



ESTUDO PARA OTIMIZAÇÃO DO BALANÇO TÉRMICO DE VAPOR DE UMA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

L. M. F. LEITE¹, E. A. P. DE LIMA², A. C. CHESCA³

^{1,2,3} Universidade de Uberaba, PPGEQ da Universidade de Uberaba - UNIUBE

RESUMO – *A biomassa da cana de açúcar possui grande potencial energético, o trabalho traz uma explanação do cenário energético brasileiro a partir de biomassa. Apresenta-se a partir deste o balanço térmico de vapor aplicado sobre os processos de geração de energia e produção de açúcar e etanol, priorizando a máxima exportação de energia da planta industrial admitindo-se vazões nominais de produção de vapor a partir de caldeiras de alta pressão. Também são exploradas diferentes modelos de operação de turbo geradores e avaliados métodos alternativos para aproveitamento de entalpias perdidas nos processos.*

1. INTRODUÇÃO

Desde 2001, ano em que o país viveu a pior crise energética de sua história, motivada pela falta de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas e, principalmente, pela diminuição dos investimentos na infraestrutura de distribuição de energia, o governo busca meios de incentivo a novas fontes de energia elétrica, como usinas termelétricas, que fazem uso de biomassa para geração de eletricidade. A Cogeração é o processo de produção estabelecido entre a combinação de calor útil e energia mecânica ou elétrica a partir da energia química disponibilizada por determinado combustível, como a biomassa.

O setor sucroalcooleiro está entre os principais geradores de energia a partir de biomassa. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel, o bagaço de cana de açúcar é atualmente a fonte energia de origem da biomassa mais utilizada no Brasil, representando a fatia de 78,28%, com 11.020.810 KW de capacidade elétrica distribuída em 397 usinas geradoras, outras fontes de geração alternativas são biogás, lenhas, casca de arroz, óleos vegetais, dentre outros. A energia gerada por estas indústrias possui a finalidade de abastecer o consumo próprio e, sua grande maioria, ofertam a concessionárias. A Figura 1 mostra a distribuição de fontes de energia no Brasil, em seguida, a Figura 2 representa a matriz energética brasileira oriunda de biomassa.

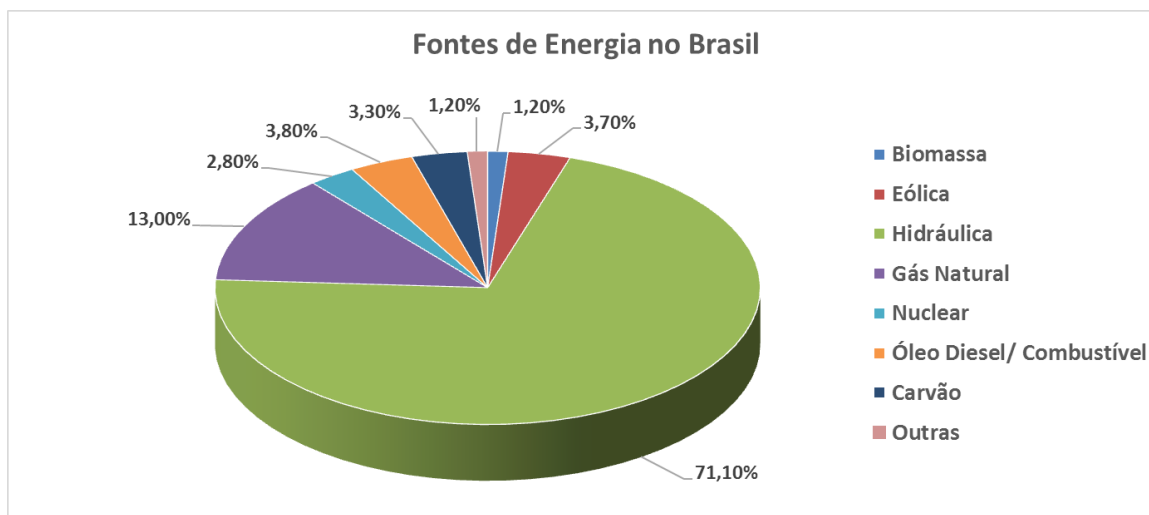


Figura 1 – Fontes de Energia no Brasil.
Fonte: Aneel – Maio 2017

Matriz Energética Brasileira - Biomassa					
Origem	Fonte	Capacidade instalada		Total	
		Nº de usinas	KW	Nº de usinas	KW
Agroindustriais	Bagaço da Cana de Açúcar	397	11.020.810	415	11.133.665
	Biogás - AGR	3	1.822		
	Capim Elefante	3	65.700		
	Casca de Arroz	12	45.333		
Biocombustíveis Líquidos	Etanol	1	320	3	4.670
	Óleos Vegetais	2	4.350		
Floresta	Carvão Vegetal	7	41.197	86	2.817.348
	Gás auto forno - Biomassa	10	114.265		
	Lenha	2	14.650		
	Licor Negro	17	2.261.136		
	Resíduos Florestais	50	386.100		
Resíduos Animais	Biogás - RA	11	2.099	11	2.099
Resíduos Sólidos Urbano	Biogás - RU	15	114.680	16	117.380
	Carvão - RU	1	2.700		

Figura 2 – Matriz Energética Brasileira - Biomassa.
Fonte: Aneel – Maio 2017



Entre os fatores que destacam a biomassa da cana de açúcar na expansão do setor energético é possível citar:

- Reaproveitamento dos resíduos do processo de produção de açúcar e álcool como combustível
- A cana de açúcar compõe a cultura agrícola do país
- Poluição ambiental relativamente baixa
- Reaproveitamento dos resíduos do processo de produção de açúcar e álcool como combustível
- Aumento da eficiência energética das plantas com sistema de cogeração
- Autossuficiência em energia elétrica, tendo em vista a venda do excedente para o sistema elétrico nacional
- Custos de implantação menores em comparação com outras fontes de energia

Há algum tempo, o cenário das indústrias sucroalcooleiras se restringia a produção de açúcar e álcool, tendo as centrais de geração pouco eficientes e com capacidade de gerar apenas a energia necessária para o seu consumo interno. Hoje, com projetos de caldeiras cada vez mais sofisticados, com alta eficiência operando em altos níveis de pressão e temperatura, resultando em um maior potencial energético as usinas sucroalcooleiras passam a ser chamadas de sucroenergéticas, levando a energia elétrica a se tornar um dos principais produtos das usinas.

Sob um outro ponto vista, a produção de vapor nas indústrias sucroenergéticas vai além da geração de energia, nas usinas produtoras de açúcar e álcool o vapor é utilizado como insumo fundamental e única fonte de calor responsável pelo balanço térmico.

1.1 Distribuição de consumo de vapor na indústria sucroalcooleira

A fabricação de açúcar, etanol e geração de energia requer em seu processo a utilização de vapor de água, sob determinadas condições de pressão e temperatura, para o perfeito balanço térmico.

A Figura 3 mostra, na forma de fluxograma, os principais processos que utilizam vapor de água.

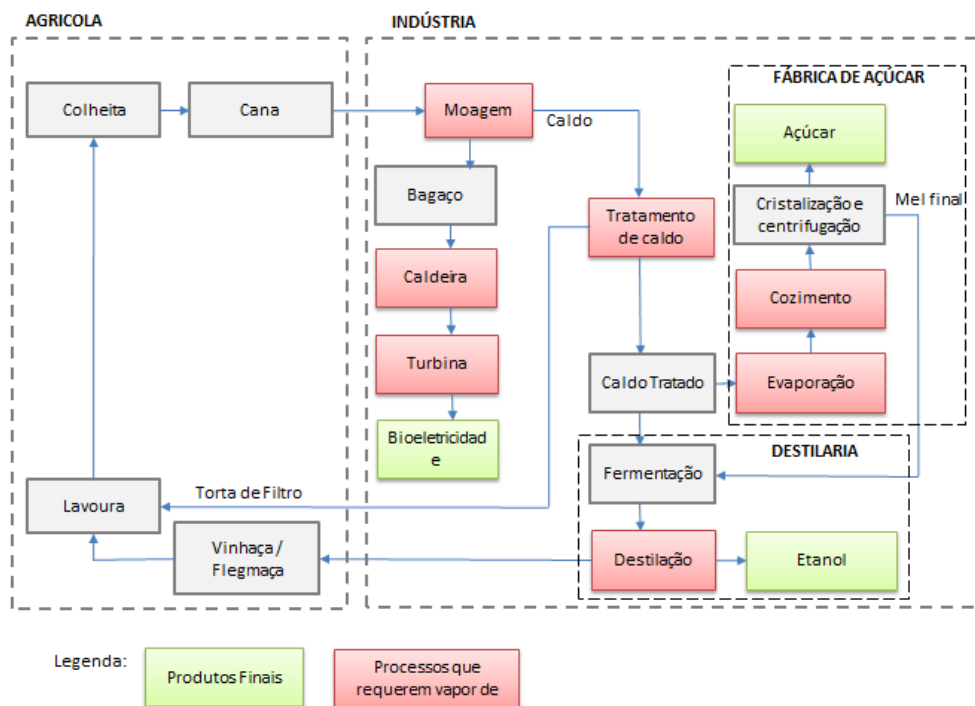


Figura 3 – Fluxograma básico de uma usina sucroalcooleira

Fonte: Usina Sucroenergética localizada no sudeste do Brasil alvo deste estudo de caso – Novembro 2017

De um modo geral, os setores que requerem vapor de água em seus processos são Moenda (no caso de acionamento por turbinas à vapor), Tratamento de caldo, Cozimento, Evaporação, Destilação e Turbinas geradoras. Desta forma, todo o vapor gerado pela caldeira é consumido nestes processos.

Para calcular consumo específico o de vapor na indústria deve-se levar em consideração fatores como modernidade dos equipamentos utilizados, produtos finais produzidos, capacidade instalada, características peculiares de cada equipamento entre outros fatores.

Entre os setores responsáveis pelos maiores consumos de vapor de água da indústria, destacam-se Turbinas e Moenda a vapor.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi realizado a partir dos dados de uma indústria sucroalcooleira da região Sudeste do Brasil, com o objetivo de mensurar a demanda produção e consumo de vapor da indústria, priorizando a máxima geração de energia elétrica, considerando dois cenários de operação:

1. Turbina operando no modo extração



2. Turbina operando no modo condensação

Em uma segunda etapa, foi analisado possíveis formas de otimização de reaproveitamento do calor gerado.

2.1 Configuração da planta industrial – Setores consumidores de vapor

- Caldeiras

Duas caldeiras foram projetadas para gerar vapor superaquecido em alta pressão e temperatura, a fim de se suprir a demanda de vapor requerida para geração de energia elétrica nos turbo geradores e nos processos de fabricação de açúcar e álcool, sendo uma caldeira aquatubular do tipo leito fluidizado – 67 Kgf/cm² - e uma caldeira aquatubular tipo grelha basculante – 42 Kgf/cm²

As caldeiras são alimentadas com água a aproximadamente 120°C sendo que, para atingir tal temperatura, antes da entrada na caldeira, a água passa por um sistema de pré aquecimento, realizado a partir do contato prévio com vapor saturado dentro do Desaerador, equipamento responsável pela eliminação de gases na água.

A caldeira de leito fluidizado, ao contrário da caldeira de grelha basculante, é produtora e consumidora de vapor, pois requer em sua operação vapor saturado, utilizado nos Pre Aquecedores, responsáveis pelo aquecimento de ar na entrada da caldeira, e Regenerativos, responsáveis pelo pré aquecimento de água da caldeira.

- Turbo geradores

Operando com dois turbo geradores, sendo uma turbina de contrapressão – Turbina 01 - e uma turbina de extração e condensação – Turbina 02 -, a usina produz energia suficiente para consumo interno e exportação/venda.

As turbinas utilizadas pela empresa são classificadas em dois tipos:

- ✓ Turbina 01: Turbina de Contrapressão: O vapor expandido na turbina sai acima da pressão atmosférica e é utilizado no processo.
- ✓ Turbina 02: Turbina de Condensação e Extração: Este modelo de turbina permite que sua operação seja realizada de duas formas distintas, sendo ‘Condensação’, quando o vapor fornecido pela turbina sai abaixo da pressão atmosférica e condensa em equipamentos à vácuo, e ‘Extração’, quando parte do vapor utilizado deixa a turbina entre a sua entrada e a saída, onde um conjunto de válvulas regula o fluxo para a seção de exaustão, mantendo a extração de vapor na pressão requerida pelo processo.

As turbinas são responsáveis pelo maior consumo de vapor da planta, contudo, também são grandes fornecedoras vapor, gerando vapor de escape, ou vapor de descarga. Este vapor é interligado à



linha de consumo do processo industrial.

- Fabricação de açúcar e etanol

O processo de fabricação de açúcar e etanol inicia-se na moenda, processo em que a cana é esmagada para extração do caldo, gerando como resíduo o bagaço da cana, este por sua vez é utilizado como combustível nas caldeiras para geração de vapor.

Na fábrica de açúcar o setor de tratamento de caldo é responsável pela clarificação do caldo, utilizando em seu processo aquecedores tubulares de troca térmica para elevação da temperatura. O caldo aquecido é direcionado aos decantadores, onde passa por um processo de degasagem por meio de um balão flash. Nos processos subsequentes, Evaporação e Cozimento, o vapor é utilizado nas caixas de evaporação e cozedores para a concentração do caldo e cristalização do açúcar. Ainda no processo de Evaporação, o vapor extraído do caldo, chamado de 'vapor vegetal' é, em parte, reaproveitado no próprio processo de fabricação de açúcar e etanol, como caixas de evaporação, aquecedores, aparelhos de destilação entre outros, o excedente deste vapor é condensado. Deste montante, parte é aproveitado no processo de extração das moendas para embebição e outra parte é direcionado a uma torre de resfriamento para utilização geral.

Por fim, a Destilaria, setor responsável pela produção de etanol, é composta por quatro aparelhos de destilação, os quais utilizam vapor vegetal em trocadores de calor e nas próprias colunas de destilação. O processo produz como subproduto a vinhaça a uma temperatura de 105°C, sua entalpia é reaproveitada na troca de calor com o vinho, matéria prima para a destilação, também é utilizada na irrigação de lavouras após passar por um processo de resfriamento em torres.

A Figura 4 apresenta o fluxograma de distribuição de vapor dentro da planta industrial, as correntes de vapor são representadas por:

- ✓ F1: Corrente de produção de vapor da caldeira de leito fluidizado
- ✓ F2: Corrente de produção de vapor da caldeira de grelha basculante
- ✓ F: Corrente total de produção de vapor
- ✓ C1: Corrente de consumo de Vapor para as caldeiras: regenerativo, pré-aquecedores e desaeradores.
- ✓ C2: Corrente de consumo de Vapor para a turbina 01 de geração de energia
- ✓ C3: Corrente de consumo de Vapor para a turbina 02 de geração de energia
- ✓ C4: Corrente de consumo de Vapor para as turbinas de acionamento da moenda
- ✓ C5: Corrente de consumo de Vapor para a fábrica de açúcar



- ✓ C6: Corrente de consumo de Vapor para a destilaria
- ✓ R1: Corrente reciclo de vapor da turbina 01 de geração de energia
- ✓ R2: Corrente reciclo de vapor da turbina 02 de geração de energia
- ✓ R3: Corrente reciclo de vapor da turbina de acionamento da moenda
- ✓ R: Corrente reciclo total gerado pelas turbinas de geração de energia e turbinas de acionamento da moenda utilizado, principalmente, na destilaria.

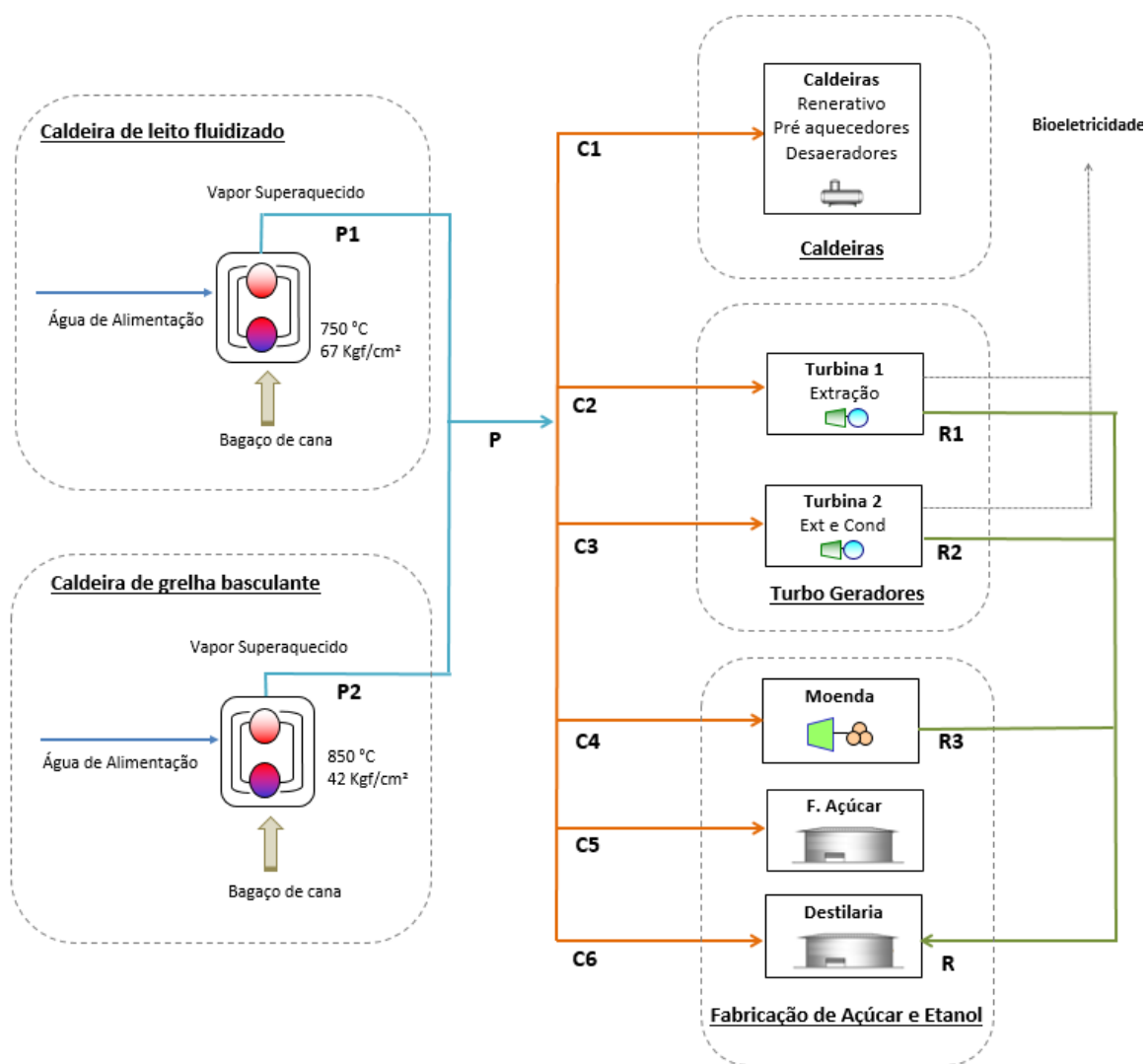


Figura 4 – Fluxograma de distribuição de vapor em uma indústria sucroalcooleira
Fonte: Usina Sucroenergética localizada no Sudeste do Brasil alvo deste estudo de caso –
Novembro 2017



2.2 Premissas do estudo

A Tabela 1 apresenta as premissas do processo industrial utilizadas como base para o estudo de caso.

Tabela 1 – Dados Agrícolas e Industriais

Dados Agrícola e Industrial	
Moagem	21.000 Ton
Produção de Açúcar	50.000 Sacas
Produção de Etanol	543.000 L
Produção de bagaço	256 Kg/ ton cana
Produção nominal caldeiras (Σ)	480 ton/ hora
Produção média de Etanol/ dia	543.000 L
Consumo médio vapor Destilaria	3 Kg vapor/ L Etanol

A Tabela 2 mostra o desempenho das turbinas em potência elétrica e energia total possível de ser gerada.

Tabela 2 – Configuração Turbinas Turbo Geradoras

Configuração Turbinas Turbo Geradoras	
Turbina de Contrapressão	
Vazão de vapor entrada (t/h)	300
Vazão de vapor saída (t/h)	200
Potência (MW/h)	70
Turbina de Condensação	
Vazão de vapor entrada (t/h)	300
Vazão de vapor saída (t/h)	0
Potência (MW/h)	57



2.3 Balanço de massa

A partir dos dados coletados no processo industrial foi realizado o balanço de massa do regime de operação da usina considerando as premissas citadas na Tabela 2 nos dois cenários possíveis: Operação da turbina 2 no modo extração e operação da turbina 2 no modo condensação.

Foi realizado um acompanhamento nos setores que demandam vapor em seu processo e levantado os dados de consumo de cada um, bem como o setor de produção de vapor, a caldeira. A Tabela 3 apresenta o resultado das informações coletada em campo.

Tabela 3 – Configuração Turbinas Turbo Geradoras

Vazão de vapor consumido total (T/h)	
Caldeiras	94
Corrente C1 – Regenerativo e Pré Aquecedores	30
Corrente C1 – Desaeradores	52
Turbo geradores	380
Corrente C3 – Turbina 01	80
Corrente C4 – Turbina 02	300
Fabricação de Açúcar e Etanol	410
Corrente C5 – Fábrica de Açúcar	213
Corrente C6 – Destilaria	67
Corrente C7 – Moenda	130
Vazão de vapor gerado total (T/h)	
Corrente F1 – Caldeira Leito Fluidizado	330
Corrente F2 – Caldeira Grelha basculante	150
Corrente F - Total Gerado	480
Vazão de vapor de reciclo (T/h)	
Turbina 01 – Contrapressão	80
Turbina 02 – Extração e Condensação	-
Cenário 01: Operação em modo ‘Extração’	200
Cenário 02: Operação em modo ‘Condensação’	0
Moenda	130
Cenário 01: Operação em modo ‘Extração’	410
Cenário 02: Operação em modo ‘Condensação’	210

A Figura 5 apresenta a configuração do balanço geral de massa, representando a entrada total de vapor (corrente P), saídas de vapor (correntes C) e reciclos totais.

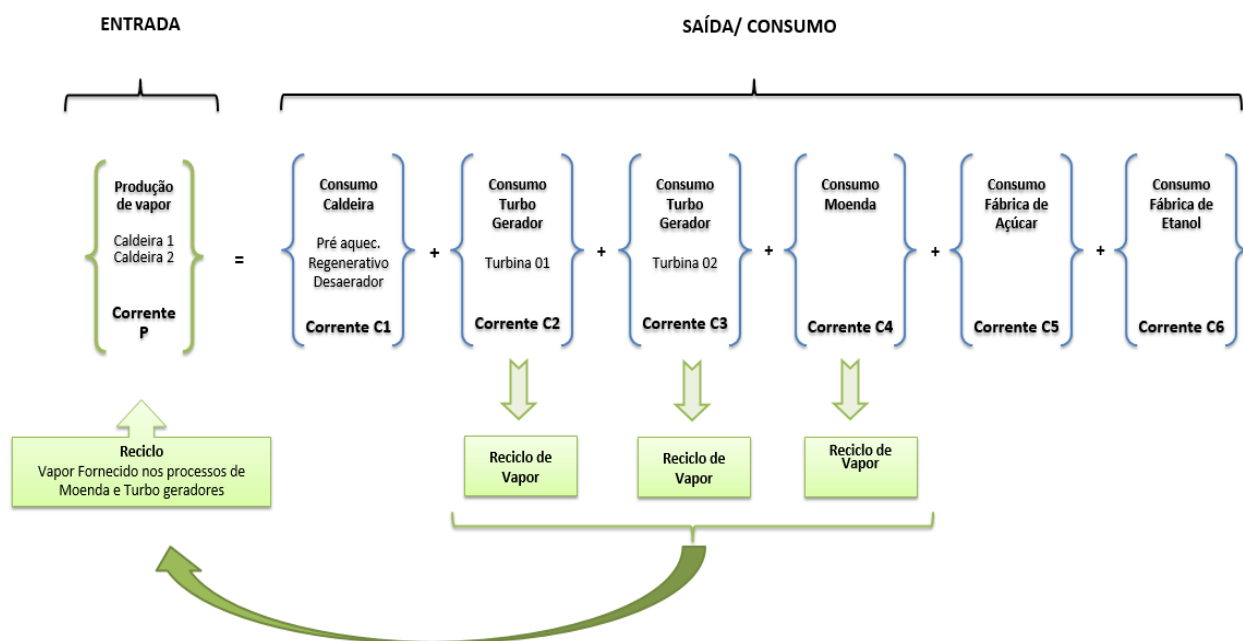


Figura 5 – Fluxograma geral do balanço de massa de vapor.

Fonte: Usina Sucroenergética localizada no Sudeste do Brasil alvo deste estudo de caso – Novembro 2017

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados coletados em processo, partindo do princípio de se manter a máxima geração de energia, assume-se um consumo fixo de vapor de 474 ton para manutenção da caldeira e turbo geradores, distribuídos em 94 ton/hora para os Desaeradores, Regenerativos e Pré aquecedores de ar e 380 ton/hora nos turbo geradores 01 e 02.

O vapor consumido pelo processo de fabricação de açúcar e etanol, em condições normais de moagem – premissas contidas na planilha 02 – se manteve em 354 ton/hora.



- Cenário 01 – Turbina no modo “extração”

A Figura 6 mostra o balanço de massa admitindo-se a operação da turbina no modo “extração”. Neste modo, a turbina trabalha com um reciclo de vapor de 200 ton/h, representando, no balanço geral, um reciclo total de 410 ton/h.

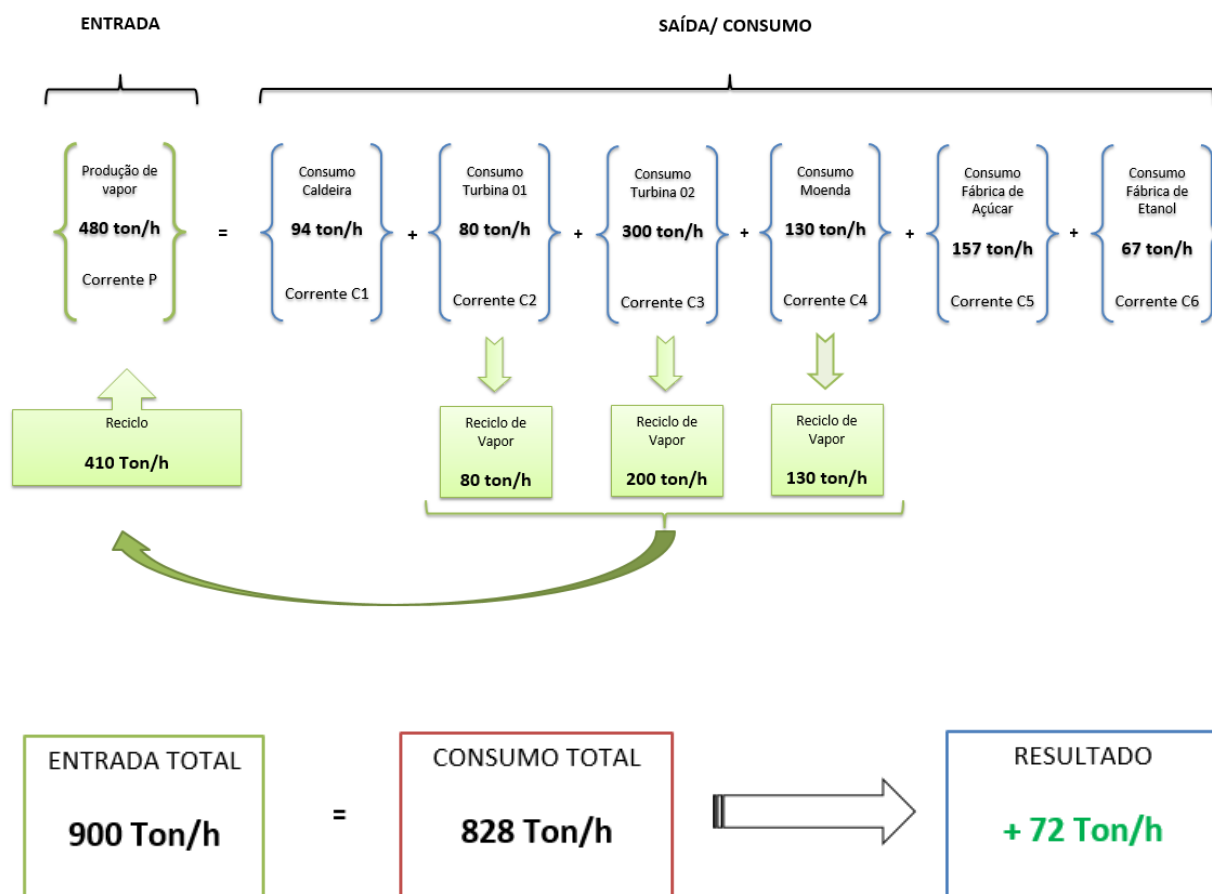


Figura 6 – Fluxograma do balanço de massa de vapor – Turbina operando em modo “extração”
Fonte: Usina Sucroenergética localizada no Sudeste do Brasil alvo deste estudo de caso –
Novembro 2017

- Cenário 02 – Turbina no modo “condensação”

A Figura 7 apresenta o balanço de massa admitindo-se a operação da turbina no modo “condensação”. Neste modo a turbina trabalha com taxa de reciclo de vapor zerada, restringindo a vazão total de reciclo a 210 ton/h, sendo 80 ton/h proveniente da turbina 01 de extração e 130 ton/h proveniente das turbinas da moenda.

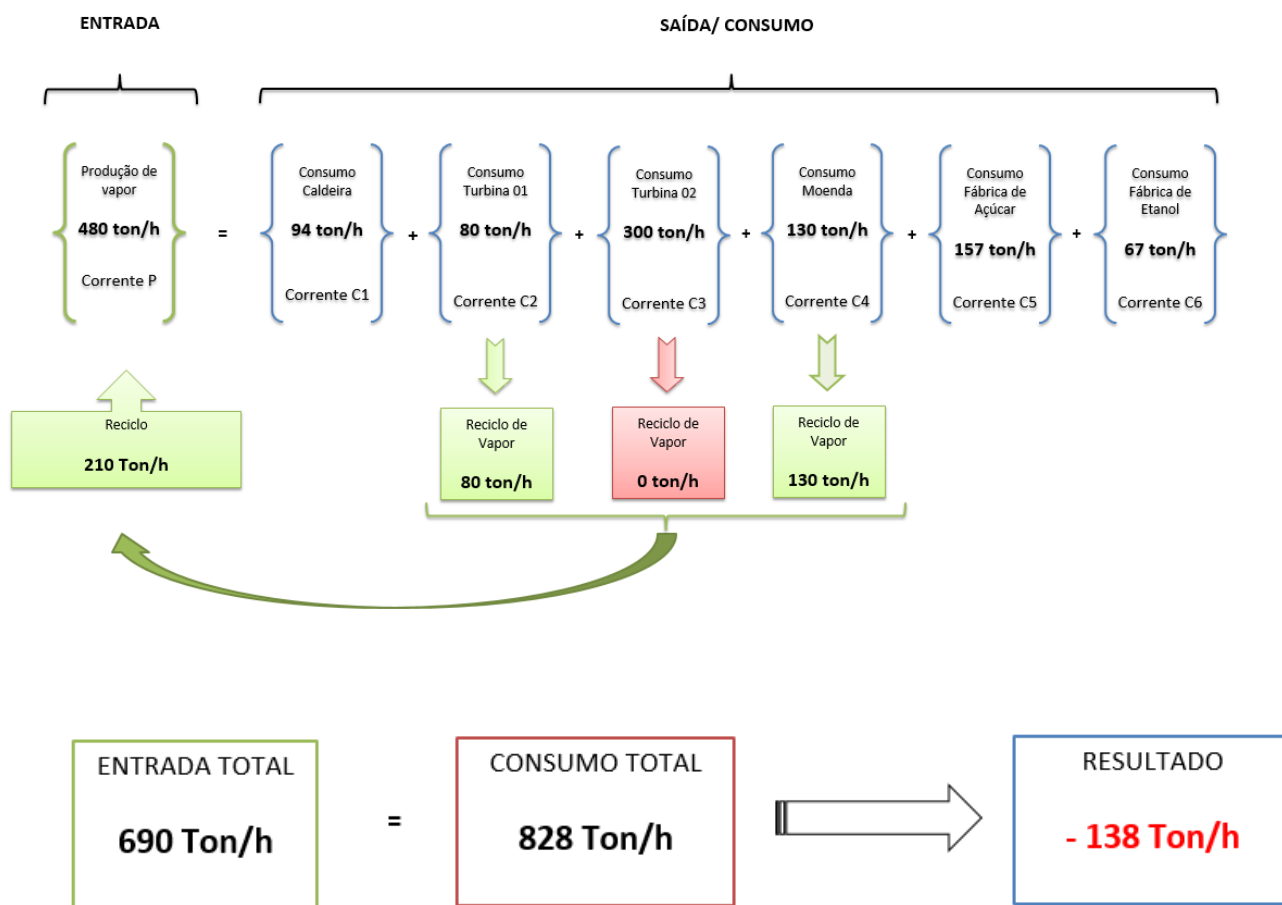


Figura 7 – Fluxograma de distribuição de vapor em uma indústria sucroalcooleira
Fonte: Usina Sucroenergética localizada no Sudeste do Brasil alvo deste estudo de caso – Novembro 2017



A turbina 02, quando operando no modo ‘extração’ - cenário 02 - gera sozinha a quantidade de 210 toneladas de vapor por hora, quantidade próxima à requerida para os processos de fabricação de açúcar e destilaria.

Analisando os dados observa-se que a vazão de vapor necessária para operação da planta industrial, considerando as premissas da Tabela 01, é de 828 ton/hora, enquanto o vapor de entrada, gerado pelas caldeiras mais o vapor de reciclo, se mostrou divergente em ambos os cenários de operação da turbina 02, sendo que no modo ‘extração’ obteve-se uma vazão de vapor disponível de 900 ton/hora, enquanto no modo ‘condensação’ a vazão de vapor foi de 690 ton/hora.

4. CONCLUSÃO

Ao realizar o balanço de consumo contracenando com a capacidade de produção de vapor foi verificado que, com as caldeiras operando em sua vazão nominal e admitindo variáveis de operação conforme premissas estabelecidas na Tabela 01, a demanda total de vapor pela planta industrial só é suprida quando assume-se operação do turbo gerador 02 no modo ‘extração’, em que a turbina extrai mais vapor do que condensa – 200 ton/h de vapor extraído para 100 ton/h de condensado, desta forma o valor total de reciclo para a planta representa 900 ton/hora, vindos dos processos de Moenda, Turbo Gerador 01 e Turbo Gerador 02. No modo de operação do turbo gerador 02 em ‘condensação’, todo o vapor de entrada da turbina é condensado, restringindo o reciclo de vapor para a planta em apenas 690 ton/ hora – reciclo de moenda e turbo gerador 01 – valor inferior ao requerido pela planta - 828 ton/h –, com um déficit de 138 ton/hora.

É importante ressaltar que diferentes condições do processo influenciam diretamente no consumo de vapor dos setores, desta forma, a depender das premissas de moagem, como quantidade e qualidade de cana esmagada, vazão de caldos, produções entre outros, o balanço térmico sofrerá modificações impactando diretamente no consumo e, conseqüentemente, taxa de retorno de vapor para a planta, gerando um desequilíbrio no balanço térmico da planta, podendo levar à falta ou sobra de vapor.

Um levantamento realizado sobre a produção de vapor na a safra 2017 mostrou que as caldeiras operaram 36% do tempo com a vazão de produção de vapor acima da capacidade instalada, indicando oscilações no processo que ocasionaram a insuficiência de vapor. Os impactos gerados a partir de tal operação podem causar grandes danos a caldeira, turbo geradores e demais instalações que integram o sistema com arraste de água, gerando incrustações e rompimentos em tubulações.

A Figura 8 apresenta a vazão de vapor diária do período de safra de 2017 – abril a novembro.

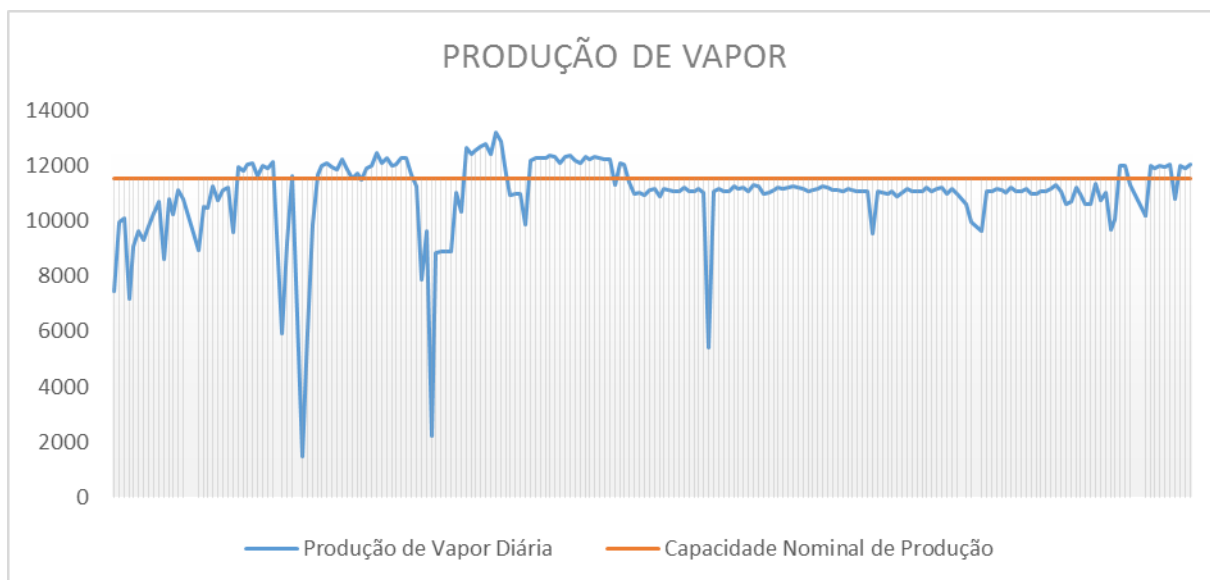


Figura 8 – Produção de Vapor - Safra 2017

Ao analisar os processos de fabricação de açúcar e etanol verifica-se a existência de pontos de perdas de entalpia, abrindo oportunidade para um estudo de otimização do balanço térmico da usina. Foram identificados os seguintes pontos para realização de um estudo de ganho térmico:

- ✓ Reaproveitamento do vapor de degasagem do balão flash dos decantadores
- ✓ Reaproveitamento dos condensados de vapores vegetais das últimas caixas de evaporação
- ✓ Reaproveitamento da vinhaça em trocadores de calor ou operações afins.
- ✓ Pequenas melhorias com foco em vazamentos de vapor
- ✓ Melhorias com foco em vazamentos de vapor em tubulações e equipamentos

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ROCHA, G. Análise termodinâmica, termoeconômica e econômica de uma usina sucroalcooleira com processos de extração por difusão. 2010. 150f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira

FILHO, P. L. D. Análise de custos na geração de energia com bagaço de cana de açúcar: um estudo de caso em quatro usinas de São Paulo. 2009. 175f. Tese (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo.



SANTOS, F. A. Análise da aplicação da biomassa da cana como fonte de energia elétrica: Usina de açúcar, etanol e bioeletricidade. 2012. 127f. Tese (Mestrado em Engenharia), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Boletim de informações gerais – Junho de 2017