pode ser reduzida para cerca de 15%. A quantidade total de palha é de cerca de 155 kg por tonelada de cana-de-açúcar processada, considerando 15% de umidade (EPE, 2016).

O palhiço é um material constituído de palhas, folhas verdes, rebolos e raízes, que ficam sobre a superfície do solo após a colheita mecanizada. Esse material tem alto potencial para produção de energia elétrica, que pode ser obtida pela sua queima em caldeiras ou por meio da gaseificação. A coleta do palhiço pode ser realizada junto com a cana ou após sua secagem natural no campo (aproximadamente 30% de umidade). Por outro lado, o palhiço fornece vantagens ao solo, tais como: manutenção da umidade, aumento da matéria orgânica e controle de emergência de plantas daninhas (AGEITEC, S/D).

A composição física do palhiço é muito parecida com a do bagaço, diferenciando-se em densidade e umidade. A sua utilização como combustível em caldeiras pode ser viável técnica e economicamente desde que seja picado ou desfibrado (para que não obstrua a caldeira) e queimado junto com o bagaço (PEREA; SERAPHIM; BIAGGIONI, 2012).

1.3 USINAS SUCROALCOLEIRAS E PROCESSAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

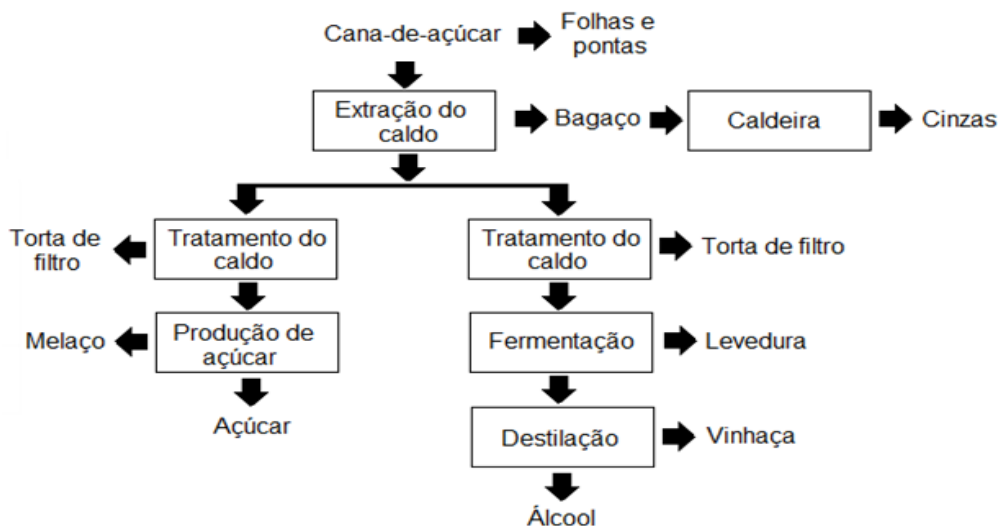
Quando a cana-de-açúcar chega na usina, ela é descarregada na mesa alimentadora ou diretamente em esteiras, que contém um sistema para facilitar a remoção de impurezas. Se as impurezas forem constituídas de pontas e palha, elas podem ser removidas por meio de jatos de ar. Depois de limpa, a cana é transportada e picada em pedaços menores e é esmagada, onde ocorre a separação entre a fibra e o caldo. A extração do caldo ocorre nas moendas ou em difusores (SANTOS, 2017).

Na moagem, a cana passa por um conjunto de 3 ou 4 rolos de esmagamento denominados ternos, sendo que o caldo resultando da cana esmagada no primeiro terno é chamado de primário. O caldo proveniente do segundo terno é chamado de misto. Após passar pelo último terno da moenda, o bagaço segue para as caldeiras com umidade em torno de 50%. No processo de extração do caldo por lixiviação não ocorre esmagamento, mas sim a lixiviação em contracorrente da camada desfibrada com cerca de 13 recirculações de caldo (SANTOS, 2017).

O caldo extraído é limpo e segue para filtração a vácuo, de onde resulta um material sólido e quente chamado torta de filtro, que geralmente é usado como fertilizante depois. Na produção de açúcar, a usina também produz o melaço, usado como matéria-prima na indústria de doce e ração, ou misturado ao caldo limpo para a produção de álcool combustível, sendo produzido nesse processo a vinhaça, resíduo da destilação, que é altamente poluente e é gerado na proporção de 10 a 15 litros por litro de etanol (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005). Os principais usos da vinhaça estão no seu aproveitamento como fertilizante ou na produção de biogás.

A Figura 4 representa um possível esquema de processamento e utilização da cana-de-açúcar e dos seus resíduos pela indústria.

Figura 4 - Rotas de processamento da cana-de-açúcar e seus resíduos



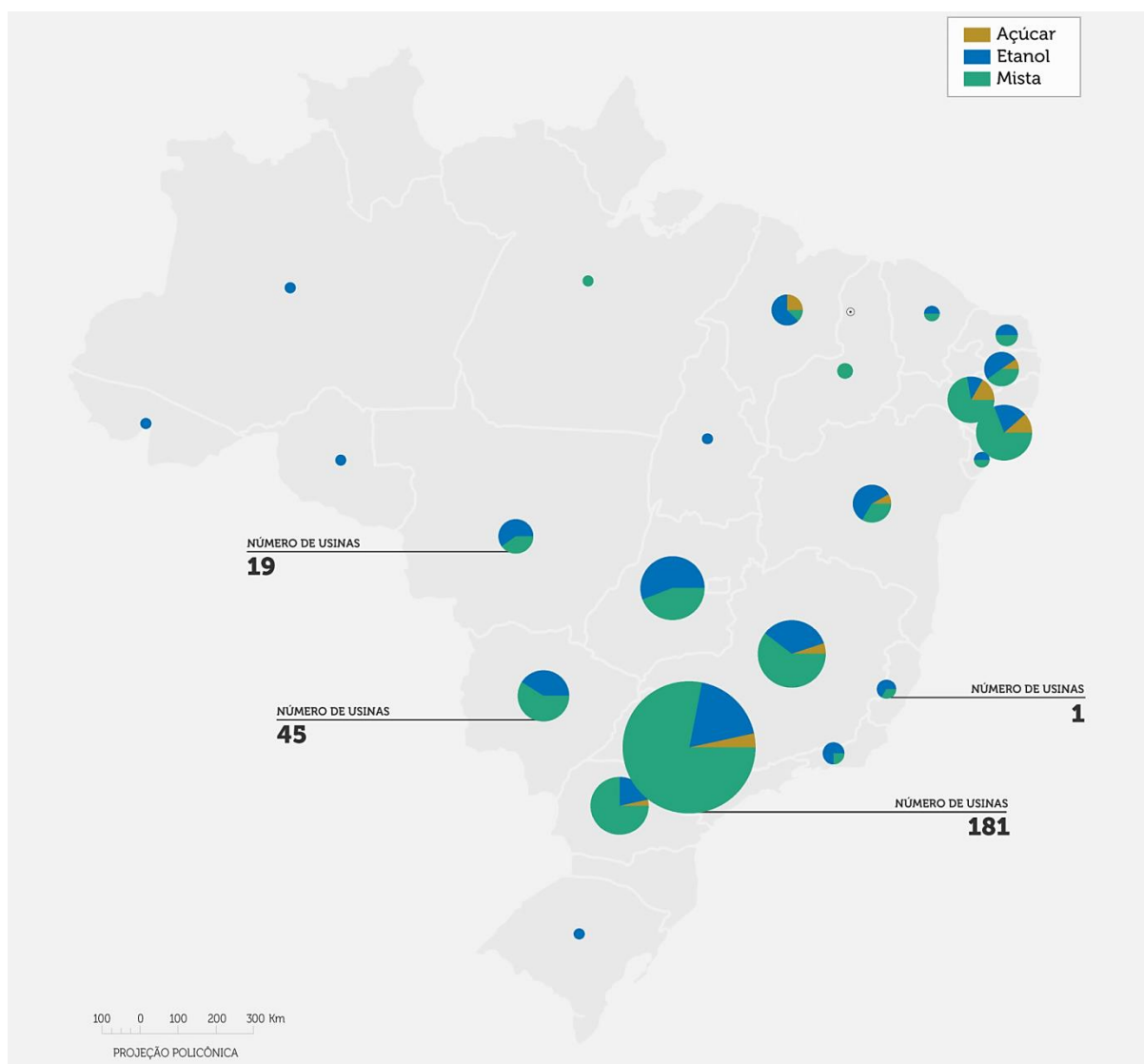
Fonte: Adaptado de Moreira; Goldemberg (1999), citado por Poggiali (2010).

A maior parte das usinas de cana estão concentradas na região centro-sul do Brasil e são responsáveis por 85% da produção total de cana-de-açúcar. Todas essas usinas são autossuficientes em energia, o que significa que, além das suas atividades

principais, eles produzem energia elétrica suficiente para suprir as próprias necessidades, gerando, muitas vezes, excedente para comercialização (HOFSETZ; SILVA, 2012).

O mapa apresentado na Figura 5 ilustra as áreas onde se concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil.

Figura 5 - Mapa das usinas sucroalcooleiras no Brasil



Fonte: NOVACANA (2018).

Nas usinas sucroalcooleiras, o processo produtivo demanda vapor à baixa pressão (normalmente 2,5 bar). Esse vapor é utilizado como fonte de calor em processos como o tratamento e evaporação do caldo, além da destilação do etanol. Nessas usinas, o vapor é necessário, caso não haja eletrificação, para o acionamento das turbinas que fornecem energia mecânica aos picadores, desfibradores, ternos de moenda e bombas. A eletrificação desses sistemas gera um aumento na eficiência de conversão de energia, possibilitando um aumento na energia elétrica excedente (NOVACANA, 2019d).

A geração de eletricidade por meio de ciclos de vapor convencionais representa uma opção comercial atraente para as usinas brasileiras de cana-de-açúcar, contribuindo para a diversificação da matriz elétrica e tem ainda mais importância pois sua safra coincide com o período de estiagem, complementando a geração hidrelétrica nas regiões onde estão instaladas (BRASIL, 2008). Outra opção é a conversão bioquímica de materiais lignocelulósicos em etanol (SEABRA; MACEDO, 2011).

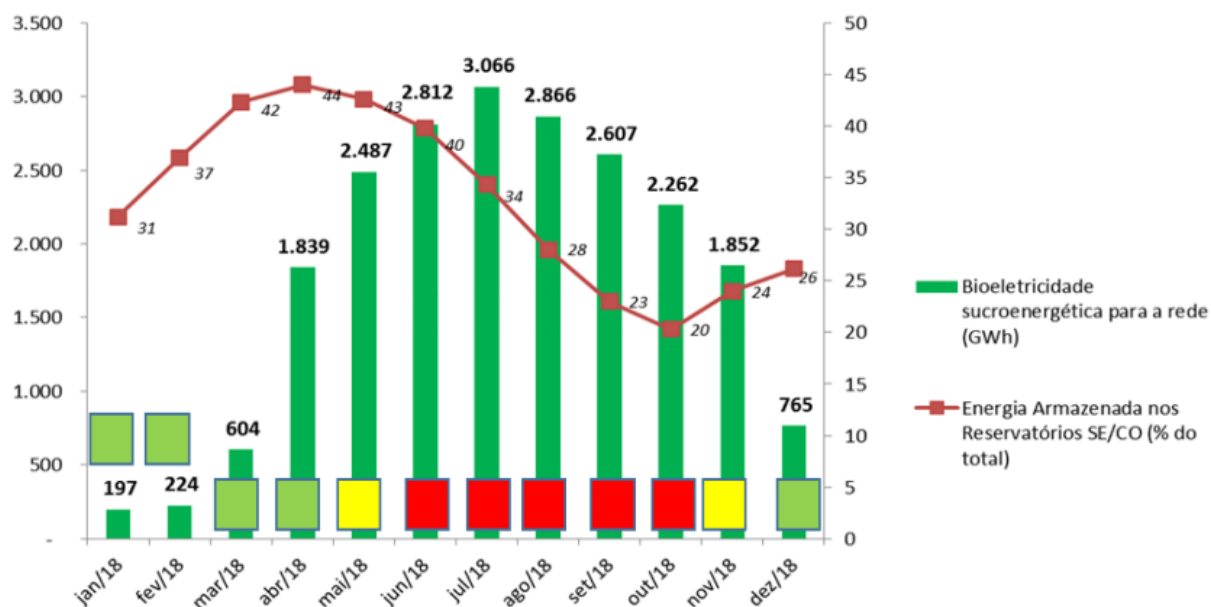
No setor sucroalcooleiro brasileiro, se houvesse o aproveitamento pleno da biomassa presente nos canaviais, a bioeletricidade teria potencial técnico para chegar a 146 mil GWh, o que possibilitaria atender mais de 30% do consumo de energia no Sistema Integrado Nacional (SIN). Porém, apenas 15% desse potencial é utilizado. Em 2018, a bioeletricidade ofertada para a rede pelo setor sucroenergético foi 21.500 GWh, geração suficiente para abastecer 11,4 milhões de residências ao longo do ano (UNICA, 2019).

Além disso, 83% da bioeletricidade sucroenergética ofertada para a rede em 2018 aconteceram nos períodos em que a Bandeira Tarifária na conta de energia dos consumidores esteve na modalidade amarela ou vermelha, conforme mostrado na

Figura . De janeiro a setembro de 2019, a geração de energia a partir do bagaço e da palha da cana-de-açúcar para o Sistema Interligado Nacional (SIN) foi de 16.583 GWh (UNICA, 2019).

As Figuras 6 e 7 apresentam os dados da evolução da geração de eletricidade ofertada para a rede proveniente do setor sucroalcooleiro no Brasil.

Figura 6 - Bioeletricidade sucroenergética (GWh) ofertada para a rede em 2018 e Bandeira Tarifária no mês



Fonte: UNICA (2019).

Figura 7 - Bioeletricidade sucroenergética (GWh) ofertada para a rede entre 2010 e 2018.



Fonte: UNICA (2019).

1.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA

É frequente na maioria das indústrias a utilização de calor em seus processos, geralmente provenientes de combustíveis que geram energia térmica de alta qualidade, cuja temperatura de chama está entre 1.400 e 1.800 °C. Esse calor é utilizado em níveis não muito altos de temperatura, em processos que demandam energia de baixa qualidade (120 a 200 °C), como secagem, cozimento, evaporação, dentre outros (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Dentro desse contexto entra a cogeração, processo que tem como finalidade a produção combinada de calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária. A cogeração de energia possibilita o melhor aproveitamento e menor consumo de fontes de energia, quando comparada à geração individual de calor e energia elétrica, contribuindo, assim, para a racionalidade energética (ANEEL, 2006). A energia elétrica produzida pode ser utilizada para qualquer consumo elétrico requerido pela instalação e, ainda, caso haja excedente, este pode ser vendido.

A cogeração é especialmente vantajosa quando os preços da eletricidade são altos, pois as instalações que realizam a cogeração podem produzir economias de custo significativas. Como os preços dos combustíveis fósseis tendem a subir, a cogeração tende a se tornar cada vez mais vantajosa (ARSHAD; AHMED, 2016).

A cogeração pode ser feita em sistemas de geração de energia a partir da biomassa, gás natural, biogás e energia solar, sendo que, nas últimas décadas, tem atraído muitos investimentos em pesquisa e surgiram muitos fabricantes que oferecem tecnologias competitivas para a composição de sistemas de cogeração, como motores de combustão, caldeiras, turbinas a gás natural, geradores, equipamentos de controle, dentre outros (COGEN, 2019).

Entre as vantagens da cogeração estão a economia de investimentos em transmissão e distribuição de energia, além de sua elevada eficiência energética, quando comparada aos sistemas tradicionais de geração de eletricidade através de termelétricas, como pode ser verificado na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação das eficiências energéticas de sistemas de geração de energia térmica

Ciclo	Otto ou Diesel	Rankine	Brayton	Combinado
Termelétrico	40 a 46%	30 a 45%	35 a 45%	57%
Cogeração	62%	50%	70 a 75%	70 a 75%

Fonte: COGEN (2019).

A cogeração reduz as perdas de energia e permite abastecer as demandas com quase o mesmo consumo de combustível. Uma desvantagem da cogeração está no fato de que essas demandas devem ser locais, afinal vapor e água quente não podem ser levados à longas distâncias para não prejudicar a eficiência global. Além disso, estas utilidades devem ser geradas nas temperaturas requeridas localmente (LORA; NASCIMENTO, 2004).

Em processos de cogeração, a biomassa é queimada diretamente em uma ou mais caldeiras, gerando energia térmica na forma de vapor.

O principal sistema de cogeração é o que emprega turbinas a vapor como máquinas térmicas e que aparece vinculado a três configurações: turbinas de contrapressão, combinação de turbinas de contrapressão com outras de condensação que empregam o fluxo excedente, e turbinas de extração-condensação. Se o objetivo principal é a produção e venda de energia excedente, o uso de turbinas de extração-condensação é mais viável. Isso é devido aos altos índices de desempenho dessas turbinas e o fato da condensação de uma parte do vapor de escape, ou de uma extração de vapor de uma turbina, garantir a necessidade de energia térmica do sistema (LEMOS; STRADIOTTO, 2012).

Nos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão, a energia térmica da biomassa pode ser utilizada tanto no acionamento mecânico dos equipamentos da usina quanto na produção de energia elétrica. Adicionalmente, o vapor resultante desses processos ainda pode ser utilizado para atender às necessidades térmicas do processo de produção de açúcar e álcool (BRASIL, 2008).

Nos ciclos a vapor com turbinas de condensação e extração, o vapor de escape resultante da realização de trabalho pelas turbinas presentes na planta é condensado de forma total ou parcial. A diferença fundamental é a existência de um condensador na exaustão da turbina, o que permite maior flexibilidade da geração termelétrica (BRASIL, 2008).

O sistema que usa turbinas de extração-condensação geralmente possui turbinas de extração dupla, sendo a primeira no nível de pressão em que o vapor é requerido pelas turbinas de acionamento mecânico, e a segunda na pressão em que o vapor é consumido no processo produtivo. Além disso, comumente o vapor de escape das turbinas de acionamento mecânico soma-se ao fluxo da segunda extração, visando o atendimento a demanda de vapor do processo (LEMOS; STRADIOTTO, 2012).

Um dos fatores que causam maior eficiência na geração de energia elétrica em sistemas de cogeração é o aumento dos parâmetros de geração de vapor, como temperatura (limitada a 540°C, por questão do material) e pressão das caldeiras (comumente até 120 bar). O aumento da capacidade de geração de vapor das caldeiras é outro método de aumento da eficiência, sendo que já são comercializadas caldeiras com capacidade de 150 a 250 t/h (41,6 a 69,4 kg/s) e eficiência acima de 85% (NOVACANA, 2019d).

1.5 OTIMIZAÇÃO DE PLANTAS TÉRMICAS E DE POTÊNCIA

Otimização significa obter o melhor resultado possível de acordo com as circunstâncias dadas (RAO, 2009). O objetivo da otimização é sempre a maximização ou minimização de uma função objetivo para um dado processo com respeito a algumas limitações adicionais, ou seja, é a busca pelas melhores condições de operação de um sistema. Para esse objetivo ser atingido, é necessário que o processo tenha ao menos um grau de liberdade, para que alguma variável possa ser ajustada de forma a atingir a função objetivo (SIMTECH, 2003).

O objetivo da otimização geralmente é expresso em forma de uma função e, portanto, seu valor máximo ou mínimo pode ser matematicamente encontrado. Existem diversos métodos disponíveis para resolver problemas de otimização, entre esses métodos estão os Algoritmos Genéticos, *Simulated Annealing*, *Particle Swarm*, Colônia de Formigas, otimização baseada em Metamodelos, Lógica Fuzzy, dentre outros (RAO, 2009).

Os sistemas de engenharia são compostos de diversas variáveis dentro do projeto. Geralmente, algumas quantidades são atribuídas como fixas no início e são chamadas de parâmetros pré-atribuídos. Todas as outras quantidades são tratadas como variáveis no processo e são chamadas de variáveis de projeto ou de decisão. Já as restrições de *design* são os critérios que devem ser atendidos para produzir um

design aceitável e funcional. A função objetivo determina o critério que deve ser satisfeito para que a solução seja a melhor dentre as possíveis, sendo expressa como uma função das variáveis de *design* (RAO, 2009).

1.6 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo à análise numérica do ponto de vista termodinâmico de uma planta de geração de potência de uma usina sucroenergética a partir do *software* IPSEpro®, calculando-se parâmetros como eficiência, energia térmica e potência. Diversos parâmetros operacionais da planta serão submetidos a um processo de otimização, procurando identificar configurações de operação ótimas que maximize a geração de potência, atendendo à demanda de energia térmica.

Ainda com o auxílio do *software* IPSEpro®, que tem como método de solução os algoritmos genéticos, será realizada a otimização das plantas, sendo que parâmetros como fração de fluxo, fluxo de massa, temperaturas e pressões de saída das turbinas serão utilizados como variáveis de decisão e a maximização das gerações de energia elétrica como função objetivo. Além disso, serão avaliadas a maneira que alguns fatores, como *mix* de produção, umidade do bagaço e quantidade de calor de processo requerida pelo processo, influenciam nos parâmetros utilizados na otimização.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir serão citados alguns trabalhos recentes relacionados à otimização de sistemas térmicos e de potência, nem todos diretamente relacionados ao tema da dissertação, mas que de alguma forma trazem alguma contribuição para a mesma.

Cremones (2013) realizou diferentes simulações de operação de uma planta sucroalcooleira produtora de açúcar, etanol e bioenergia. Para tanto, foram consideradas variações na moagem e no *mix* de produção, mantendo-se a potência gerada em cada situação. Adicionalmente, foi considerada o efeito da variação da taxa de condensação na turbina. Para todos os casos foram apresentadas análises termodinâmica, termoeconômica e econômica. Os resultados indicaram que a ampliação da termoelétrica geraria benefícios tanto para a produção de açúcar e etanol, através do aumento da capacidade de moagem, além de proporcionar ganho na comercialização de energia elétrica.

Lacerda (2015) empregou investigações de caráter termodinâmico, termoeconômico e econômico para determinar a viabilidade de alternativas para o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar em uma usina sucroalcooleira instalada e em operação no estado de São Paulo, gerando excessos de eletricidade. Foram analisadas cinco propostas de adequações da planta de cogeração. Os resultados obtidos confirmaram o potencial do palhiço na cogeração de energia, além de obter em alguns casos um custo de eletricidade inferior àquele verificado no momento de estudo. No entanto, através da análise econômica constatou-se que a atual política de preços de venda de eletricidade no mercado não é vantajosa para a viabilização de novos projetos. Foi constatada a falta de incentivos fiscais e subsídios ao setor.

Santos (2017) analisou tecnologias para potencializar a cogeração de energia, a partir da queima da biomassa da cana-de-açúcar com o objetivo de aumentar os ganhos com a venda de excedentes de energia elétrica. Para isso, foram estudadas alternativas como o incremento do uso da palha como combustível, eletrificação dos acionamentos dos equipamentos que operavam com turbinas a vapor de baixa eficiência e alto consumo de vapor, além do efeito do uso de camisas de alta drenagem (rolo Lótus), gerando a redução dos impactos da reabsorção do bagaço. Foram realizadas análises econômicas de Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR) para avaliar a viabilidade econômica dos casos. Os

resultados demonstraram o valor da venda do MWh necessário a para a viabilidade do estudo era no mínimo R\$ 180,00.

Safder *et al.* (2018) propuseram um sistema ideal de cogeração de produção de energia e água doce a partir de um ciclo Rankine, um ciclo orgânico Rankine e um módulo de osmose reversa. Primeiramente foi realizada uma modelagem termodinâmica e econômica do sistema para avaliar o custo total anual e a eficiência térmica. Depois foram realizadas análises exergéticas, termoeconômicas e de termorisco para determinar a destruição exergética, a eficiência exergética, o desempenho termoeconômico e a probabilidade de riscos do sistema. Então, o sistema foi otimizado usando um algoritmo genético multiobjetivo baseado em análises termoeconômicas e de termorisco. A otimização teve como funções objetivo a taxa de custo total e o risco específico total do sistema. A flexibilidade do sistema ótimo foi investigada com relação às incertezas do mercado de energia e às propriedades termoquímicas dos fluidos orgânicos e, por fim, foi realizada uma análise de incertezas do sistema. Os resultados da otimização mostraram que o impacto total do risco acidental e a taxa de custo total do produto melhoraram de 2,49 a 48,73% e de 5,67 a 62,41%, respectivamente, dependendo do fluido orgânico empregado. O sistema foi avaliado como uma planta de cogeração de baixo risco e perda, com alta flexibilidade em relação às condições ambientais e restrições locais.

Wang; Wu; He (2019) propuseram um novo sistema doméstico de energia e calor com base em um ciclo Rankine orgânico movido a biomassa. O objetivo era obter maior produção de energia elétrica e maior eficiência energética a partir da introdução de uma estrutura única de dupla pressão. Os desempenhos termodinâmicos e econômicos do sistema foram avaliados a partir um modelo matemático. Além disso, um algoritmo de otimização flexível foi desenvolvido para buscar a melhor condição operacional do sistema, com base no método do ponto de equilíbrio. Os resultados da otimização, realizados a partir do *software* Matlab, mostraram que o sistema proposto com R141b como fluido de trabalho poderia fornecer a energia elétrica líquida de 1,66 kW e a energia térmica de 37,16 kW simultaneamente, e a eficiência térmica *versus* a taxa de custo de capital foi de 77,70% e 0,336 US\$/h, respectivamente.

Fonseca *et al.* (2017) estudaram um cenário em que uma parte do bagaço disponível é usada para a produção de etanol celulósico, enquanto o restante do bagaço e da palha da cana-de-açúcar pode ser usado como combustível na geração de vapor para um Ciclo Combinado Rankine ou ser alimentado ao Ciclo Combinado

de Gaseificação Integrada à Biomassa. O objetivo foi encontrar a fração ideal de biomassa a ser convertida em etanol celulósico e qual dos ciclos combinados é mais econômico, considerando os custos operacionais e de investimento. Foi realizada uma avaliação econômica que estima o Valor Presente Líquido (VPL) da planta por um período de 25 anos. O problema de otimização consistiu em maximizar o VPL dos ganhos devido à produção de etanol celulósico e geração de energia, variando a fração de biomassa usada para cada extremidade e variando a chave de variável binária, que alterna o subprocesso de geração de energia entre os dois ciclos (Rankine e de gaseificação). Foi utilizado um algoritmo de otimização de enxame de partículas. Através da otimização superestrutural, foi determinada que a fração ideal de biomassa que deveria ser hidrolisada é de 15,02% e que o método de produção de eletricidade mais rentável a longo prazo é o ciclo combinado de gaseificação.

Costa *et al.* (2016) estudaram casos de otimização multiobjetivo não-lineares em uma biorrefinaria de cana-de-açúcar que produz bioetanol (primeira e segunda geração), bioeletricidade e concentra a vinhaça em evaporadores de efeito múltiplo. As otimizações foram realizadas no *software* EMSO (*Environment for Modeling, Simulation and Optimization*) acoplado ao algoritmo MOPSO (algoritmo de otimização multiobjetivo de enxame de partículas). Foram definidos e estudados cinco diferentes problemas de otimização com diferentes aspectos ambientais e levando a diferentes rendimentos. As variáveis de decisão foram a fração de bagaço desviada para a produção de etanol de segunda geração e a fração de vinhaça que é concentrada no evaporador de efeitos múltiplos. Em geral, os fluxos de vinhaça concentrada são mais altos quando a maximização da produção de bioetanol é imposta como um dos objetivos. A fração de bagaço desviada para a produção de etanol de segunda geração não pode assumir valores superiores a 0,5, pois as demandas térmicas do processo integrado e a fração de vinhaça que está concentrada até 7,0° Bx (valor BRIX) no evaporador de efeito múltiplo não poder assumir valores inferiores a 0,15, devido a demandas de processo para vapor vegetal.

Albarelli *et al.* (2015) avaliaram economicamente uma biorrefinaria de cana-de-açúcar termicamente integrada que produz etanol a partir do caldo de cana e metanol a partir da gaseificação de bagaço no mesmo local industrial. A biorrefinaria foi analisada e foram comparadas duas tecnologias de gaseificação denominadas fluxo arrastado e leito fluidizado circulante por meio de métodos de modelagem de fluxograma a partir de um *software* de modelagem e a integração do processo foi

realizada através da análise *Pinch* usando programação linear inteira mista. Além disso, foi realizada uma análise termoeconômica para analisar a eficiência energética, bem como o impacto econômico do processo integrado no processo tradicional de produção de etanol e uma otimização multiobjetiva baseada em um algoritmo genético, permitindo a análise de várias configurações de processos para objetivos conflitantes: eficiência energética e custo de investimento. Os resultados mostram que a eficiência energética da biorrefinaria aumenta significativamente com a integração de uma planta de produção de metanol em uma destilaria de etanol convencional. A análise de custos mostra que o custo calculado de produção de metanol é 30% superior ao preço atual de mercado. Comparado a quando o bagaço é utilizado na produção de eletricidade, a maior produção de biocombustível leva a maiores eficiências, mas ao mesmo tempo resulta em custos de investimento mais altos e tecnologias mais complexas.

Morakabatchiankar *et al.* (2017) propuseram um modelo sistemático de otimização estratégica multiobjetivo para uma tomada de decisão mais sustentável e robusta para superestruturas de cadeias de suprimentos de cana-de-açúcar em larga escala. O modelo proposto explora técnicas de programação matemática como metodologia de otimização. A geração de eletricidade deve satisfazer os requisitos de energia das usinas de açúcar e a rede pública. O aspecto ambiental e o desempenho econômico foram escolhidos como função objetivo. As variáveis de decisão são a configuração da rede de produção e cogeração de eletricidade e as decisões táticas associadas que maximizam o VPL e minimizam o impacto ambiental. Os resultados indicam que quando há a cogeração de eletricidade, há menos impacto ambiental. A cogeração também resulta em reduções de 4,5% nas emissões de CO₂ e aumento de 20% no VPL quando comparado a um caso sem cogeração.

Pellegrini; Oliveira Junior (2011) realizaram uma otimização exergética de sistemas de cogeração em usinas de cana-de-açúcar por meio do desenvolvimento de um modelo geral para os processos de produção de açúcar e etanol com base nos dados fornecidos por uma planta real. Depois de uma análise exergética, foi feita uma discussão sobre as variáveis que mais afetam o desempenho dos processos e apresentado um procedimento para avaliar modificações no sistema de cogeração e no processo e seu impacto nos custos de produção de açúcar, etanol e eletricidade. Além de adicionar uma nova receita à usina, a geração de excesso de eletricidade melhora o desempenho exergoambiental da usina como um todo. Os sistemas

convencionais de cogeração são capazes de gerar até 80 kWh por tonelada de cana de excesso de eletricidade, dependendo do consumo de vapor nos processos. Além disso, sistemas avançados de cogeração permitem até 200 kWh por tonelada de cana, o que representa um potencial de 111 TWh/ano de geração. Por fim, demonstrou-se que a minimização da geração de entropia nos processos de conversão de energia permite um melhor desempenho termo-econômico-ambiental da usina, principalmente quando a operação de cogeração é mais eficiente.

3. METODOLOGIA

Serão modeladas e otimizadas diversas situações de uma planta de potência a vapor de uma usina que tem como produção principal o açúcar e o álcool, e, como subproduto, energia elétrica. Para tanto, serão utilizados dados de condições de operação de uma usina sucroalcooleira do noroeste paulista. Em todas as situações, a matéria-prima para a produção de vapor é o bagaço de cana-de-açúcar.

3.1 ANÁLISE TERMODINÂMICA

A análise visa determinar a eficiência, a geração de energia térmica e potência dos principais equipamentos existentes nas plantas de vapor apresentadas, como caldeiras, turbinas e condensadores. Também é avaliado o aproveitamento global de energia de cada uma das plantas.

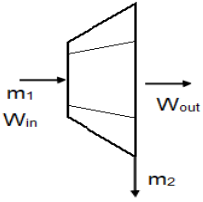
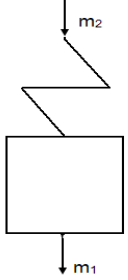
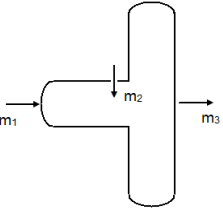
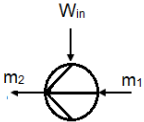
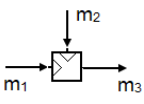
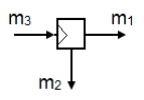
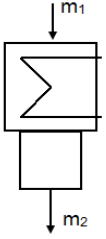
Os cálculos são baseados, entre outras equações, a partir da Primeira Lei da Termodinâmica para volumes de controle, que é apresentada pela Equação 1.

$$\frac{dE}{dt} = Q - W + \sum_1 \dot{m}_1 h_1 - \sum_2 \dot{m}_2 h_2 \quad (1)$$

Onde: E representa a energia total, Q o calor trocado com o meio ambiente e W o trabalho realizado, e os subscritos 1 e 2 representam, respectivamente, as entradas e as saídas. Além disso, os sistemas são considerados como operando em regime permanente ($\frac{dE}{dt} = 0$).

A Tabela 3 apresenta os balanços de massa e de energia baseados na Primeira Lei da Termodinâmica para os componentes presentes na planta de potência, sendo que os subscritos 1, 2 e 3 podem representar entrada ou saída, dependendo do componente.

Tabela 3 - Balanços de massa e energia para os diversos componentes da planta

Componente	Figura Esquemática	Balanço de massa	Balanço de energia
Turbina		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$m_1(h_1 - h_2) \cdot \eta_m + W_{in} - W_{out} = 0$
Caldeira		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$m_2(h_1 - h_2) + \eta_b \cdot Q_{in} = 0$
Desaerador		$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$h_1 \cdot m_1 + h_2 \cdot m_2 = h_3 \cdot m_3$
Bomba		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$\frac{m_1(h_1 - h_2)}{\eta_m} + W_{in} = 0$
Misturador		$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$h_1 \cdot m_1 + h_2 \cdot m_2 = h_3 \cdot m_3$
Separador		$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$h_1 \cdot m_1 + h_2 \cdot m_2 = h_3 \cdot m_3$
Condensador (Processo)		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$	$h_1 \cdot m_1 - h_2 \cdot m_2 = Q_{transf}$

Fonte: Adaptado de SIMTECH (2003).

Na Tabela 3 η_b e η_m representam a eficiência isentrópica e a eficiência mecânica dos componentes, respectivamente. Adicionalmente, Q_{in} e Q_{transf} representam, respectivamente, o calor de entrada na caldeira e o calor transferido para o processo, em kW.

3.2 OTIMIZAÇÃO NUMÉRICA

A planta de potência estudada foi submetida ao método de otimização Algoritmo Genético, já implementado no *software* IPSEpro®, afim de maximizar a geração de energia nas duas turbinas.

As variáveis operacionais que serão submetidas à otimização são: a fração de fluxo no superaquecedor, os fluxos de massa na entrada e na segunda extração da turbina de 32 MW, as temperaturas de extração da turbina de 32 MW e de saída da turbina de 15 MW, além da temperatura e pressão de saída na condensação da turbina de 32 MW. Detalhes a respeito dessas variáveis serão discutidos posteriormente.

Para um aprimoramento ainda maior na planta existente, também poderão ser propostas mudanças físicas na planta como a adição ou remoção de equipamentos, assim como outras alterações operacionais.

3.2.1 Método de otimização utilizado: Algoritmos Genéticos

Uma das abordagens existentes para obter a otimização de um problema é a abordagem dos algoritmos genéticos.

Os algoritmos genéticos são algoritmos baseados nos princípios da genética natural e seleção natural. Eles são adequados para resolver problemas caracterizados por variáveis discretas contínuas, e espaços de *design* descontínuos e não-convexos (RAO, 2009). O processo de otimização desse algoritmo consiste na evolução de uma população inicial (número de indivíduos). Os indivíduos dessa população são modificados ao passar por três processos ou parâmetros evolutivos conhecidos como: seleção, cruzamento e mutação. Em seguida, uma nova população é gerada a partir desses novos indivíduos e esse processo se repete até que a função objetivo seja atingida. Assim como na natureza, o princípio utilizado para resolver o problema é o de que o mais apto permanecerá para a formação das futuras populações (THÉVENIN, JANIGA, 2008).

Na metodologia Algoritmos Genéticos as variáveis de *design* são representadas por cordas de variáveis binárias (cadeia de bits) que correspondem aos cromossomos em genética natural. O valor da função objetivo (melhor resultado) correspondente a um vetor *design* representa o papel da adequação ou aptidão na genética natural (RAO, 2009).

Na seleção, os cromossomos ou *bits* são selecionados para reprodução. Quanto melhor ou mais apto for o cromossomo, mais provável que ele seja selecionado para reproduzir. O cruzamento cria dois novos elementos a partir de uma combinação desses indivíduos selecionando aleatoriamente um local do primeiro e trocando as subsequências antes e depois desse local por partes do outro (MITCHELL, 1996).

Já o princípio de mutação consiste na substituição de um dos membros da população por outro indivíduo aleatório escolhido na vizinhança ou da troca de alguns dos bits em um cromossomo. Sempre os melhores indivíduos da geração permanecem na população, sendo aplicado, assim, um princípio de elitismo (THÉVENIN; JANIGA, 2008).

Segundo MITCHELL (1996), o processo pode ser resumido pelos passos a seguir:

1. Começa com uma população de n *l-bit* gerada aleatoriamente (soluções candidatas do problema).
2. Calcula a aptidão de cada cromossomo x na população.
3. Repete os seguintes passos até um novo indivíduo ser criado:
 - a) Seleciona um par de cromossomos da população em que a probabilidade da seleção é uma crescente função da aptidão de cada indivíduo.
 - b) O par sofre cruzamento com uma taxa de cruzamento (probabilidade que dois pares vão cruzar em um mesmo ponto) para formar dois novos indivíduos. Se o cruzamento não ocorrer, os novos indivíduos formados serão cópias exatas de seus pais.
 - c) Mutação dos dois indivíduos com uma taxa de mutação e substituição dos indivíduos resultantes na nova população. Se algum indivíduo for muito estranho ou destoante, ele pode ser descartado.
4. Substitui a população atual pela nova população.
5. Volta ao passo 2.

Apesar de aleatório, a metodologia Algoritmos Genéticos não consiste em simples técnicas de buscas aleatórias. Eles exploram eficientemente novas combinações com o conhecimento disponível para encontrar uma nova geração com melhor adequação ou valor de função objetivo (RAO, 2009).

Cada iteração do processo de otimização é chamada de geração. O algoritmo para ao executar o número de gerações escolhido. No final de uma execução do algoritmo, geralmente há uma ou mais soluções altamente adequadas na população. Como a aleatoriedade desempenha um papel importante em cada execução, é necessária uma avaliação da função e dos resultados obtidos, avaliando se o número de gerações foi suficiente para encontrar a melhor solução possível (MITCHELL, 1996).

A solução ótima encontrada pela metodologia só é melhor em comparação a outras soluções conhecidas. Um algoritmo não tem na verdade um conceito de solução ótima, ou nenhuma maneira de testar se a solução é ótima. Isso também implica que um algoritmo genético nunca sabe com certeza quando parar, além do período de tempo, ou do número de gerações que você deseja que ele explore. O algoritmo fornece a melhor solução encontrada até aquele momento. No entanto, com parâmetros otimizadores razoáveis, esta solução deve ser muito próxima da ideal (SIMTECH, 2003).

3.2.2 Declaração de um problema de otimização

Segundo Rao (2009), uma otimização ou uma programação matemática pode ser declarada como a maximização ou minimização de uma função $f(X)$, por meio da definição de um parâmetro ótimo X :

$$\text{Encontre } X = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix}, \text{ na qual minimiza } f(X) \quad (2)$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$g_j(X) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$l_j(X) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

Onde X é um vetor n -dimensional chamado vetor projeto, $f(X)$ é a chamada função objetivo, e $g_j(X)$ e $l_j(X)$ são conhecidas como inequação e equação restrição, respectivamente. Além disso, n é o número de variáveis e m e p o número de restrições do problema de otimização. Alguns problemas não envolvem nenhuma restrição e são chamados de problemas de otimização sem restrições.

3.3 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE UTILIZADO: IPSEpro®

Tanto as análises numéricas do ponto de vista termodinâmico quanto as otimizações foram feitas com o auxílio do *software* IPSEpro®. Ele possui uma linguagem de programação visual, que modela e analisa processos em engenharia de energia, química e outras áreas. É possível analisar componentes isolados, partes de processos e plantas completas. Ele é um ambiente que resolve problemas que podem ser representados por uma rede de componentes discretos e suas conexões.

O IPSEpro®, desenvolvido pela empresa austríaca *Sim Technology* (SIMTECH, 2003), apresenta estrutura para a composição de plantas através da escolha de componentes (turbinas, condensadores, caldeiras) que estão disponíveis em uma biblioteca. Estes componentes (ícones) selecionados são arrastados para uma área específica do projeto na tela onde são interligados. Os fornecimentos dos dados para o processamento da análise são inseridos diretamente nos equipamentos dispostos na planilha, e os resultados são apresentados na própria configuração formulada (PASSOLONGO, 2011).

Os componentes podem ser criados ou ter suas características modificadas com total liberdade pelo usuário, permitindo, assim, a criação de modelos que atendem exatamente as especificações do projeto. O IPSEpro® fornece uma eficiente gestão de dados e usa algoritmos robustos para obter resultados em um curto espaço de tempo.



















O comportamento de cada componente pode ser formulado matematicamente com um conjunto de equações e variáveis. O modelo matemático de um processo significa unir todas essas equações dos componentes em um único sistema de equações.

3.3.1 Biblioteca APP

A biblioteca APP (*Advanced Power Plant*) foi projetada para a modelagem de uma grande faixa de sistemas térmicos de potência. A biblioteca contém modelos que permitem projetar e analisar plantas de potência como plantas de potência convencionais, plantas de cogeração e plantas de ciclo combinado. Alguns componentes presentes nesta biblioteca são: caldeira, câmara de combustão, compressor, condensador, desaerador, turbina, gerador, misturador, motor, bomba e válvula, dentre outros (PASSOLONGO, 2011).

Na Figura 8 são apresentados alguns dos equipamentos contidos na biblioteca APP.

Figura 8 - Equipamentos da biblioteca APP

	Fonte		Turbina
	Sorvedouro		Compressor
	Misturador		Bomba
	Bifurcação		Gerador
	Conector		Motor elétrico
	Condensador		Indicador de título
	Trocador de calor		Injetor
	Desaerador		Câmara de Combustão
	Caldeira		Fonte de combustível
	Tubulão		Motor de combustão interna
	Válvula		Turbina a gás

Fonte: Passolongo (2011).

3.3.2. Módulos auxiliares do IPSEpro®

O programa conta com diversos módulos auxiliares, os quais são citados a seguir (SIMTECH, 2003):

- PSE (Process Simulation Environment): Ambiente principal em que as equações do sistema são resolvidas. As variáveis são agrupadas de forma a minimizar o tamanho do grupo e o número de equações, de modo que depois possam ser calculados um após o outro. Para resolver um sistema, o PSE determina o método de solução ideal para o sistema de equações e analisa a ordem em que pode tratar as variáveis de cada grupo, escolhendo o método numérico ideal para cada grupo.
- MDK (Model Development Kit): Ambiente de programação que oferece todos os recursos necessários para definir e criar novos modelos de componentes e convertê-los em um formato que possa ser usado pelo PSE dentro do IPSEpro®.
- PSOptimize: Módulo que permite ao usuário especificar e rodar cálculos de otimização para encontrar os melhores parâmetros operacionais de acordo com o critério estabelecido. O PSOptimize é integrado com o PSE e permite a otimização de qualquer processo feito a partir deste último. O programa usa a abordagem de algoritmos genéticos ou evolucionários. Para realizar o processo de otimização é necessário primeiramente especificar o objetivo da otimização e depois selecionar algumas variáveis que podem ser alteradas de modo a minimizar ou maximizar o objetivo. Também é necessário definir a área em que a solução se encontra, definindo limites para certas variáveis.
- PSEconomy: Módulo utilizado para analisar economicamente os sistemas simulados. Ele implementa uma análise dinâmica dos custos de investimento e possui recursos abrangentes para analisar o desempenho econômico ao longo da vida útil dos sistemas.

3.3.3 Método de Solução do PSE

Os métodos de solução dos sistemas de equações não lineares são baseados na iteração de um valor inicial. O PSE evita resolver o sistema de equações diretamente. Nesta abordagem, as variáveis são agrupadas, de modo que os grupos

possam ser calculados um após o outro. As variáveis de cada grupo são escolhidas de tal forma que o tamanho do grupo e o número de equações é minimizado.

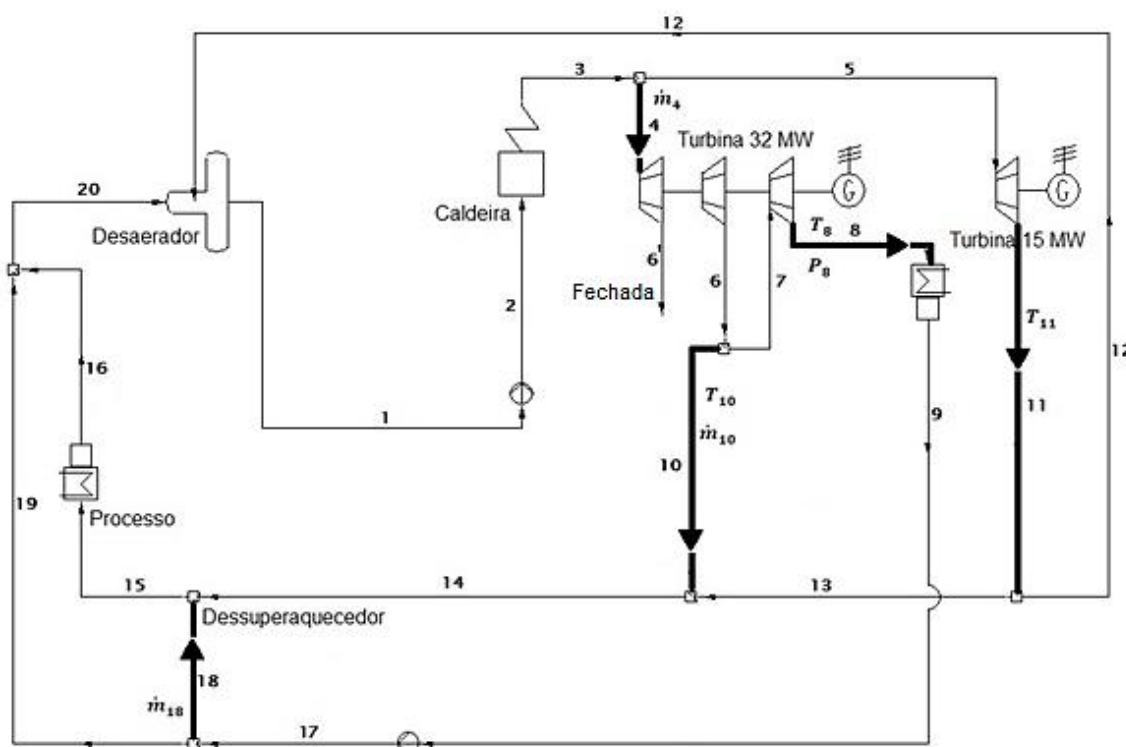
Para resolver um sistema, o PSE adota uma abordagem de duas fases, em que primeiro é determinado o método de solução ideal para o sistema de equações. O PSE analisa a ordem em que pode tratar as variáveis de um modelo e as combina em grupos. Também é escolhido o método numérico ideal para cada grupo.

Em seguida, para calcular a solução numérica do sistema, o PSE resolve as equações na ordem pré-estabelecida pela análise e usa os métodos numéricos que também foram escolhidos. Durante a solução numérica, as variáveis do sistema são iteradas até a mudança relativa em cada variável ser menor que um certo erro ou a diferença entre o lado direito e o esquerdo de cada equação, também chamado de função residual, ser menor que um outro certo erro.

3.4 DESCRIÇÃO DA PLANTA

A Figura 9 apresenta uma configuração de planta de potência para a geração, distribuição e consumo de vapor de uma usina sucroalcooleira, utilizada em todas as análises.

Figura 9 - Planta de cogeração de uma usina sucroalcooleira



Fonte: Própria autora.

Nessa planta de potência, todo o vapor produzido na caldeira é distribuído entre o turbo gerador de extração-condensação de 32 MW e um turbo gerador de contrapressão de 15 MW para a produção adicional de energia elétrica. O turbo gerador de 32 MW tem três opções de saída de vapor e opera segundo as condições apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados operacionais do turbo gerador de 32 MW

Posições	Vazão mássica (kg/s)		Pressão (bar)		Temperatura (°C)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Entrada (Ponto 4)	-	38,88	-	66,00	-	530
Extração 1 (Ponto 6')	0	10	26,50	30,20	425,0	438,0
Extração 2 (Ponto 6)	17,77	33,33	2,45	2,45	134,5	147,2
Condensador (Ponto 8)	2,22	11,11	0,055	0,115	34,6	48,6

Fonte: Adaptado de Fiomari (2004).

Nessa configuração, a primeira extração encontra-se fechada, enquanto a pressão e temperatura da segunda extração são 2,45 bar e 159,7°C. O vapor extraído na segunda extração do turbo gerador e o vapor de escape na turbina de contrapressão, ambos à pressão de 2,45 bar e temperatura de 159,7°C, seguem para o dessuperaquecedor (representado entre os pontos 14 e 15), onde recebem uma injeção controlada de água, de modo que a temperatura permaneça em aproximadamente 135°C. Posteriormente, o vapor que sai do dessuperaquecedor é utilizado no processo de evaporação do caldo, processo representado por um condensador (localizado entre os pontos 15 e 16). Durante o processo, o vapor é condensado e a água é bombeada para o desaerador. Em seguida, a água é bombeada novamente para a caldeira e o ciclo recomeça. Ainda nesta configuração inicial, a caldeira tem um fluxo de massa de vapor de 46,15 kg/s.

3.5 DADOS DE ENTRADA E SAÍDA DO SOFTWARE

A Tabela 5 apresenta as variáveis de entrada inseridas no *software* para as simulações realizadas nesse trabalho. As variáveis representadas com a letra S são variáveis de saída do *software* IPSEpro®.

Tabela 5 - Variáveis de entrada das simulações numéricas

Ponto	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)
1	S	S	S
2	78,60	S	S
3	68,60	530,00	46,15
4	S	S	34,72
5	S	S	S
6	2,45	159,70	S
7	2,45	159,70	S
8	0,070	39,60	S
9	S	S	S
10	S	S	26,97
11	2,45	159,70	S
12	S	S	S
13	S	S	S
14	S	S	S
15	S	S	S
16	S	S	S
17	2,45	S	S
18	S	S	0,72
19	S	S	S
20	S	S	S

Fonte: Própria autora.

Os dados de entalpia, entropia e volume específico são dados de saída para todos os pontos. Nas turbinas e bombas, as eficiências mecânicas e isentrópicas também são dados de entrada, assim como a eficiência da caldeira. No desaerador as quedas de pressão foram consideradas nulas.

3.6 CASOS A SEREM OTIMIZADOS

Serão estudados cinco casos de otimização a partir da planta inicial apresentada na Figura 9 e considerando os efeitos de algumas alterações nos parâmetros operacionais da usina, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Casos a serem otimizados

Otimização	Descrição
1	Caso Inicial
2	Mix de produção
3	Mix de produção com alteração na massa total do sistema
4	Efeito da diminuição do calor de processo
5	Impacto da umidade do bagaço

Fonte: Própria autora.

A função objetivo para as simulações foi definida como a soma das gerações de energia elétrica das duas turbinas presentes na planta. As variáveis de decisão utilizadas e suas faixas são apresentadas na Tabela 7. Os dados foram baseados nas condições reais de operação de uma usina do noroeste paulista e as informações contidas na carta da turbina de extração-condensação. Esses pontos também podem ser verificados na Figura .

Tabela 7 - Parâmetros utilizados durante as otimizações

Variável de decisão	Faixa
Fração de massa do condensador ao dessuperaquecedor (\dot{m}_{18})	0 - 100%
Fluxo de massa extraído da turbina 32 MW (\dot{m}_{10})	17 - 35 kg/s
Fluxo de entrada na turbina 32 MW (\dot{m}_4)	0 - 38,88 kg/s
Temperatura de extração da turbina 32 MW (T_{10})	134,5 - 200°C
Temperatura de saída da turbina 15 MW (T_{11})	126,0 - 200°C
Pressão de saída na condensação (P_8)	0,055 - 0,115 bar
Temperatura de saída na condensação (T_8)	34,60 - 48,60°C

Fonte: Própria autora.

A seguir serão detalhados cada um dos casos a serem estudados.

3.6.1 Otimização 1: Planta Inicial

Primeiramente, a planta inicial (Figura 9) é otimizada com a função objetivo de maximizar a geração de energia das duas turbinas.

3.6.2 Otimização 2: *Mix* de produção

O *mix* de produção representa a porcentagem de ATR (Açúcar Total Recuperável) total disponível que será transformado em açúcar ou em etanol. Se o *mix* de produção é de 40%, então 40% do ART será convertido em açúcar e o restante será utilizado para a produção de etanol.

Para as simulações, são utilizadas 5 condições de produção em que o *mix* entre açúcar/etanol da usina varia entre 40, 50, 60, 70 e 80%. Quanto maior a produção de açúcar, maior a quantidade de vapor requerido no processo de produção que deve ser atendido pela planta de potência. A temperatura do processo foi restringida para atingir no mínimo 135°C, temperatura essa que é a comumente utilizada em processos de usinas sucroalcooleiras. Em todas as simulações, as eficiências das turbinas de 32 e 15 MW foram limitadas a 88 e 86%, respectivamente, atendendo ao máximo especificado pelos fabricantes.

A

Tabela 8 apresenta os dados para as simulações, retirados do estudo feito por Cremonez (2013) com base em dados reais de operação de uma usina localizada no noroeste paulista, referente à quantidade de vapor necessária para atender o processo de acordo com o *mix* de produção aplicado.

Tabela 8 - Vapor de processo de acordo com o *mix* de produção

Mix de Produção (%)	Quantidade de vapor requerida (kg/s)
40	33,9
50	36,2
60	38,9
70	41,2
80	43,8

Fonte: Adaptado de Cremonez (2013).

3.6.3 Otimização 3: *Mix* de produção com alteração na massa total do sistema

Para não ocorrer diminuições significativas na produção de energia elétrica total devido ao aumento de vapor utilizado no processo, uma alternativa avaliada é o aumento da quantidade de bagaço queimado na caldeira, visto que geralmente há excedente que não é totalmente consumido pela usina. Dessa maneira, nesta análise,

o fluxo de massa total do sistema foi aumentado para o valor correspondente ao aumento da demanda de vapor de processo em todos os casos de *mix* de produção. A Tabela 9 apresenta a quantidade de vapor requerida pelo processo e o fluxo de massa total de vapor do sistema em cada configuração.

Tabela 9 - Vapor de processo e fluxo de massa total do sistema de acordo com o *mix* de produção

Mix de Produção (%)	Quantidade de vapor requerida (kg/s)	Fluxo de massa total do sistema (kg/s)
40	33,9	58,3
50	36,2	60,6
60	38,9	63,4
70	41,2	65,7
80	43,8	68,3

Fonte: Própria autora.

3.6.4 Otimização 4: Efeito da diminuição do fluxo de vapor de processo

Nesta análise, o fluxo de vapor de processo requerido em relação ao caso original de 76.835 kW (causado pela imposição da temperatura de 135°C e 36,9 kg/s) foi diminuído em aproximadamente 5%, 10%, 15% e 20%. O objetivo, assim como no caso anterior, é avaliar o impacto do vapor de processo na geração de energia elétrica. Todos os demais parâmetros foram mantidos fixos.

3.6.5 Otimização 5: Impacto da umidade do bagaço

Para esta última análise, o objetivo foi avaliar o efeito do teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar na geração de energia elétrica. O teor de umidade interfere diretamente no poder calorífico da biomassa, apresentando um comportamento inversamente proporcional. Para esta avaliação, foram utilizados sete valores de teor de umidade: 47,15%, 48,15%, 49,15%, 50,15%, 51,15%, 52,15% e 53,15%, de acordo com Santos (2017). Os valores correspondentes do poder calorífico inferior para cada um desses teores de umidade são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Poder calorífico inferior do bagaço em função do teor de umidade

Teor de Umidade (%)	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg)
47,15	8.139
48,15	7.928
49,15	7.718
50,15	7.507
51,15	7.296
52,15	7.086
53,15	6.875

Fonte: Adaptado de Santos (2017).

A Eq. (5) é utilizada para calcular a quantidade de calor (Q) produzida pela queima de um fluxo de bagaço (\dot{m}_b). A Eq. (6) é uma variação da Eq. (5), onde se usa o fluxo de massa de vapor (\dot{m}_v) nos cálculos. Para isso, é utilizado a eficiência de geração de vapor (η_g), ou relação bagaço-vapor (número característico de caldeiras que expressa a quantidade de bagaço necessária para produzir uma determinada quantidade de vapor, dado em kg/kg. Com o auxílio da Eq. (6) foi calculado para cada valor de teor de umidade a quantidade de calor (Q) correspondente em kW que é gerada durante a queima na caldeira, e esse valor foi inserido no *software* IPSEpro®.

$$\dot{Q} = \dot{m}_b \cdot \text{PCI} \quad (5)$$

$$\dot{Q} = \eta_g \cdot \dot{m}_v \cdot \text{PCI} \quad (6)$$

onde: PCI é o poder calorífico inferior do bagaço em kJ/kg e η_g é igual a 0,47, valor definido em Fiomari (2004), que corresponde a dados operacionais de uma usina do noroeste paulista.

4. RESULTADOS

Essa seção apresenta os resultados da análise termodinâmica da planta de potência inicial, além das considerações necessárias para realizar as otimizações dos parâmetros operacionais do ciclo termodinâmico, as declarações de otimização, restrições e parâmetros evolutivos do método de otimização (número de gerações, cruzamento e mutação). Em seguida, são apresentados os resultados de todas as simulações descritas anteriormente (item 3.5). Ressalta-se que o foco das otimizações é encontrar as melhores condições operacionais de uma planta já existente. Em todos os casos, tanto de análise termodinâmica quanto de otimização, foi considerada eficiência elétrica de 97% e eficiência mecânica de 98% em todas as turbinas.

4.1 ANÁLISE TERMODINÂMICA

A Tabela 11 apresenta os valores da análise termodinâmica da planta inicial, que serviu de base para as primeiras análises, modelado no *software* IPSEpro®. Na tabela são apresentadas para todos os pontos, os dados introduzidos e os resultados fornecidos pelo programa para cada ponto da planta.

Para produzir uma vazão de vapor de 46,15 kg/s, é necessário que sejam produzidos pela caldeira 167,613 MW de potência a partir da queima do bagaço. Depois do vapor passar pelas turbinas, é necessário 83,675 MW de potência para atender a demanda de processo da usina de 37,62 kg/s.

As turbinas tiveram uma geração total de 29,019 MW, sendo 22,181 MW oriunda da turbina de extração-condensação e 6,838 MW da turbina de contrapressão.

A partir desses dados, a eficiência da planta, que é a razão entre a soma da potência gerada pelas turbinas com a potência utilizada no processo e a potência gerada pela caldeira, foi de 67,23%.

Tabela 11 - Análise termodinâmica da planta inicial

Ponto	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m ³ /kg)
1	2,45	126,76	46,15	532	1,60	0,00107
2	78,60	128,08	46,15	543	1,61	0,00107
3	68,60	530,00	46,15	3.485	6,90	0,0515
4	68,60	529,99	34,72	3.485	6,90	0,0515
5	68,60	529,99	11,43	3.485	6,90	0,0515
6	2,45	159,70	34,72	2.785	7,23	0,799
7	2,45	159,70	7,75	2.785	7,23	0,799
8	0,070	39,60	7,75	2.572	8,28	20,56
9	0,070	38,99	7,75	163	0,56	0,001
10	2,45	159,70	26,97	2.785	7,23	0,799
11	2,45	159,70	11,43	2.785	7,23	0,799
12	2,45	159,70	1,50	2.785	7,23	0,799
13	2,45	159,70	9,93	2.785	7,23	0,799
14	2,45	159,70	36,90	2.785	7,23	0,799
15	2,45	135,97	37,62	2.735	7,11	0,752
16	2,45	121,75	37,62	511	1,55	0,001
17	2,45	39,09	7,75	163	0,56	0,001
18	2,45	39,03	0,72	163	0,600	0,001
19	2,45	39,03	7,03	163	0,56	0,001
20	2,45	108,84	44,65	45	1,41	0,001

Fonte: Própria autora.

4.2 CONSIDERAÇÕES PARA AS OTIMIZAÇÕES

4.2.1 Declaração de otimização e restrições

Todas as otimizações foram realizadas com o auxílio do programa IPSEpro®. O *software* utiliza o método Algoritmos Genéticos (GA) como método evolutivo de busca pela configuração ótima.

A declaração de otimização, genericamente apresentada pelas Eqs. (2), (3) e (4), pode ser descrita de forma mais específica conforme a Eq. (7):

$$\text{Encontre } X = \begin{Bmatrix} \dot{m}_{18} \\ \dot{m}_{10} \\ \dot{m}_4 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ P_8 \\ T_8 \end{Bmatrix}, \text{ que maximiza } W_{2,1} + W_{2,2} \quad (7)$$

Sujeito a: $T_{15} \geq 135^{\circ}\text{C}$

Onde T_{15} é a temperatura de entrada do processo (Ponto 15) e $W_{2,1}$ e $W_{2,2}$ representam respectivamente, a geração de potência das turbinas de 32 MW e de 15 MW. Essa declaração é válida para as otimizações 1 e 5.

Para os casos específicos das otimizações 2, 3 e 4, também há uma restrição quanto ao valor do fluxo de vapor de processo, sendo que há um valor diferente para cada caso simulado (

Tabela 8). Para a otimização 2 e 3, a declaração de otimização fica descrita conforme a Eq. (8):

$$\text{Encontre } X = \begin{Bmatrix} \dot{m}_{18} \\ \dot{m}_{10} \\ \dot{m}_4 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ P_8 \\ T_8 \end{Bmatrix}, \text{ que maximiza } W_{2,1} + W_{2,2} \quad (8)$$

Sujeito a: $T_{15} \geq 135^{\circ}\text{C}$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \geq 33,87 \text{ kg/s (40\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \geq 36,16 \text{ kg/s (50\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \geq 38,92 \text{ kg/s (60\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \geq 41,21 \text{ kg/s (70\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \geq 43,83 \text{ kg/s (80\%)}$$

onde $\dot{Q}_{\text{processo}}$ representa o fluxo de vapor necessário ao processo (Ponto 15).

Já para o caso 4, a restrição foi o valor do fluxo de calor de processo que foi diminuído em 5%, 10%, 15% e 20%. A declaração de otimização para esse caso é dada segundo a Eq. (9):

$$\text{Encontre } X = \begin{Bmatrix} \dot{m}_{18} \\ \dot{m}_{10} \\ \dot{m}_4 \\ T_{10} \\ T_{11} \\ P_8 \\ T_8 \end{Bmatrix}, \text{ que maximiza } W_{2,1} + W_{2,2} \quad (9)$$

Sujeito as seguintes restrições: $T_{15} \geq 135^{\circ}\text{C}$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \leq 76,835 \text{ MW (0\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \leq 73,176 \text{ MW (5\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \leq 68,848 \text{ MW (10\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \leq 64,641 \text{ MW (15\%)}$$

$$\dot{Q}_{\text{processo}} \leq 61,568 \text{ MW (20\%)}$$

4.2.2 Estudo das variáveis de otimização (parâmetros do solver)

Para definir o número de gerações e o tamanho da população, assim como as taxas de mutação e cruzamento, foram realizados testes com uma mesma planta, na qual os valores dessas variáveis foram alterados de forma crescente. O comportamento da função objetivo foi monitorado até que se observasse a convergência da solução.

Primeiramente, variou-se o número de indivíduos da população inicial (P) em 40, 60, 80 e 100. O número de gerações (G) foi mantido fixo em 40. O valor da geração total do teste com a população de 80 indivíduos foi 0,02% maior do que em relação ao teste com a população de 60 indivíduos. Já esse último valor foi 0,66% menor do que o teste com a população de 100 indivíduos. Desta forma, é possível verificar a estabilização dos resultados ótimos, permitindo seguir com a avaliação do tamanho da geração (G) de 40, 60 e 80. Os resultados da energia gerada em kW pelas turbinas 1, 2 e total são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Testes de otimização variando-se o tamanho da população e número de gerações

Turbina	$P = 40$ $G = 40$	$P = 60$ $G = 40$	$P = 80$ $G = 40$	$P = 100$ $G = 40$	$P = 100$ $G = 60$	$P = 100$ $G = 80$
32 MW (kW)	27.064	27.366	27.380	27.186	27.362	27.334
15 MW (kW)	1.536	1.762	1.755	1.755	1.739	1.762
Total (kW)	28.600	29.128	29.135	28.941	29.101	29.096

Fonte: Própria autora.

Em seguida, como também foi observado a estabilidade nos resultados (diferença máxima de 0,02% na geração total de energia), foi avaliado os valores das probabilidades de cruzamento (C) e mutação (M) em quatro combinações, cujos

valores e resultados são apresentados na Tabela 13. O tamanho da população (P) e o número de gerações (G) foram mantidos constantes em 100 e 80, respectivamente.

Tabela 13 - Testes de otimização com diversas combinações de valores de probabilidades de cruzamento e mutação

Turbina	C = 0,9 M = 0,9	C = 0,9 M = 0,3	C = 0,3 M = 0,9	C = 0,3 M = 0,3
32 MW (kW)	27.414	27.414	27.402	27.404
15 MW (kW)	1.762	1.762	1.762	1.762
Total (kW)	29.176	29.176	29.164	29.166

Fonte: Própria autora.

Com esses dados é possível perceber que o valor das probabilidades de cruzamento e mutação não tiveram muita influência nos casos simulados, especialmente quando se compara os casos em que a probabilidade de cruzamento era a mesma.

Como conclusão, os valores escolhidos para os testes foram 100 para a população e 80 para o número de gerações. Adicionalmente, o valor final de probabilidade de cruzamento e mutação foi de 0,9 para os dois parâmetros.

4.3 OTIMIZAÇÃO 1: PLANTA SEM MODIFICAÇÃO

A planta inicial foi otimizada com base nos parâmetros especificados na Tabela 6 e pela declaração de otimização descrita pelas Eqs. (6) a (9). Os resultados dessa otimização são mostrados na Tabela 14, onde são apresentados os pontos em que houve alteração devido à otimização (esses valores estão destacados com *). Os valores do restante dos pontos permaneceram os mesmos da Tabela 11.

Tabela 14 - Resultados da otimização 1: Planta sem modificação

Prop.	Turbina 32 MW			Turbina 15 MW		Processo (Ponto 15)
	Entrada (Ponto 4)	2ª Extração (Ponto 10)	Condensação (Ponto 8)	Entrada (Ponto 5)	Escape (Ponto 11)	
P (bar)	68,60	2,45	0,0665*	68,60	2,45	2,45
T (°C)	530,0	151,5*	38,6*	530,0	127,5*	135,1*
\dot{m} (kg/s)	25,46*	23,38*	2,08*	20,69*	20,69*	43,51*

* valores alterados devido à otimização.

Fonte: Própria autora.

Os pontos não destacados permaneceram inalterados em todos os casos mesmo depois das otimizações. A Tabela 15 apresenta os resultados da geração de energia da planta inicial sem modificação antes e depois da otimização.

Tabela 15 - Resultados da geração de energia da planta inicial antes e depois da otimização

Turbina	Energia Gerada (MW)		Diferença (%)
	Planta básica	Planta básica otimizada	
Extração turbina 32 MW	22,2	16,0	-28,0
Escape turbina 15 MW	6,8	13,6	+99,0
Total	29,0	29,6	+1,80

Fonte: Própria autora.

A otimização indicou uma distribuição de vapor de entrada mais balanceada entre as duas turbinas quando comparado com o caso base. A vazão de vapor de entrada na turbina 32 MW passou de 37,72 kg/s para 25,46 kg/s devido à otimização, enquanto a vazão da turbina de 15 MW passou de 11,43 kg/s para 20,69 kg/s. Isso representou uma menor geração de energia elétrica na primeira turbina e uma maior na segunda.

A temperatura da segunda extração da turbina de 32 MW teve uma queda de cerca de 8°C devido a otimização. A vazão mássica também reduziu em relação ao caso base, de 26,97 kg/s para 23,38 kg/s. Uma menor extração representa que mais vapor será expandido no último estágio da turbina (condensação) e haverá uma maior geração de energia elétrica.

A temperatura e pressão de condensação da turbina de 32 MW (T_8 e P_8) não tiveram alterações expressivas em valores quando comparado ao caso base, mostrando que os melhores resultados de geração de energia elétrica são obtidos quando os parâmetros se aproximam do limite inferior da faixa de operação.

A temperatura de saída da turbina de 15 MW sofreu uma diminuição de 159,7°C para 127,5°C devido à otimização, fato que somado com o aumento da vazão de entrada, resulta em um aumento expressivo na geração de energia elétrica em relação ao caso base (99,0%).

A partir desses resultados, é possível perceber que a configuração atual da planta não permite o total aproveitamento da capacidade das turbinas devido à limitação da caldeira em relação à produção de vapor. Mesmo depois da otimização a geração foi de 29,6 MW, enquanto a capacidade nominal de geração total das turbinas é de 47 MW. Com o objetivo de propor uma maior geração de energia, foi analisada a possibilidade de troca da caldeira por uma de maior capacidade.

A caldeira utilizada na configuração original tinha capacidade de geração de 41,6 kg/s (150 t/h) de vapor, e já trabalhava com um excedente de cerca de 3,3 kg/s (10 t/h). Propõe-se, portanto, a análise considerando uma caldeira com capacidade acima de 55,55 kg/s (200 t/h), valor esse que permitiu que fosse possível explorar uma capacidade maior da geração de energia da turbina.

Primeiramente, foi proposto um caso base com uma nova caldeira com geração de vapor de 58,33 kg/s (210 t/h). Todo o restante da planta permaneceu inalterado. Esse caso foi modelado, sem otimização, e os resultados são apresentados na Tabela 16.

Nesse caso, conforme mostrado na Tabela 4, há limite inferior na extração da turbina de 32 MW, e a demanda de vapor de processo é de cerca de 34 kg/s, houve um pequeno excedente de vapor de processo (Ponto 15). Isso mostra que a planta nessa configuração não atinge sua capacidade máxima de geração, onde todo o vapor excedente seria expandido nas turbinas para geração de energia elétrica. A energia gerada pelas turbinas de extração-condensação, de contrapressão e a total foram: 24,4 MW, 14,1 MW e 38,5 MW, respectivamente.

Contudo, essa nova configuração, com a caldeira de maior capacidade de geração de vapor (210 t/h), passou a ser a configuração que foi submetida às mudanças descritas na metodologia do item 3.5.

Tabela 16 - Análise termodinâmica da nova planta com geração de vapor de 58,33 kg/s

Ponto	P (bar)	T (°C)	\dot{m} (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m ³ /kg)
1	2,45	126,8	58,33	532,52	1,60	0,001067
2	78,60	128,1	58,33	543,37	1,61	0,001064
3	68,60	530,0	58,33	3.485,09	6,90	0,05154
4	68,60	530,0	34,72	3.485,09	6,90	0,05154
5	68,60	530,0	23,61	3.485,09	6,90	0,05154
6	2,45	159,7	34,72	2.785,90	7,23	0,799
7	2,45	159,7	19,72	2.785,90	7,23	0,799
8	0,070	39,6	19,72	2.572,91	8,28	20,56
9	0,070	39,0	19,72	163,32	0,56	0,001
10	2,45	159,7	15,00	2.785,90	7,23	0,799
11	2,45	159,7	23,61	2.785,90	7,23	0,799
12	2,45	159,7	3,45	2.785,90	7,23	0,799
13	2,45	159,7	20,15	2.785,90	7,23	0,799
14	2,45	159,7	35,15	2.785,90	7,23	0,799
15	2,45	136,0	35,83	2.735,71	7,11	0,752
16	2,45	121,8	35,83	511,25	1,55	0,001
17	2,45	39,0	19,72	163,63	0,56	0,001
18	2,45	39,0	0,68	163,63	0,60	0,001
19	2,45	39,0	19,04	163,63	0,56	0,001
20	2,45	108,8	54,87	44,65	1,41	0,001

Fonte: Própria autora.

4.4 OTIMIZAÇÃO 2: MIX DE PRODUÇÃO

A Tabela 17 apresenta os valores dos parâmetros que foram otimizados e os dados obtidos no ponto 15 (processo). Tanto nessa otimização, quanto na otimização 3, o caso de *mix* de produção de 40% corresponde ao novo caso base (após a troca da caldeira) descrito no item anterior. Após a otimização desse caso, foi possível obter uma nova configuração em que não houve excedente de vapor de processo.

Tabela 17 - Resultados da otimização 2: *Mix* de produção

Prop.	Turbina 32 MW			Turbina 15 MW		Processo (Ponto 15)
	Entrada (Ponto 4)	2ª Extração (Ponto 10)	Condensação (Ponto 8)	Entrada (Ponto 5)	Escape (Ponto 11)	
Mix = 40%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0552*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	152,7*	35,2*	530,0	163,7*	135,4*
\dot{m} (kg/s)	37,96*	17,07*	20,89*	20,36*	20,36*	34,25*
Mix = 50%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0621*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	146,3*	38,6*	530,0	164,6*	135,2*
\dot{m} (kg/s)	37,96*	18,84*	19,12*	20,36*	20,36*	36,33*
Mix = 60%						
P (bar)	68,6	2,45	0,055*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	144,0*	36,9*	530,0	163,7*	137,0*
\dot{m} (kg/s)	38,42*	22,29*	16,13*	19,91*	19,91*	39,63*
Mix = 70%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0555*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	145,0*	35,4*	530,0	153,9*	135,2*
\dot{m} (kg/s)	38,42*	23,78*	14,64*	19,91*	19,91*	41,31*
Mix = 80%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0550*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	144,8*	35,0*	530,0	151,8*	135,2*
\dot{m} (kg/s)	38,88*	26,60*	12,28*	19,45*	19,45*	44,03*

* valores alterados devido à otimização.

Fonte: Própria autora.

Os casos bases foram produzidos provocando as alterações descritas no item 3.5 na planta inicial (com a nova caldeira), como mudança na vazão de vapor de processo ou no calor de entrada da caldeira, porém sem realizar nenhuma outra mudança nos parâmetros operacionais da planta.

Nesse caso, assim como no Caso 3, para alterar a vazão de vapor de processo de acordo com o mix de produção definido, foram modificadas as vazões da segunda extração da turbina de extração-condensação e do *splitter* localizado após o ponto 18. Dessa maneira, foram criados casos bases para cada um dos casos.

A Tabela 18 apresenta os valores de energia gerada para os casos base e otimizados, assim como a porcentagem de aumento na geração causada pela otimização.

Tabela 18 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 2: *Mix* de produção

Turbina	Energia Gerada Base (MW)	Energia Gerada Otimização (MW)	Diferença (%)
<i>Mix = 40%</i>			
Extração turbina 32 MW	24,4	26,9	+10,2
Escape turbina 15 MW	14,1	12,1	-14,2
Total	38,5	39,0	+1,30
<i>Mix = 50%</i>			
Extração turbina 32 MW	24,5	26,7	+9,0
Escape turbina 15 MW	13,9	12,0	-13,7
Total	38,4	38,7	+0,80
<i>Mix = 60%</i>			
Extração turbina 32 MW	23,9	26,6	+11,3
Escape turbina 15 MW	14,0	11,8	-15,7
Total	37,9	38,4	+1,30
<i>Mix = 70%</i>			
Extração turbina 32 MW	23,7	26,4	+11,4
Escape turbina 15 MW	14,0	12,1	-13,6
Total	37,7	38,5	+0,84
<i>Mix = 80%</i>			
Extração turbina 32 MW	23,3	26,3	+12,9
Escape turbina 15 MW	14,0	11,9	-15,0
Total	37,3	38,2	+2,41

Fonte: Própria autora.

Os resultados mostram a diminuição na energia elétrica total gerada pelas turbinas conforme o *mix* de produção aumenta. Esse resultado é devido ao sistema necessitar de mais energia para atender as demandas do processo, o que provoca um aumento na extração da turbina de extração-condensação e, portanto, uma diminuição na produção de energia elétrica. Isso pode ser verificado no aumento da

vazão de vapor na 2ª extração (\dot{m}_{10}), que sai de 11,07 kg/s no *mix* de 40% para 26,60 kg/s no *mix* de 80%.

A otimização indicou que o ponto ótimo ocorre quando a vazão de entrada da turbina de extração-condensação (\dot{m}_4), é levada ao extremo de sua faixa operacional (38,88 kg/s), enquanto o remanescente do vapor produzido a partir da queima do bagaço é direcionado para a turbina de contrapressão. Dessa maneira, em todos os casos ocorre uma divisão semelhante do vapor entre as duas turbinas.

É possível observar também que o aumento da geração de energia devido à otimização foi de 0,8% para o *mix* de 50% e chegou a 2,41% para o *mix* de 80%. Esse aumento está vinculado às temperaturas de saída das turbinas, que nos casos bases eram de 159,7°C para as duas turbinas. Os resultados da otimização indicaram valores na faixa de 146°C para a temperatura de saída da turbina de extração-condensação, o que somado com o aumento de vazão de entrada de vapor (que no caso base era de 34,72 kg/s) explicam o aumento na geração de energia elétrica em relação ao caso base. Já para a turbina de contrapressão, a otimização indicou uma temperatura média de saída de 164°C nos três primeiros casos e 152,8°C nos últimos dois casos. Essa diferença de temperatura de saída da turbina de contrapressão explica porque o aumento nesses últimos casos (70 e 80%) foi mais expressivo que nos primeiros (40, 50 e 60%).

A otimização indicou uma pressão de condensação da turbina de extração-condensação próxima do limite inferior da faixa operacional em todos os casos. O mesmo aconteceu com a temperatura de condensação, que teve como valor médio 36,2°C.

O fluxo de massa \dot{m}_{18} teve valores decrescentes conforme o *mix* de produção aumentou, saindo de 0,61 kg/s para o *mix* de 40% e chegando a 0,44 para o *mix* de 80%. Isso é devido as temperaturas do vapor de saída das turbinas, especialmente da de contrapressão, que atendem o processo, terem seus valores também decrescentes de acordo com o aumento do *mix* de produção. Com as temperaturas mais baixas, menos água é necessária para resfriar o vapor que segue para o processo.

4.5 OTIMIZAÇÃO 3: MIX DE PRODUÇÃO COM ALTERAÇÃO NA MASSA TOTAL DO SISTEMA

As Tabelas 19 e 20 apresentam os resultados da otimização 3, em que o fluxo

de massa total do sistema foi aumentado pelo valor correspondente ao aumento da demanda de vapor de processo em todos os casos de *mix* de produção.

Tabela 19 - Resultados da otimização 3: *Mix* de produção com alteração na massa total do sistema

Prop.	Turbina 32 MW			Turbina 15 MW		Processo (Ponto 15)
	Entrada (Ponto 4)	2ª Extração (Ponto 10)	Condensação (Ponto 8)	Entrada (Ponto 5)	Escape (Ponto 11)	
Mix = 40%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0552*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	152,7*	35,2*	530,0	163,7*	135,4*
\dot{m} (kg/s)	37,96*	17,07*	20,89*	20,36*	20,36*	34,25*
Mix = 50%						
P (bar)	68,6	2,45	0,055*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	147,9*	34,9*	530,0	166,1*	135,4*
\dot{m} (kg/s)	38,73*	17,66*	21,07*	21,88*	21,88*	36,32*
Mix = 60%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0564*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	149,4*	35,3*	530,0	160,0*	135,2*
\dot{m} (kg/s)	38,88*	17,63*	21,24*	24,49*	24,49*	38,86*
Mix = 70%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0557*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	144,0*	34,8*	530,0	163,4*	135,9*
\dot{m} (kg/s)	38,88*	17,92*	20,96*	26,79*	26,79*	41,45*
Mix = 80%						
P (bar)	68,6	2,45	0,0585*	68,6	2,45	2,45
T (°C)	530,0	150,93*	36,0*	530,0	154,4*	135,3*
\dot{m} (kg/s)	38,88*	17,56*	21,31*	29,4*	29,40*	43,65*

* valores alterados devido à otimização.

Fonte: Própria autora.

Tabela 20 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 3: *Mix* de produção com alteração na massa total do sistema

Turbina	Energia Gerada Base (MW)	Energia Gerada Otimização (MW)	Diferença (%)
<i>Mix = 40%</i>			
Extração turbina 32 MW	24,4	26,9	+10,3
Escape turbina 15 MW	14,1	12,1	-14,2
Total	38,5	39,0	+1,30
<i>Mix = 50%</i>			
Extração turbina 32 MW	24,8	27,5	+10,9
Escape turbina 15 MW	15,3	12,9	-15,7
Total	40,1	40,4	+0,75
<i>Mix = 60%</i>			
Extração turbina 15 MW	24,8	27,6	+11,3
Escape turbina 32 MW	17,0	14,6	-14,1
Total	41,8	42,2	+0,72
<i>Mix = 70%</i>			
Extração turbina 15 MW	24,8	27,7	+11,7
Escape turbina 32 MW	18,3	15,9	-13,1
Total	43,1	43,6	+1,16
<i>Mix = 80%</i>			
Extração turbina 32 MW	24,8	27,5	+10,9
Escape turbina 15 MW	19,9	17,9	-10,0
Total	44,7	45,4	+1,57

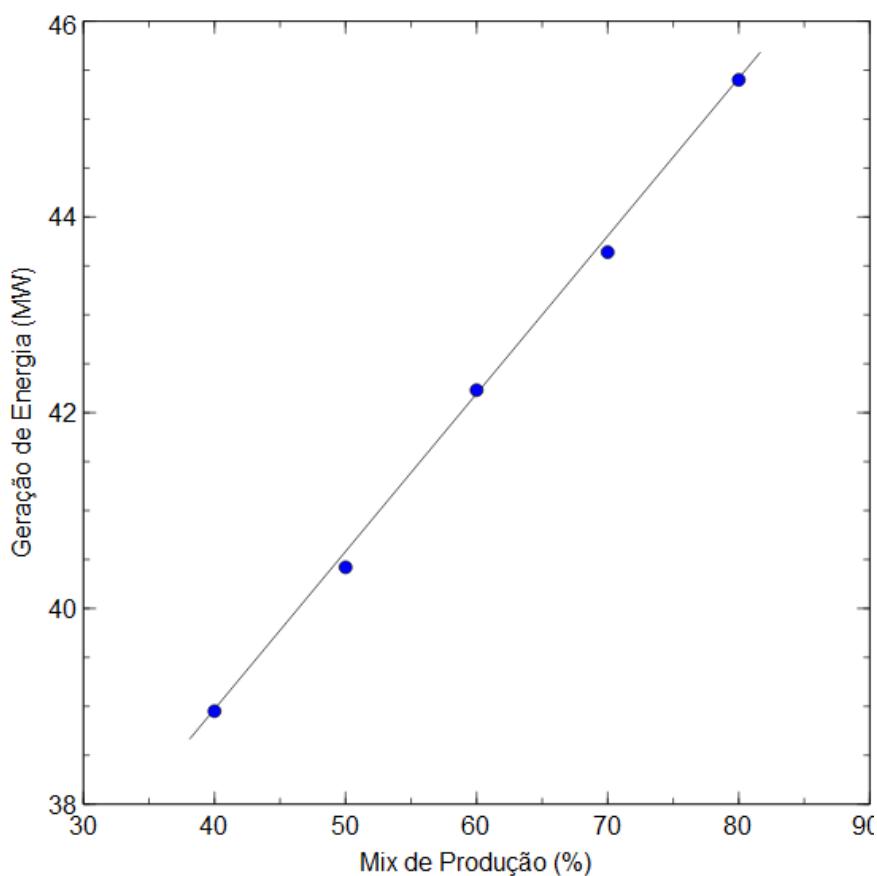
Fonte: Própria autora.

Apesar da planta necessitar de todo o vapor gerado a mais para atender as necessidades do processo, ocorreu um aumento na energia total produzida conforme o *mix* de produção aumentava. Isso ocorre devido à primeira turbina ter capacidade máxima de vazão de entrada de 38,88 kg/s, o que causa a necessidade desse excedente de vapor produzido pela caldeira ser expandido pela segunda turbina, que tem a maior parte do seu vapor de escape direcionado para o processo, suprimindo a necessidade de vapor.

Esse fato implicou em uma vazão de vapor na segunda extração da primeira turbina quase que constante (\dot{m}_{10}).

As condições de entrada e saída da turbina de extração-condensação permaneceram praticamente constantes de um caso para o outro, entretanto, a geração de energia ainda aumenta conforme o *mix* de produção aumenta. Isso pode ser verificado através da Figura 2. Portanto, o aumento da demanda de vapor de processo somado com o aumento de vapor produzido, promove um aumento na geração de energia das turbinas.

Figura 2 - Variação na geração de energia de acordo com o *mix* de produção



Fonte: Própria autora.

Para a distribuição da vazão de entrada de vapor nas duas turbinas, a otimização indicou em todos os casos uma vazão de entrada máxima (38,88 kg/s) para a turbina de extração-condensação, sendo o restante do vapor produzido pela caldeira conduzido à turbina de contrapressão. A temperatura de saída média foi de 148,9°C para a turbina de extração-condensação e para a turbina de contrapressão a temperatura média foi de 163,3°C para os quatro primeiros casos e 154,4°C para o último. Esses resultados implicam em um aumento da geração de energia da primeira turbina em relação ao caso base e uma diminuição na geração da segunda turbina.

Apesar disso, o aumento global de geração de energia elétrica ainda é positivo, como já foi discutido.

Já a respeito da condensação da turbina de 32 MW, a otimização indicou uma pressão de saída média de 0,056 bar e uma temperatura média de saída de 35,2°C, valores estes próximos aos mínimos da faixa de operação da turbina.

Também é importante observar que nos dois últimos casos a geração de energia elétrica da turbina de contrapressão ultrapassou o valor máximo nominal (15 MW), pois não houve uma limitação da geração (restrição) durante a modelagem da otimização. Para a turbina de extração-condensação, a geração permaneceu abaixo do valor máximo (32 MW), fato este causado pela segunda extração da mesma, cuja a existência é necessária ao atendimento da demanda de vapor de processo, porém também impede uma expansão total do vapor disponível e uma consequente maior geração de energia elétrica.

4.6 OTIMIZAÇÃO 4: AVALIANDO A DIMINUIÇÃO DO CALOR DE PROCESSO

Com o objetivo de avaliar a influência da vazão de vapor de processo na geração de energia elétrica da planta, o calor de processo requerido de 76,8 MW foi diminuído do seu valor original em 5, 10, 15 e 20%. Todos os demais parâmetros foram mantidos fixos. Os resultados para essa otimização são apresentados nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Resultados da otimização 4: Avaliando a diminuição no calor de processo

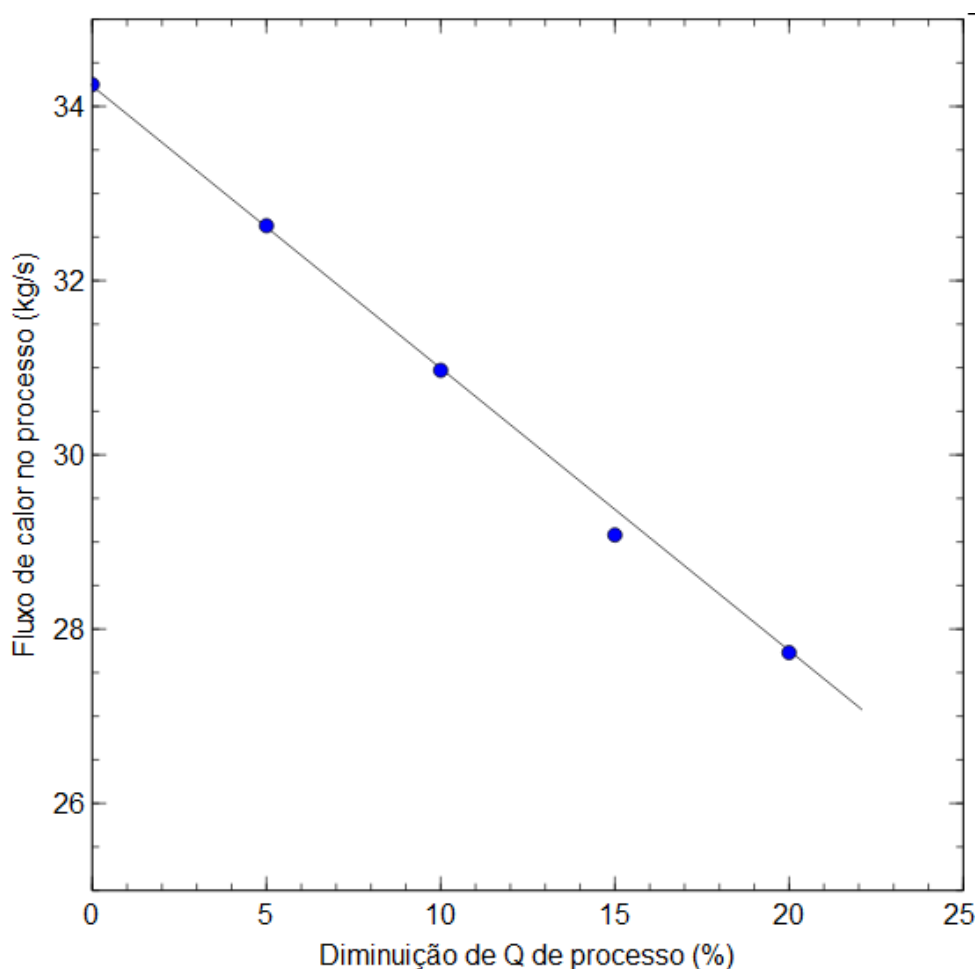
Prop.	Turbina 32 MW			Turbina 15 MW		Processo (Ponto 15)
	Entrada (Ponto 4)	2ª Extração (Ponto 10)	Condensação (Ponto 8)	Entrada (Ponto 5)	Escape (Ponto 11)	
Redução = 0% (Q = 76,8 MW)						
<i>P</i> (bar)	68,6	2,45	0,0552*	68,6	2,45	2,45
<i>T</i> (°C)	530,0	152,7*	35,2*	530,0	163,7*	135,4*
<i>m</i> (kg/s)	37,96*	17,07*	20,89*	20,36*	20,36*	34,25*
Redução = 5% (Q = 73,2 MW)						
<i>P</i> (bar)	68,6	2,45	0,0566*	68,6	2,45	2,45
<i>T</i> (°C)	530,0	153,3*	35,4*	530,0	166,3*	135,1*
<i>m</i> (kg/s)	38,42*	16,33*	22,09*	19,91*	19,91*	32,93*
Redução = 10% (Q = 68,8 MW)						
<i>P</i> (bar)	68,6	2,45	0,0571*	68,6	2,45	2,45
<i>T</i> (°C)	530,0	167,4*	35,8*	530,0	163,7*	135,5*
<i>m</i> (kg/s)	38,80*	15,00*	23,88*	19,45*	19,45*	30,94*
Redução = 15% (Q = 64,6 MW)						
<i>P</i> (bar)	68,6	2,45	0,0566*	68,6	2,45	2,45
<i>T</i> (°C)	530,0	166,61	35,3*	530,0	167,8*	135,1*
<i>m</i> (kg/s)	37,96*	12,45*	25,51*	20,36*	20,36*	29,08*
Redução = 20% (Q = 61,6 MW)						
<i>P</i> (bar)	68,6	2,45	0,0552*	68,6	2,45	2,45
<i>T</i> (°C)	530,0	174,1*	35,2*	530,0	168,7*	135,3*
<i>m</i> (kg/s)	38,88*	12,18*	26,69*	19,45*	19,45*	27,69*

* valores alterados devido à otimização.

Fonte: Própria autora.

Conforme ocorreu a diminuição do calor requerido pelo processo, os resultados indicaram a diminuição da vazão de vapor no processo. Conforme pode ser visto na Figura 11, essa diminuição ocorreu de forma linear com queda de aproximadamente 5% a cada ponto.

Figura 3 - Variação da vazão mássica de vapor no processo



Fonte: Própria autora.

É importante ressaltar que a redução no calor de processo requerido ocorre a partir de uma redução do valor da segunda extração da turbina de extração-condensação, quantidade que tem como valor mínimo estabelecido de 17 kg/s definido nas recomendações do fornecedor da turbina (Tabela). O valor da extração caiu de 17,07 kg/s (0%) até 12,18 kg/s no último caso (20%).

Para essas simulações, deliberadamente, esse valor foi reduzido para 12 kg/s apenas para extrapolação da análise. Logo, os últimos três pontos na Figura 3 não são possíveis de serem atingidos sem infringir as especificações da turbina de extração-condensação apresentadas na Tabela .

Portanto, como é necessário que haja uma extração mínima na primeira turbina e todo o vapor de escape da segunda turbina (que sai a alta temperatura e pressão) seja direcionado para o processo, essa configuração necessariamente produz uma quantidade mínima de vapor em condições de ser usado no processo de produção. Assim, é possível concluir que essa planta, com as configurações utilizadas, é

interessante quando há uma alta demanda de vapor para o processo, para que não ocorra um desperdício do vapor de escape das turbinas.

Em todos os casos, as simulações indicaram que o ponto ótimo ocorre quando a turbina de extração-condensação atinge sua capacidade máxima, com vazão de vapor de entrada atingindo valores próximos de 38,88 kg/s e sendo o restante do vapor direcionado à turbina de contrapressão.

Já as temperaturas de saída médias tiveram valores crescentes para na extração da turbina de extração-condensação, saindo de 152,7°C no primeiro caso (0%), o que gerou uma eficiência na turbina de 86%, para 174,1°C no último caso (20%), em que a eficiência foi de 80%. Já a turbina de contrapressão, teve temperaturas de saída praticamente constantes, com valor médio de 168 °C, o que gerou eficiências em torno de 84%.

A vazão mássica no ponto 18, que é proveniente da condensação da turbina de extração-condensação, teve valores crescentes conforme ocorreu a diminuição do calor de processo, saindo de 0,61 kg/s para 0% até 0,78 kg/s para o caso em que houve diminuição de 20% do calor de processo. Esse valor acompanha o aumento de temperatura de saída do vapor da extração da mesma, vapor este após se unir com o vapor de escape da turbina de contrapressão, é resfriado pelo fluxo de vapor \dot{m}_{18} .

A condensação da turbina de extração-condensação apresentou valores de pressão e temperatura próximos da extremidade inferior da faixa de operação da carta da turbina. A pressão e temperatura médias atingidas pela otimização foram de 0,056 bar e 35,4°C, respectivamente.

A Tabela 22 apresenta os valores de energia gerada para os casos base e otimizados, assim como o aumento na geração causada pela otimização.

Tabela 22 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 4: Avaliando a diminuição do calor de processo

Turbina	Energia Gerada Base (MW)	Energia Gerada Otimização (MW)	Diferença (%)
Redução = 0% (Q = 76,8 MW)			
Extração turbina 32 MW	24,8	26,9	+8,5
Escape turbina 15 MW	14,0	12,1	-13,6
Total	38,8	39,0	+0,51
Redução = 5% (Q = 73,1 MW)			
Extração turbina 32 MW	25,0	27,3	+9,2
Escape turbina 15 MW	14,0	11,7	-16,4
Total	39,0	39,0	+0,00
Redução = 10% (Q = 68,8 MW)			
Extração turbina 32 MW	25,1	27,5	+9,6
Escape turbina 15 MW	14,0	11,5	-17,9
Total	39,0	39,0	+0,00
Redução = 15% (Q = 64,6 MW)			
Extração turbina 32 MW	25,1	27,4	+9,2
Escape turbina 15 MW	14,0	11,9	-15,0
Total	39,1	39,3	+0,51
Redução = 20% (Q = 61,6 MW)			
Extração turbina 32 MW	25,1	28,0	+11,6
Escape turbina 15 MW	14,0	11,3	-19,3
Total	39,1	39,3	+0,51

Fonte: Própria autora.

Seguindo a mesma lógica para todos as otimizações, para simular os casos bases dessa configuração específica (Otimização 4), a extração da primeira turbina e o fluxo de vapor no ponto 18 (\dot{m}_{18}) foram alterados caso a caso a fim de atender as condições propostas pela metodologia. Para isso, a massa de entrada na primeira turbina foi mantida em 35 kg/s e a extração foi diminuída cada vez mais, até atingir o valor mínimo proposto para esse caso, 12 kg/s. Devido a isso, nos dois últimos casos não foi possível atingir os valores de calor de processo propostos.

Quando isso ocorreu, a vazão de vapor de processo excedeu a proposta indicada na Tabela 21. Logo, na prática, isso indicaria um excesso de vapor de

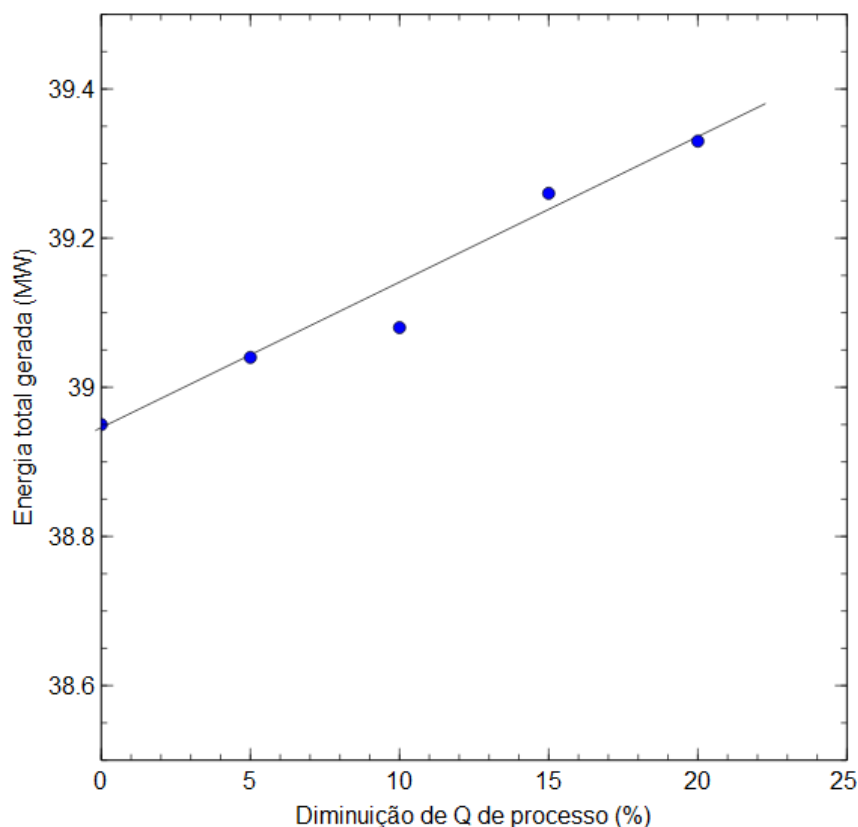
processo, sem utilidade, o que ocorre especialmente nos casos bases de 15 e 20%.

A única forma de diminuir a vazão de vapor destinada ao processo (Ponto 15), sem alterar as vazões de entrada das turbinas, seria diminuir ainda mais a extração da turbina de extração-condensação, o que desrespeitaria ainda mais as configurações da mesma.

Como dito anteriormente, as otimizações indicaram para vazão de vapor de entrada da turbina de extração-condensação valores próximos de 38,88 kg/s, valor maior que os 35 kg/s do caso base. Isso permitiu uma extração maior e uma vazão menor de vapor de escape na turbina de contrapressão. Logo, nos casos otimizados, foi possível atingir os valores propostos de calor de processo. Dessa maneira, após a modificação do caso base, o processo de otimização tornou-se mais flexível permitindo ao otimizador encontrar configurações ótimas em uma faixa mais abrangente.

O efeito da diminuição do calor de processo na geração de energia elétrica mostrado na Tabela 22 está ilustrado na Figura 12.

Figura 4 - Energia total gerada em função da variação do calor de processo



Fonte: Própria autora.

Apesar de ter ocorrido uma diminuição significativa na vazão da extração da turbina de extração-condensação, que diminuiu 40% do primeiro caso para o último, isso não gerou um aumento significativo na geração de energia na mesma, que só aumentou menos de 1% quando comparado esses mesmos casos.

Esse fato gerou um aumento pequeno na geração de energia total das duas turbinas causado pela otimização.

4.7 OTIMIZAÇÃO 5: IMPACTO DA UMIDADE DO BAGAÇO

A Tabela 23 apresenta os valores de calor de entrada da caldeira calculados de acordo com a Eq. (4), que é a energia fornecida pela a queima do bagaço, e calculada através do poder calorífico inferior mostrado na Tabela 8, considerando a vazão de vapor de 58,33 kg/s.

Tabela 23 - Calor de entrada da caldeira em função do teor de umidade

Teor de Umidade (%)	Calor de entrada da caldeira (kW)
53,15	188.497
52,15	194.270
51,15	200.044
50,15	205.735
49,15	211.591
48,15	217.365
47,15	223.138

Fonte: Própria autora.

As Tabelas 24 e 25 apresentam os resultados da otimização realizada conforme a metodologia descrita anteriormente.

Tabela 24 - Resultados da otimização 5: Impacto da umidade do bagaço

Prop.	Turbina 32 MW			Turbina 15 MW		Saída Caldeira (Ponto 3)
	Entrada (Ponto 4)	2ª Extração (Ponto 10)	Condensação (Ponto 8)	Entrada (Ponto 5)	Escape (Ponto 11)	
Teor de umidade = 53,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0552*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	145,3*	35,2*	530,0	163,4*	530,0
\dot{m} (kg/s)	38,12*	23,00*	15,12*	13,78*	13,78*	51,90*
Teor de umidade = 52,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0566*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	147,1*	35,2*	530,0	163,7*	530,0
\dot{m} (kg/s)	38,42*	21,73*	16,69*	15,07*	15,07*	53,49*
Teor de umidade = 51,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0566*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	149,4*	35,4*	530,0	163,4*	530,0
\dot{m} (kg/s)	38,12*	20,02*	18,09*	16,96*	16,96*	55,1*
Teor de umidade = 50,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0552*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	146,6*	35,8*	530,0	166,3*	530,6
\dot{m} (kg/s)	37,66*	18,29*	19,36*	18,98*	18,98*	56,65*
Teor de umidade = 49,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0566*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	145,0*	35,2*	530,0	169,5*	530,0
\dot{m} (kg/s)	37,05*	16,33*	20,72*	21,21*	21,21*	58,26*
Teor de umidade = 48,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0555*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	146,3*	35,0*	530,0	171,0*	530,0
\dot{m} (kg/s)	37,20*	15,08*	22,12*	22,65*	22,65*	59,85*
Teor de umidade = 47,15%						
P (bar)	68,60	2,45	0,0566*	68,60	2,45	68,60
T (°C)	530,0	147,3*	35,2*	530,0	172,4*	530,0
\dot{m} (kg/s)	38,57*	15,08*	23,49*	22,86*	22,86*	61,44*

* valores alterados devido à otimização.

Fonte: Própria autora.

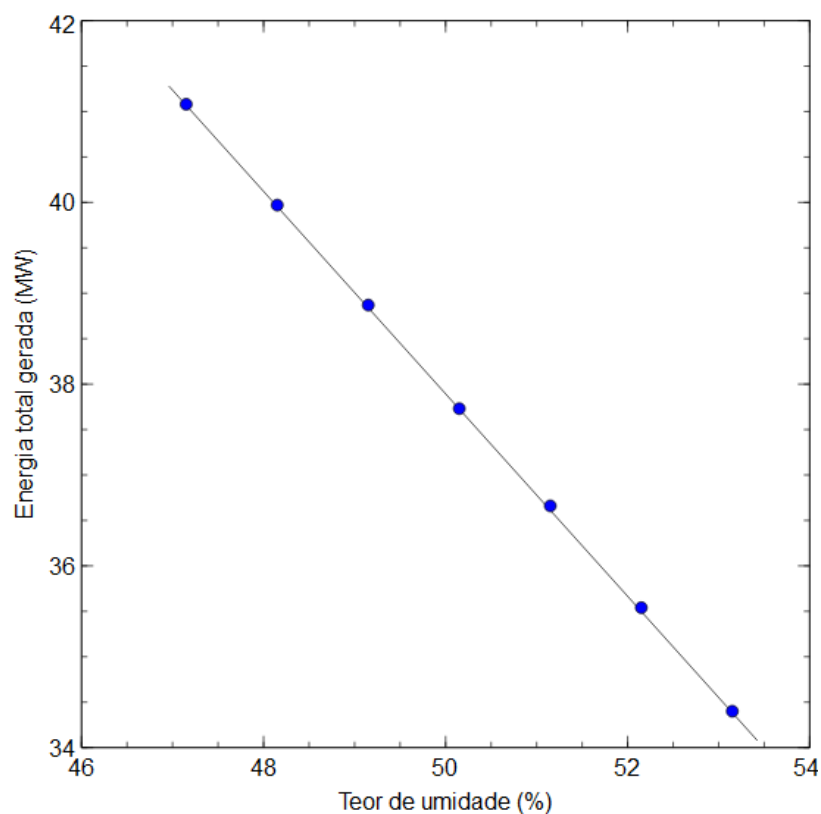
Tabela 25 - Resultados da geração de energia da planta antes e depois da otimização 5: Impacto da umidade do bagaço

Turbina	Energia Gerada base (MW)	Energia Gerada otimização (MW)	Diferença (%)
Teor de umidade = 53,15%			
Extração turbina 32 MW	23,8	26,3	+10,5
Escape turbina 15 MW	10,1	8,1	-19,8
Total	33,9	34,4	+1,47
Teor de umidade = 52,15%			
Extração turbina 32 MW	24,0	26,6	+10,8
Escape turbina 15 MW	11,0	8,9	-19,0
Total	35,0	35,5	+1,43
Teor de umidade = 51,15%			
Extração turbina 32 MW	24,2	26,6	+9,9
Escape turbina 15 MW	12,0	10,0	-16,7
Total	36,2	36,6	+1,10
Teor de umidade = 50,15%			
Extração turbina 32 MW	24,5	26,6	+8,6
Escape turbina 15 MW	13,0	11,1	-14,6
Total	37,5	37,7	+0,53
Teor de umidade = 49,15%			
Extração turbina 32 MW	24,6	26,5	+7,8
Escape turbina 15 MW	13,9	12,4	-10,8
Total	38,5	38,9	+1,00
Teor de umidade = 48,15%			
Extração turbina 32 MW	24,6	26,8	+8,9
Escape turbina 15 MW	14,9	13,2	-11,4
Total	39,5	40,0	+1,27
Teor de umidade = 47,15%			
Extração turbina 32 MW	24,6	27,8	+13,0
Escape turbina 15 MW	15,8	13,2	-16,5
Total	40,4	41,0	+1,49

Fonte: Própria autora.

Aqui o fluxo de vapor da segunda extração da turbina de extração-condensação diminuiu conforme o poder calorífico do combustível aumentou e, como consequência do aumento do poder calorífico do bagaço e da maior energia disponível na caldeira, ocorreu uma maior produção de vapor e massa total no sistema. Devido a isso, ocorre o aumento na geração nas duas turbinas conforme ocorre o aumento do poder calorífico. Esse fato pode ser verificado através da Figura 5.

Figura 5 - Variação da energia gerada de acordo com o teor de umidade do bagaço



Fonte: Própria autora.

De forma semelhante aos outros casos, a otimização indicou como pontos ótimos as configurações em que a primeira turbina teve valores de vazão de entrada de vapor próximos da sua capacidade máxima. O restante do vapor produzido pela caldeira foi conduzido para a turbina de contrapressão. Esse vapor é expandido e o vapor de escape é direcionado diretamente para o processo. Dessa maneira, quanto maior o fluxo de vapor para essa turbina, menor a necessidade de suprimento de vapor para o processo pela turbina de extração-condensação.

Essa menor necessidade de vapor da turbina de extração-condensação é verificada pela diminuição da vazão de vapor da segunda extração, que foi de 23 kg/s para o maior valor de teor de umidade e 15,08 kg/s para o menor valor.

A temperatura média da segunda extração da turbina de extração-condensação foi de 146,7°C, o que é resultado de uma eficiência de 87%. Já para a segunda turbina, a temperatura de saída média foi de 163,5°C para os três maiores teores de umidade, resultado de uma eficiência de cerca de 85% e sofreu um aumento gradativo, para os teores de umidade de 50,15%, 49,15%, 48,15% e 47,15%, chegando a 172,5°C no menor teor de umidade. Para esses últimos casos, a eficiência da turbina foi de em torno de 83%. Esse fato é um dos motivos que explica o porquê de a otimização ter sido mais eficaz nos casos com maiores teores de umidade.

A respeito da condensação da turbina de extração-condensação, a pressão média de saída foi de 0,056 bar, enquanto a temperatura média foi de 35,3°C, valores esses muito próximos da faixa operacional inferior da carta da turbina.

O fluxo de massa \dot{m}_{18} teve valores decrescentes conforme a umidade do bagaço aumentou, saindo de 0,69 kg/s para a umidade de 47,15% para 0,44 kg/s para a umidade de 53,15%. Isso é compatível com o fato de quanto maior o vapor de escape das turbinas, devido a maior massa total do sistema, mais vapor que sai da condensação é necessário para resfriar esse vapor de escape que segue para o processo a aproximadamente 135°C.

Os casos bases foram ajustados para cada valor de teor de umidade, portanto a geração de energia da caldeira era alterada. O valor da extração da turbina de extração-condensação também foi alterado de modo a atender as exigências do processo nos casos bases.

Comparando-se com o efeito da otimização com os casos bases, a turbina de extração-condensação apresentou para todos os casos um aumento na geração de energia, aumento esse que se tornou mais expressivo conforme o teor de umidade do bagaço aumentou. Já para a turbina de contrapressão aconteceu o contrário, ocorrendo em todos os casos uma diminuição da energia elétrica gerada em comparação ao caso base, diminuição essa que também se tornou mais expressiva com o aumento do teor de umidade do bagaço (menor poder calorífico). Essa tendência ocorreu até a umidade de 49,15%, depois disso não foi possível variar a extração mínima da turbina de extração-condensação. Nesses casos, ocorreu um pouco de excesso de vapor de processo e a geração de energia para os casos bases

ficou baixa. No entanto, a geração elétrica total aumentou em relação ao caso base em todos os casos.

O otimizador tem melhores resultados nos casos em que ele tem liberdade de variar a extração da turbina de extração condensação. Em casos em que há muita vazão de vapor total do ciclo, o processo é atendido pelo vapor de escape da turbina de contrapressão e a tendência seria diminuir a extração da turbina de extração-condensação e aumentar a geração de energia, mas isso não pode ocorrer devido as recomendações da carta de operação da turbina.

Nos últimos dois casos em que a melhora devido à otimização voltou a ficar alta é devido à geração de energia da turbina de extração condensação nos casos bases ter ficado praticamente constante enquanto nos casos otimizados sempre ocorreu aumento na geração e melhoras nos resultados.

5. CONCLUSÕES

A otimização gerou melhora na geração de energia em todos os casos em que foi possível realizar modificações nas configurações da planta.

Quanto maior o fluxo de vapor para a segunda turbina (turbina de contrapressão – 15 MW), menor a necessidade de suprimento de vapor para o processo pela primeira turbina (turbina de extração-condensação – 32 MW).

A otimização não mostrou bons resultados para pouca demanda de vapor de processo.

Em todos os casos, a otimização mostrou que é mais vantajoso quando a vazão de entrada da turbina de extração-condensação atinge sua capacidade máxima, sendo o restante do vapor disponível direcionado para a turbina de contrapressão.

Além disso, o otimizador sempre indicou menores temperaturas de saída para a turbina de extração-condensação do que para a de contrapressão, o que causava eficiências maiores e, conseqüentemente, uma maior geração de energia. No fim, a melhoria devido à otimização foi sempre mais expressiva na turbina de extração-condensação.

A otimização indica que os melhores resultados ocorrem quando há o menor valor possível de extração, desde que sejam atendidas as demandas do processo de produção.

Os valores ótimos de condensação da turbina indicados pela otimização são os valores próximos ao limite inferior da faixa de operação da carta da turbina.

No caso em que foi estudado o impacto da variação da umidade do bagaço, a geração elétrica total aumentou em relação ao caso base em todos os casos. A turbina de extração-condensação apresentou aumento na geração de energia, que se tornou mais expressivo conforme o teor de umidade do bagaço aumentou. Na turbina de contrapressão, ocorreu uma diminuição da energia elétrica gerada em comparação ao caso base conforme ocorria o aumento do teor de umidade do bagaço (menor poder calorífico).

A utilização do vapor de escape da turbina de contrapressão para o processo, aliado com a diminuição da extração da outra turbina, gera vantagens na geração de energia elétrica. A aquisição de uma outra turbina com maior capacidade para atender vazões de processo maiores seria vantajosa.

Como sugestão de trabalhos futuros fica a otimização de novas versões dessa planta ou ainda diferentes plantas, a fim de verificar a obtenção de resultados análogos aos obtidos nesse trabalho. Além disso, sugere-se uma análise econômica para verificação da viabilidade das alterações sugeridas.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S. A. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 919-937, 2010.
- AGEITEC. **Energia elétrica**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_131_22122006154842.html. Acesso em: 05 dez. 2019.
- ALBARELLI, J. Q.; ONORATI, S.; CALIANDRO, P.; PEDUZZI, E.; MEIRELES, M. A. A.; MARECHAL, F.; ENSINAS, A. V. Multi-objective optimization of a sugarcane biorefinery for integrated ethanol and methanol production. **Energy**, Stanford, v. 138, n. 1, p. 1281-1290, 2015.
- AKBARI, A. D.; MAHMOUDI, S. M. S. Thermo-economic performance and optimization of a novel cogeneration system using carbon dioxide as working fluid. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 145, p. 265-277, 2017.
- ARSHAD, M.; AHMED, S. Cogeneration through bagasse: A renewable strategy to meet the future energy needs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 54, p. 732-737, 2016.
- BRAND, M. A.; MUNIZ, G. I. B.; QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 35, p. 2581-2588, 2011.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3 ed. Brasília, DF, 2008.
- BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resolução normativa n. 235, de 14 de novembro de 2006**. Brasília, DF, 2006.
- COGEN. **Conceito e tecnologias**. Brasília, DF, 2019. Disponível em <http://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias>. Acesso em: 02 nov. 2019.
- COSTA, C. B. B.; POTRICH, E.; CRUZ, A. J. G. Multiobjective optimization of a sugarcane biorefinery involving process and environmental aspects. **Renewable Energy**, Oxford, v. 96, p. 1142-1152, 2016.
- CREMONEZ, L. F. **Avaliação termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira para diferentes mix de produção**. 2013. 170 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. **Progress in Energy and Combustion Science**, Oxford, v. 30, n. 2, p. 219-230, 2004.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanço energético nacional 2019**: ano base 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2019. 292 p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Energia renovável**: hidráulica, biomassa, eólica, solar e oceânica. Rio de Janeiro, 2016. Acesso em: 19 mar. 2020.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION - FAO. [S. l.], 2020. Disponível em <http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QC/>. Acesso em: 10 abr. 2020.

FIOMARI, M. C. **Análise energética e exergetica de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão**. 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2004.

FONSECA, G. C.; COSTA, C. B.; CRUZ, A. J. Superstructural economic optimization of sugarcane bagasse exploitation in an ethanol distillery connected to Rankine cycle, BIGCC system and second generation ethanol process. *In*: EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED PROCESS ENGINEERING – ESCAPE, 27, 2017. **Anais** [...] Elsevier Masson SAS, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63965-3.50150-1>. Acesso em: 10 abr. 2020.

GARCÍA, R. et al. Biomass proximate analysis using thermogravimetry. **Bioresource Technology**, Essex, v. 139, p. 1-4, 2013.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 46, p. 564-573, 2012.

LACERDA, K. A. **Remodelagem de uma usina sucroalcooleira para incremento da cogeração de energia com aproveitamento do palhico**. 2015. 161 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2015.

LEMOS, E. G. M; STRADIOTTO, N. R. (Orgs.) **Bioenergia**: desenvolvimento, pesquisa e inovação. São Paulo, SP: Editora UNESP, 2012.

LORA, E. E. S; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica**: planejamento, projeto e operação. São Paulo: Interciência, 2004. v. 2.

MORAKABATCHIANKAR, S. et al. **Developing a Multi-Objective Strategic-Tactical Optimization Model for Sustainable Production Supply Chains Considering Electricity Cogeneration : Sugar Cane Bioenergy Industry**. [S. l.] Elsevier Masson SAS, 2017. v. 40.

MITCHELL, M. **An introduction to genetic algorithms**. 5. ed. London: MIT, 1996.

MOREIRA, J. R.; GOLDEMBERG, J. The alcohol program. **Energy Policy**, Guildford, v. 27, n. 4, pp. 229-245, 1999.

NOVACANA. **O setor sucroenergético visto a partir de 12 mapas do IBGENOVACANA.** [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/setor-sucroenergetico-12-mapas-ibge-240718>. Acesso em: 08 ago. 2019.

NOVACANA. **Aspectos do plantio da cana-de-açúcar.** [S. l.: s. n.], 2019a. Disponível em: <https://www.novacana.com/cana/aspectos-plantio-cana-de-acucar>. Acesso em: 08 ago. 2019.

NOVACANA. **Cana-de-Açúcar: tudo sobre esta versátil planta.** [S. l.: s. n.], 2019b. Disponível em: <https://www.novacana.com/cana-de-acucar>. Acesso em: 11 ago. 2019.

NOVACANA. **Uso da palha da cana para produzir etanol gera risco ao meio ambiente, diz pesquisa.** [S. l.: s. n.], 2019c. Disponível em <https://www.novacana.com/n/cana/plantio/uso-palha-cana-produzir-etanol-gera-risco-meio-ambiente-190819>. Acesso em: 06 dez. 2019.

NOVACANA. **Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira.** [S. l.: s. n.], 2019d. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/cogeracao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 15 set. 2019.

PASSOLONGO, R. **Avaliação termodinâmica, termoeconômica e econômica da integração de sistemas de gaseificação da biomassa em uma usina sucroalcooleira.** 2011. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

PELLEGRINI, L. F.; JUNIOR, S. D. O. Combined production of sugar, ethanol and electricity : Thermo-economic and environmental analysis and optimization. **Energy**, Oxford, v. 36, n. 6, p. 3704-3715, 2011.

PEREA, L. A.; SERAPHIM, O. J.; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação de sistemas de manejo de palhico de cana-de-açúcar no campo e na indústria. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 2012, p. 89-108, 2012.

POGGIALI, F. S. J. **Desempenho de microconcretos fabricados com cimento portland com adições de cinza de bagaço de cana-de-açúcar.** 2010. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RAO, S. S. **Engineering optimization: theory and practice.** 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

REIN, P. **Engenharia do açúcar de cana.** Berlin: Bartens, 2013.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. (Orgs.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira.** Campinas: Editora da Unicamp, 2005.

SAFDER, U.; IFAEI, P.; YOO, C. Multi-objective optimization and flexibility analysis of a cogeneration system using thermorisk and thermoeconomic analyses. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 166, p. 602-636, 2018.

SANTOS, P. S. B. **Potencialização da cogeração de energia em uma usina sucroenergética por meio do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar, eletrificação de acionamentos e redução da umidade do bagaço**. 2017. 429 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. **Energy Policy**, Guildford, v. 39, n. 1, p. 421-428, 2011.

SECRETÁRIA DO MEIO AMBIENTE. **Cadernos de educação ambiental: etanol e biodiesel**. 2. ed. São Paulo: [s. n.], 2014.

SILVA, D. A. L.; DELAI, I.; MONTES, M. L. D.; OMETTO, A. R.; Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 32, p. 532-547, 2014.

SIMTECH. **IPSEpro Documentation**. [S. l.: s. n.], 1993-2003.

SINGH, Y. D.; MAHANTA, P.; BORA, U. Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production. **Renewable Energy**, Oxford, v. 103, p. 490-500, 2017.

THÉVENIN, D; JANIGA, G. **Optimization and Computational Fluid Dynamics**. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2008.

TROMBETA, N. C.; FILHO, J. V. C. Potencial e Disponibilidade de Biomassa de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, Brasília, DF, v. 55, n. 3, p. 1-18, 2017.

OLIVEIRA, L. F. **Secagem de bagaço de cana em um secador ciclônico**. 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

UDOP. **O que é Pol e Brix**. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2006/08/09/o-que-e-pol-e-brix.html>. Acesso em: 09 abr. 2020.

UNICA. **A bioeletricidade da cana**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://unica.com.br/wp-content/uploads/2019/07/UNICA-Bioeletricidade-julho2019-1.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

WANG, Q.; WU, W.; HE, Z. Thermodynamic analysis and optimization of a novel organic Rankine cycle- based micro-scale cogeneration system using biomass fuel. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 198, n. July, 2019.