

Integração térmica entre Evaporação de Múltiplo Efeito e Turbina a Vapor em Usinas de Açúcar e Álcool

L.M.C. Silva¹, M. Higa²

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (luancastilho11@gmail.com)

²Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil

O trabalho se dedica à proposição de um modelo para maximização da geração elétrica em usinas de cana de açúcar através de novos arranjos industriais envolvendo Evaporação de Múltiplo Efeito (EME) e ciclo de potência. Tomando como base uma planta real do setor e utilizando software Engineering Equation Solver (EES), os balanços de massa e energia do processo (1ª Lei da Termodinâmica) foram aplicados e as irreversibilidades térmicas existentes identificadas por meio da 2ª Lei da Termodinâmica.

Palavras-chave: Cogeração; Usinas de Açúcar e Álcool; Evaporação; Engineering Equation Solver.

INTRODUÇÃO

Atualmente, é evidente que as energias renováveis melhoram a cadeia energética a longo prazo e reduzem a dependência dos recursos fósseis (Arabkoohsar e Sadi, 2021). A bioeletricidade gerada a partir da cana-de-açúcar é a 4ª fonte mais importante da matriz elétrica brasileira, mesmo aproveitando apenas 15% do potencial da biomassa presente nos canaviais, sendo que teria potencial técnico para chegar a 148 mil GWh, o que representaria atender mais de 30% do consumo de energia no Sistema Integrado Nacional. No ano de 2020, a produção de bioeletricidade de cana foi de 22,6 mil GWh, representando 82% de toda a geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil (Souza, 2022).

Uma usina de açúcar e álcool ao receber a cana de açúcar processa a mesma através da moagem para que ocorra a separação da fibra (bagaço) e do caldo. Com o bagaço fornecido por meio do esmagamento da cana, as caldeiras geram o vapor primário que é fornecido às turbinas, gerando potência para o acionamento dos geradores de energia elétrica, assim como para equipamentos na moenda e bombeamento dos fluidos (através de turbobombas). Com a perda de entalpia após o acionamento das turbinas, o vapor de saída destas dá origem ao vapor de baixa pressão (secundário), o qual será utilizado no processo industrial, alimentando aquecedores, pré evaporadores, caixas evaporadoras, cozimento do xarope, fermentação e destilação e resultando na produção de etanol anidro, etanol hidratado e açúcar VHP. Diante disso, estabelece-se que no caso da cogeração, a maximização da geração elétrica excedente depende do consumo de vapor do processo e, portanto, é essencial em qualquer forma de geração de potência o atendimento da demanda térmica no processamento do caldo para a produção de açúcar e

etanol; formando assim uma relação de interdependência entre a geração de potência e a integração térmica (Higa, 2003).

Para que essa nova fonte de rentabilidade pudesse ser maximizada, novos estudos para aumento da eficiência energética através da integração térmica e consequente potencialização da cogeração têm sido realizados. Muitos deles incidem sobre a evaporação do caldo extraído da cana de açúcar, já que este é o processo crucial, tanto para a cogeração, quanto para suprir a demanda de vapor do processo industrial, visto que o rebaixamento de pressão dele ocorre nesta fase.

O presente trabalho se dedica à proposição de um modelo para aumento da produção de energia elétrica a partir da integração térmica entre um sistema de Evaporação de Múltiplos Efeitos (EME) e um ciclo de potência para geração desta energia. Para isso são propostos rearranjos no circuito de vapor de uma usina sucroalcooleira composto por duas caldeiras de baixa pressão (21 kgf/cm²) e seis turbinas com potências variadas, com aproveitamento energético de seus respectivos vapores de escape nos efeitos da EME.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho propõe-se a estabelecer um modelo utilizando a estrutura já existente de uma usina de açúcar e etanol no norte do Paraná composta por duas caldeiras de baixa pressão, seis turbinas de contrapressão e um sistema de Evaporação de Múltiplo Efeito.

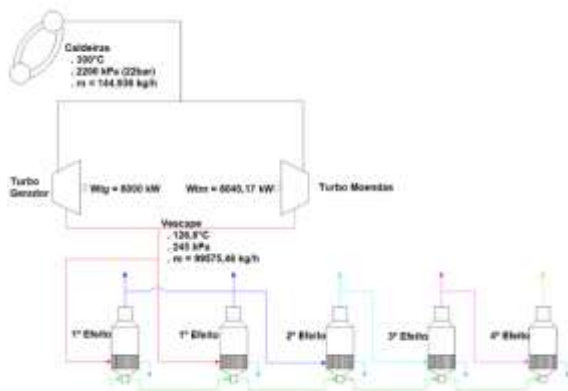


Figura 1. Integração ciclo de potência e EME da planta estudada

Por meio da utilização de dados do sistema de operação atual da EME com quatro efeitos da usina objeto de estudo deste trabalho, serão analisadas diversas variáveis como consumo de bagaço, produção de vapor da caldeira, quantidade de vapor de exaustão da turbina, consumo de vapor pelo processo industrial e, a partir desse cenário, a quantidade de vapor disponível para geração de energia elétrica.

O software Engineering Equation Solver (EES), será utilizado para a realização dos balanços de massa e de energia do sistema de Evaporação de Múltiplo Efeito a fim de descobrir o consumo do vapor de escape (250 kPa) utilizado na retirada de água do caldo e consequentemente o aumento da concentração de sólidos no mesmo. Também será realizado o balanço de massa e de energia do sistema de cogeração composto por todas as turbinas da planta industrial (geração e moendas), sendo analisadas, inicialmente, a demanda de vapor de média pressão nas caldeiras a fim de abastecer de maneira satisfatória a EME. Dessa forma, com o rendimento das turbinas já conhecidos, chega-se à quantidade de energia elétrica gerada pela turbina que aciona o gerador elétrico.

Os modelos matemáticos utilizados na simulação da integração térmica são obtidos dividindo os sistemas considerados em vários volumes de controle, aplicando-se os balanços de massa (Eq. 1) e energia (Eq. 2) das análises termodinâmicas:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \left[\dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) \right] - \sum_s \left[\dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \right] \quad (2)$$

Balanço de massa e energia – Ciclo de Potência

Considerando-se o regime permanente e desprezando-se a variação de energia cinética e potencial, os balanços de massa (Eq. 1) e energia (Eq. 2) podem ser simplificados. Conhecendo-se as potências das

turbinas utilizadas nessa planta fabril, é possível determinar a vazão mássica de entrada de vapor de média pressão oriundo das Caldeiras, aplicando-se os balanços de massa (Eq. 1) e de energia (Eq. 2) para processos adiabáticos, resulta nas Eq. 3-5.:

$$\dot{m}_{tg} = W_{TG} / (h_{w[1]} - h_{w[2]}) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{tm} = W_{TM} / (h_{w[1]} - h_{w[2]}) \quad (4)$$

$$\dot{m}_{turb} = \dot{m}_{tg} + \dot{m}_{tm} \quad (5)$$

onde $\dot{m}_{tg}$ é a vazão mássica para entrada de vapor de média pressão na turbina do gerador, W_{TG} é a potência da turbina do gerador, $\dot{m}_{tm}$ é a vazão mássica para entrada de vapor de média pressão nas turbinas da moenda, W_{TM} é a potência das turbinas da moenda, $h_{w[1]}$ é a entalpia do vapor de entrada nas turbinas, $h_{w[2]}$ é a entalpia do vapor de saída das turbinas, $\dot{m}_{turb}$ é a vazão mássica total demandada pelas turbinas da planta estudada.

Além das vazões mássicas, baseado nas temperaturas e pressões de entrada e saída das turbinas, verifica-se também a eficiência isentrópica das turbinas utilizando a Eq. 6.

$$\eta = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2,s}} \quad (6)$$

onde η é a eficiência isoentrópica das turbinas estudadas, h_1 é a entalpia de entrada, h_2 é a entalpia de saída, $h_{2,s}$ é a entalpia isentrópica de saída.

Balanço de massa e energia – EME

Definida a vazão mássica de vapor de escape utilizada para abastecer a EME, realiza-se a partir disso o balanço de massa e de energia de cada caixa evaporadora iniciando pelas que correspondem ao 1º efeito e indo até o 4º efeito de modo sequencial. Para que os cálculos possam ser realizados de maneira completa, algumas variáveis devem ser contabilizadas antes mesmo dos cálculos, através das seguintes etapas:

1. Cálculo da Elevação do Ponto de Ebulição (EPE)

$$EPE = \frac{2 \cdot \text{Brix médio}}{100 - \text{Brix médio}} \quad (7)$$

2. Cálculo da Temperatura de Ebulição do Caldo dentro do Evaporador
Temp. Caldo Saída = EPE +
Temp. Vapor Gerado

3. Cálculo do Consumo de Vapor para Aquecimento do Caldo até o Ponto de Ebulição

$$\dot{m}_{\text{vapor aquec.}} = \frac{\dot{m}_{\text{caldo}} * [(C_p T_{\text{cal}})_{\text{saída}} - (C_p T_{\text{cal}})_{\text{entrada}}]}{\text{Entalpia do Vapor de Alimentação}} \quad (9)$$

4. Cálculo do Vapor Útil para a Evaporação

$$\dot{m}_{\text{Vapor Útil}} = \dot{m}_{\text{Vapor de alimentação}} - \dot{m}_{\text{Vapor aquec.}} \quad (10)$$

5. Cálculo do Vapor Gerado

$$\dot{m}_{\text{VGerado}} = \frac{h_{L\text{Vapor de Alimentação}} * \dot{m}_{\text{Vapor Útil}}}{h_{L\text{Vapor Gerado}}} \quad (11)$$

6. Cálculo da Vazão de Caldo na Saída

$$\dot{m}_{\text{caldo saída}} = \dot{m}_{\text{caldo entrada}} - \dot{m}_{\text{VGerado}} \quad (12)$$

7. Cálculo do Brix de Caldo na Saída

$$\text{Brix Caldo Saída} = \frac{\dot{m}_{\text{caldo entrada}} * \text{Brix Caldo Entrada}}{\dot{m}_{\text{caldo saída}}} \quad (13)$$

8. Cálculo da Vazão de Condensado

$$\dot{m}_{\text{condensado}} = \dot{m}_{\text{vapor entrada}} \quad (14)$$

Sendo a caixa evaporadora da EME considerada um volume de controle, faz-se necessário considerar que para realização do balanço de massa e energia do sistema as propriedades termodinâmicas do caldo oriundo da cana devem ser calculadas em cada efeito já que o vapor é utilizado nesse sistema justamente para que o caldo tenha a concentração de açúcares maximizada através da retirada de água pelo equipamento. Portanto, as equações 15, 16, e 17 devem ser apresentadas efeito a efeito, formando um sistema de equações com diversas incógnitas, para que sejam identificadas as trocas térmicas que o vapor irá realizar com o caldo:

$$Bx_i = \left(\frac{\dot{m}_{\text{sólidos}}}{\dot{m}_{Ci}} \right) * 100 \quad (15)$$

$$cp_i = 4,187 * (1 - 0,006 * Bx_i) \quad (16)$$

$$h_{Ci} = cp_i * T_{efi} \quad (17)$$

em que, Bx_i é o brix do caldo no efeito i da EME, $\dot{m}_{\text{sólidos}}$ é a vazão mássica de sólidos no caldo em kg/s, $\dot{m}_{Ci}$ é a vazão mássica do caldo na saída do efeito i em kg/s, cp_i é o calor específico do caldo em kJ/kg°C, h_{Ci} é a entalpia específica do caldo na entrada do efeito i em kJ/kg e T_{efi} é a temperatura do efeito i em °C.

Com o sistema de equações de todos os efeitos da EME, é possível realizar o balanço de massa e energia considerando as seguintes equações:

$$\dot{m}_{vv_i} = \dot{m}_{s_i} + \dot{m}_{v_i} \quad (18)$$

$$\dot{m}_{vv_i} + \dot{m}_{v_i} = \dot{m}_{Ci-1} - \dot{m}_{Ci} \quad (19)$$

$$FP * \dot{m}_{ve_i} * (hg_{i-1} - hf_{i-1}) = \dot{m}_{Ci} * h_{Ci} - \dot{m}_{Ci-1} * h_{Ci-1} + \dot{m}_{vv_i} * hg_i \quad (20)$$

em que $\dot{m}_{vv_i}$ é a vazão mássica de vapor vegetal de um efeito i em kg/s, $\dot{m}_{s_i}$ é a vazão mássica de sólidos do caldo em kg/s, $\dot{m}_{v_i}$ é a vazão mássica do vapor vegetal a ser utilizado no efeito $i+1$ em kg/s, $\dot{m}_{Ci}$ é a vazão mássica do caldo de saída em kg/s, $\dot{m}_{Ci-1}$ é a vazão mássica do caldo de entrada em kg/s, FP é um fator de perda para a energia fornecida em cada efeito, $\dot{m}_{ve_i}$ é a vazão mássica do vapor condensante em kg/s, hg_{i-1} é a entalpia específica do vapor condensante no efeito $i-1$ em kJ/kg, hf_{i-1} é a entalpia específica do condensado no efeito $i-1$ em kJ/kg, h_{Ci} é a entalpia específica do caldo de saída no efeito i em kJ/kg, h_{Ci-1} é a entalpia específica do caldo de entrada no efeito $i-1$ em kJ/kg e hg_i é a entalpia específica do vapor vegetal formado no efeito em kJ/kg.

A quantidade de calor demandada pela EME, considerando que a energia é absorvida pelo caldo da cana desde sua entrada no primeiro efeito até o efeito final, é obtida através da equação 21 enquanto a quantidade de calor fornecida para o sistema é obtida através da equação 22. Com o resultado das duas equações, é possível obter o rendimento do sistema através da equação 23.

$$Q_{EME} = mc * hc_0 - mc_i * hc_i \quad (21)$$

$$Q_{in_{EME}} = (\dot{m}_{ve_1} + \dot{m}_{ve_2}) * (hg_0 - hf_0) \quad (22)$$

$$\eta_{EME} = Q_{EME} / Q_{in_{EME}} \quad (23)$$

em que Q_{EME} é a energia absorvida pelo caldo da cana desde sua entrada no primeiro efeito até o efeito final em kJ, $Q_{in_{EME}}$ é a quantidade de calor fornecida para o sistema em kJ e η_{EME} é o rendimento obtido pelo sistema.

As áreas de transferência de calor das caixas evaporadoras do sistema atual são conhecidas. Desta forma, é possível verificar os coeficientes globais de transferência de calor (U) conhecendo-se a demanda de calor em cada caixa (Eq. 29) e as diferenças de temperatura de troca de calor entre o vapor fornecido e vapor vegetal gerado (Eq. 24 a 28)

$$\Delta T_1 = T_{steam} - T_{ef1} \quad (24)$$

$$\Delta T_2 = T_{steam} - T_{ef2} \quad (25)$$

$$\Delta T_3 = T_{ef2} - T_{ef3} \quad (26)$$

$$\Delta T_4 = T_{ef3} - T_{ef4} \quad (27)$$

$$\Delta T_5 = T_{ef4} - T_{ef5} \quad (28)$$

A quantidade de calor por efeito é obtida através da equação 29:

$$Q_{ef_i} = \frac{FP * \dot{m}_{ve_i} * (hg_{i-1} - hf_{i-1})}{3600} \quad (29)$$

$$Uq_i = \frac{Q_{efi} \cdot 1000}{(\Delta T_i \cdot A_{efi})} \quad (30)$$

Para fins de analisar a quantidade de açúcar transportado pelo caldo entre os efeitos da EME e a elevação do ponto de ebulição do fluido entre um e o outro evaporador, o cálculo da média do Brix entre dois efeitos é realizada através da equação 31

$$Bxmed_i = \frac{(Bx_{i-1} + Bx_i)}{2} \quad (31)$$

Para os evaporadores a diferença média de temperatura entre os fluidos pode ser considerada constante, e, portanto, usa-se apenas a diferença entre a temperatura do vapor condensante e a do caldo no efeito. Assim, a equação 32 fornece a elevação média do ponto de ebulição devido à concentração de sólidos no caldo do efeito analisado.

$$EPEx_1 = Bxmed_1 * (30 + Bxmed_1) * \frac{0,22 + (0,0078 * T_{ef1})}{35,5 * (103,6 - Bxmed_1)} \quad (32)$$

No caso das simulações das propostas a serem analisadas, é importante determinar as novas áreas de transferência de calor que são necessárias para viabilizar tais operações. Para a determinação da área de transferência de calor de cada efeito da EME pode ser realizada pela equação de Dessin a qual também é utilizada em simulações do IPT que é ilustrada pela equação 33

$$Ux_i = \frac{0,7 * (100 - Bxmed_i) * (T_{i-1} - 54) * (hg_i - hf_i)}{3600} \quad (33)$$

Assim, fica possível a determinação da área efetiva para troca de calor de cada evaporador através da equação 4.68

$$Ac_i = (Q_{efi} * 1000) / (Ux_i * \Delta T_i) \quad (34)$$

Após a EME ser caracterizada através dos balanços de massa e energia, é possível realizar a proposição de alterações no layout para maximização da cogeração. Utilizando o EES é possível realizar tais balanços, de massa e energia, pela resolução de um conjunto de Tabela 2. Dados das turbinas

	Picador	Desfibrador	1° Acion.	2° Acion.	3° Acion.	Gerador
Potência [kW]	1118,55	1864,25	969,41	969,41	969,41	6000

Tabela 3. Dados da Evaporação de Múltiplos Efeitos (EME)

Caixa	Efeito	Tef [°C]	Pef [kPa]	mc [kg/h]	Bx	Ms [kg/s]	mvecp	A dada [m²]
	0	95	-	250000	15	-	-	-
1	1°	115	169,2	210390	17,8	39605	51527	1000
2	1°	115	169,2	138478	27,1	36563	76877	2000
3	2°	107	129,5	103498	36,2	9333	-	2000
4	3°	95	84,6	77685	48,3	13795	-	1000

equações de forma simultânea, simplificando as simulações e permitindo que a operação abordada seja resolvida em estado de máxima eficiência.

Para os trabalhos da área temática REVL - Revisão da Literatura, esta seção é facultativa podendo ser apresentados, por exemplo, a descrição de métodos empregados na seleção dos artigos ou tratamentos matemáticos ou estatísticos aplicados aos dados coletados ou outros métodos pertinentes a elaboração de uma revisão bibliográfica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados da planta industrial

O ciclo de potência da planta industrial estudada é composto por duas caldeiras de média pressão de 2200 kPa, sendo que uma das caldeiras trabalha sob vazão nominal de 80 toneladas de vapor por hora, enquanto a outra produz nominalmente 65 toneladas de vapor por hora (Tabela 1). Juntas, as referidas caldeiras fornecem, através da conversão do bagaço da cana, vapor para seis turbinas, sendo que cinco delas acionam equipamentos para moagem da cana, enquanto uma aciona o gerador de energia elétrica (Tabela 2).

Tabela 1. Dados das Caldeiras

Caldeira	Capacidade [t/h]	Pressão [kPa]	Temp. [°C]
I	80	2200	300
II	65	2200	300

5	4º	70	31,2	64103	58,5	13582	-	1000
---	----	----	------	-------	------	-------	---	------

A EME estudada tem capacidade para realizar a retirada de água de 250 m³/h de caldo extraído da cana no processo de moagem, que antes passa pelos aquecedores para que o fluido ganhe energia térmica e assim demande menos consumo de energia em seu processo de evaporação. Esse arranjo térmico permite a geração de 12040,17 kW, sendo 6000 kW de potência para o gerador de energia elétrica com o consumo total de 134644 kg/h de vapor das caldeiras.

Sistemas Propostos

Na Proposta 1, a quantidade de efeitos da EME é a mesma do arranjo original com 4 efeitos. Entretanto, propõe-se que a pressão do escape das turbinas em 2 níveis de pressão ($p_{CP}=245$ kPa; $p_{Cd}=77,2$ kPa) e temperatura ($T_{CP}=128,5$ C e $T_{Cd}=92,5$ C), para contra-pressão e condensação, respectivamente. O vapor de escape na contrapressão alimenta apenas o 1º efeito da EME, que concentra o caldo o suficiente para a operação dos 3 primeiros efeitos, com suas respectivas demandas de vapor vegetal para o processo, além de fornecer parte da demanda do 4º efeito. Já o vapor de condensação, fornece a energia apenas para o 4º efeito da EME, gerando o vapor vegetal para a demanda neste efeito. A configuração da proposta 1 pode ser observada na Figura 2 e foi configurada para manter o mesmo consumo de vapor da planta inicial.

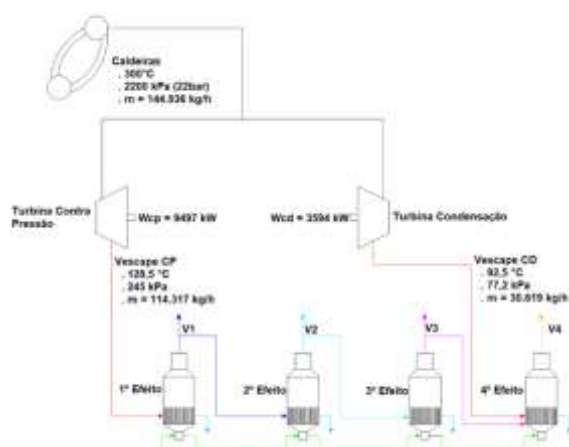


Figura 2. Sistema proposto 1

Na Proposta 2 mantém-se também o número de 4 efeitos da EME. O formato da alimentação de vapor do sistema para a EME é diferente, já que se propõe que o vapor de entrada do 1º efeito seja oriundo do vapor de escape das turbinas de contra-pressão (245

kPa e 128,5°C) seja o suficiente para alimentar apenas o 1º e 2º efeitos, com suas respectivas demandas de sangrias de vapor vegetal, sendo o vapor vegetal deste 2º efeito destinado apenas ao processo. Já para o 3º efeito a alimentação é oriunda exclusivamente do vapor de escape com pressão rebaixada, mas ainda em condições de contra pressão (123,2 kPa e 105,5°C), fornecendo a energia suficiente para o 3º e 4º efeitos com suas respectivas sangrias destinadas ao processo. O sistema proposto nestes moldes é ilustrado conforme a Figura 3.

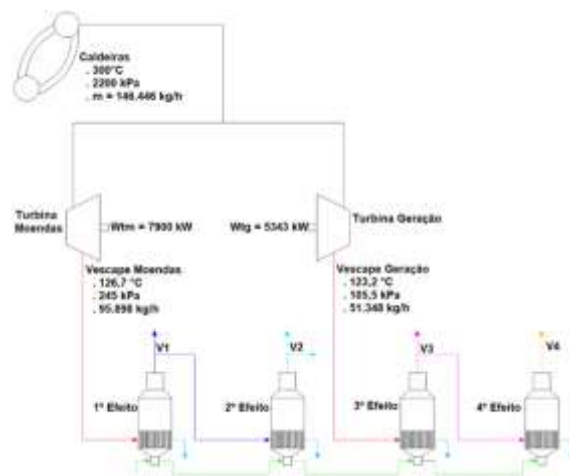


Figura 3. Sistema proposto 2

Na Proposta 3, além da alteração da quantidade de efeitos da EME, o formato da alimentação de vapor do sistema é diferente já que se propõe que o vapor de entrada do primeiro efeito seja oriundo apenas do vapor de escape das turbinas responsáveis pelos acionamentos do picador, desfibrador e das moendas sendo os dois outros efeitos alimentados apenas pelo vapor de escape da turbina destinada à geração de energia. Para isso propõe-se um sistema onde, são utilizadas 3 caixas para evaporar a água contida no caldo sendo que uma é destinada a trabalhar como 1º efeito (transformação de vapor de escape em V1), uma como 2º efeito e a última como 3º efeito sendo que todas contem a sangria de vapor para os demais processos da planta com a possibilidade de resultar em uma menor demanda de vapor de escape e a consequente maximização na cogeração através da economia de consumo de vapor de média pressão para tal finalidade. Além disso, a faixa de trabalho das turbinas seria alterada sendo que o vapor de escape oriundo das turbinas do picador, desfibrador e moendas alimentariam o 1º efeito com vapor a 200 kPa e 120°C enquanto o 2º efeito seria alimentado pelo vapor de escape da turbina do gerador de energia com uma pressão de 115 kPa e temperatura de 103,6°C. O

3º efeito seria alimentado com o vapor oriundo do 2º efeito

O sistema proposto nestes moldes é ilustrado conforme a Figura 7.

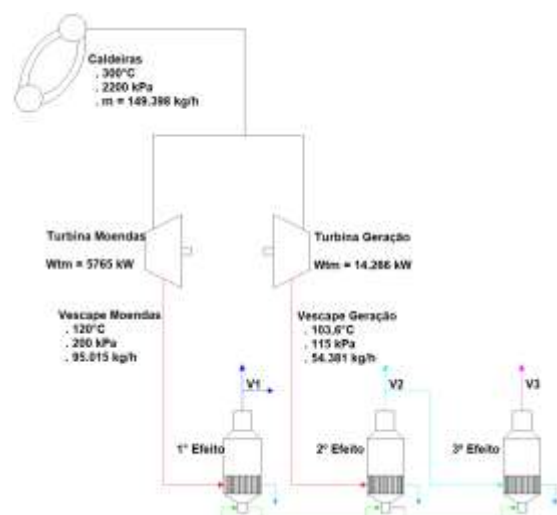


Figura 4. Sistema proposto 3

Na Proposta 1, mantendo a quantidade de caixas e o número de sangrias nos efeitos espera-se que etapas anteriores à Evaporação de Múltiplo Efeito já que o Vapor V4 terá um aumento de sua vazão para os processos de pré-aquecimento do caldo. A demanda por vapor de média pressão se manterá a mesma da planta original, mas a capacidade de geração de energia terá um aumento de 8,7%.

Na Proposta 2, onde os efeitos são mantidos e a alimentação de vapor é alterada para o 1º e 2º efeitos serem alimentados pelo vapor de escape de apenas um conjunto de turbina enquanto o 3º e 4º efeitos são abastecidos pelo vapor de escape das turbinas do outro conjunto. Assim sendo, este arranjo apresenta como resultados um aumento da potência disponível de 10% e um consumo de vapor de média pressão de 1%.

Na Proposta 3, onde a quantidade de efeitos é diminuída e todos esses possuam sangria de vapor para o processo a tendência é de um aumento de 18,5% na energia disponível para cogeração em relação ao projeto original enquanto o consumo de vapor de média pressão tenha um aumento de 3%. Menos efeitos significam uma menor área efetiva para evaporação do caldo o que a princípio não apresentaria impacto na retirada de água do fluido.

Com os resultados é possível enxergar que qualquer alteração do layout industrial para ciclo de potência e EME necessita de uma mudança de parâmetros no vapor de escape das turbinas componentes da planta. A princípio, apenas com a utilização de dois níveis de pressão do vapor de escape das turbinas a capacidade de geração de energia será elevada sendo que o consumo de vapor de média pressão pode ser o mesmo da planta inicial ou aumentado caso busque-se maiores capacidades de geração de energia elétrica. Tal resultado pode ser compensado pelo aumento de potência disponível para a geração de energia elétrica que vendida com boa margem de preço gera renda extra que mitiga o prejuízo que poderia ser formado com o consumo do bagaço. Os resultados da relação entre consumo de vapor e geração de potência podem ser visualizados através da Tabela 4 a seguir. extra que mitiga o prejuízo que poderia ser formado com o consumo do bagaço.

Tabela 4. Resultado do consumo de vapor e geração de potência

Planta	Mtg [kg/s]	Mtm [kg/s]	Mtotal [kg/s]	Wtg [kW]	Wtm [kg/s]	Wtotal [kg/s]
Inicial	20,2	20,06	40,26	6000	6040	12040
Proposta 1	31,75	8,51	40,26	9497	35,94	13091
Proposta 2	26,42	14,26	40,68	7900	5243	13243
Proposta 3	26,4	15,1	41,5	8501	5765	14266

CONCLUSÃO

Para um sistema de cogeração estar em perfeitas condições, é necessário que o consumo térmico esteja bem ajustado com o ciclo de potência para o melhor aproveitamento energético do combustível, que é o bagaço. A produção de energia elétrica excedente só pode ser aumentada com uma melhor integração

térmica entre ciclo de potência e unidades consumidoras do vapor gerado que é a preposição desse trabalho.

As ferramentas e softwares de análise térmica deste trabalho têm se mostrado eficazes e úteis para a visualização de diversos arranjos industriais, permitindo que melhorias sejam propostas para redução de consumo de vapor ou aumento de geração

de energia elétrica pela planta. Sem altos investimentos e através do rearranjo dos equipamentos térmicos já disponíveis em uma planta de açúcar e etanol, os índices de geração de potência excedente podem ser melhorados e aproveitados para gerar renda extra sem perde a eficiência energética já alcançada pela planta.

Após o estudo dos resultados dos layouts propostos e definidos os que apresentam melhores números finais em termos de consumo de vapor de média pressão e produção de potência excedente para produção de energia elétrica, uma análise de exergia também é válida para a identificação de pontos no processo industrial, incluindo setores que consomem os produtos da Evaporação, onde a energia não é transformada em trabalho em sua totalidade o que causa perda de eficiência nas propostas de integração entre ciclo de potência e EME.

Por fim, a respeito do assunto há escassez de estudos e matéria. Diante disso, justifica-se ainda mais a importância de se pesquisar e aprofundar a respeito desta temática. Levando em consideração que se vive um momento social onde há uma busca por geração de energia de forma limpa e eficiente, conclui-se a importância e essencialidade do trabalho.

REFERÊNCIAS

ARABKOOHSAR, A., SADI, M. **Thermodynamics, economic and environmental analyses of a hybrid waste-solar thermal power plant.** J Therm Anal Calorim 144, 917–940, 2021.

HIGA, M., **Cogeração e integração térmica em usinas de açúcar e álcool.** 2003. 137 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2003.

SOUZA, Z. **A bioeletricidade sucroenergética: conjuntura atual e perspectivas para os próximos anos.** RPA News, 2022