

08 a 11 de Outubro de 2018
Instituto Federal Fluminense
Búzios - RJ

INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA E AVALIAÇÃO DA ECOEFICIÊNCIA DO PROCESSO DE SÍNTESE DE ACETATO DE VINILA

Igor Nardi Caxiano¹ – igornardi@id.uff.br

Danyelle Soares Bastião¹ – danyellesoares@id.uff.br

Rafael Oliveira dos Santos¹ – ro_santos@id.uff.br

Diego Martinez Prata¹ – pratadiego@gmail.com

¹ Universidade Federal Fluminense, Departamento de Engenharia Química - Niterói, RJ, Brasil

Resumo. Neste trabalho, a simulação computacional do processo de síntese de acetato de vinila a partir de ácido acético, etileno e oxigênio foi realizada com o objetivo de implementar uma integração energética adicional no processo, especificada por meio da análise pinch. Para a planta original e a planta modificada com a integração energética foram avaliados os ecoindicadores de consumo de água e energia, emissão de CO₂ e geração de efluentes com auxílio da simulação de uma planta de utilidades que fornece vapor de aquecimento e água de resfriamento, necessários ao funcionamento da planta principal. Utilizando-se a metodologia do Índice Comparativo de Ecoeficiência, concluiu-se que a integração energética reduziu os impactos ambientais da síntese de acetato de vinila e tornou o processo 17,7 % mais ecoeficiente.

Palavras-chave: Acetato de vinila, Ecoindicadores, Integração energética, Análise pinch, Simulação computacional

1. INTRODUÇÃO

O acetato de vinila, também denominado de VAM (*Vinyl Acetate Monomer* – Monômero Acetato de Vinila) é um composto orgânico amplamente utilizado na fabricação de colas e revestimentos, atingindo uma produção global de 5,8 milhões de toneladas em 2014 (Wakatsuki, 2015). No entanto, apesar de sua importância na indústria de bens de consumo, nota-se uma escassez de estudos quanto aos impactos ambientais associados à sua produção.

O presente trabalho tem como objetivo propor uma integração energética no processo de síntese de acetato de vinila a partir de ácido acético (HAc), etileno e oxigênio conforme apresentado por Luyben e Tyréus (1998), com o auxílio da simulação computacional e da metodologia de análise *pinch*, visando sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais associados à produção.

A possibilidade de redução dos impactos ambientais por meio da modificação do processo é avaliada com o cálculo dos ecoindicadores de consumo de água e energia, emissão de CO₂ e geração de efluentes, comparando-se quantitativamente o processo original e o modificado por meio da metodologia do Índice Comparativo de Ecoeficiência. A simulação de uma planta de utilidades é considerada com o objetivo de obter-se resultados mais fidedignos para o consumo de água e energia do processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o processo de síntese de VAM estudado, a planta de utilidades associada e a metodologia da análise *pinch*. Além disso, são realizadas breves considerações sobre ecoindicadores e o Índice Comparativo de Ecoeficiência.

2.1 Processo de síntese do acetato de vinila

O estudo realizado no presente trabalho foi baseado na planta de síntese de acetato de vinila proposta por Luyben e Tyréus (1998). A Fig. 1 apresenta o fluxograma do processo, no qual os equipamentos são identificados com as etiquetas adotadas na simulação computacional.

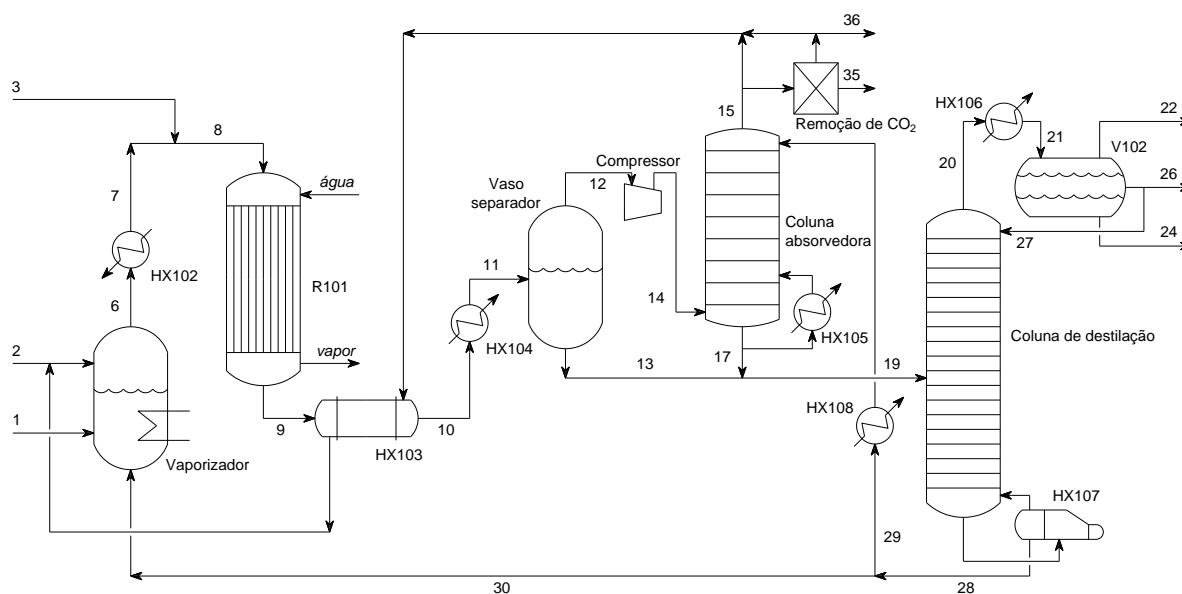
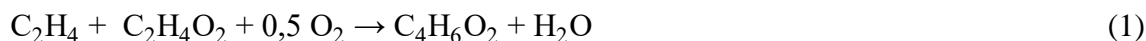


Figura 1- Processo de síntese de acetato de vinila segundo Luyben e Tyréus (1998).

O processo possui três correntes de alimentação a 303,2 K e 1034 kPa: ácido acético puro (corrente 1), etileno com 0,1 mol % de etano (corrente 2), e oxigênio puro (corrente 3). As correntes 1 e 2 são vaporizadas e aquecidas antes de serem misturadas com a corrente 3 e inseridas no reator R101, constituído de 622 tubos de 3,7 cm de diâmetro e 10 m de comprimento preenchidos com leito catalítico com fração de vazios igual a 0,8 e resfriados com água, que deixa o equipamento na forma de vapor. No leito, ocorre a reação de síntese de acetato de vinila e uma reação secundária de combustão do etileno, conforme as Eq. (1) e (2).



As taxas de reação em $\text{gmol}/(\text{g}_{\text{catalisador}} \cdot \text{min})$ para as reações primária e secundária, descritas pelas Eq. (3) e (4), respectivamente, foram obtidas por Luyben e Tyréus (1998) por meio de ajuste de dados experimentais. P_O , P_E , P_A e P_W referem-se às pressões parciais em psia de oxigênio, etileno, ácido acético e água, respectivamente.

$$r_1 = 0,1036 \cdot e^{\left(-\frac{3674}{T}\right)} \cdot \frac{P_O P_E P_A \cdot (1+1,7 \cdot P_W)}{[1+0,583 \cdot P_O \cdot (1+1,7 \cdot P_W)] \cdot (1+6,8 \cdot P_A)} \quad (3)$$

$$r_2 = 1,9365 \cdot 10^5 \cdot e^{\left(-\frac{10116}{T}\right)} \cdot \frac{P_O \cdot (1+0,68 \cdot P_W)}{1+0,76 \cdot P_O \cdot (1+0,68 \cdot P_W)} \quad (4)$$

A corrente de saída do reator é resfriada em trocadores de calor e inserida em um vaso separador. A corrente gasosa é enviada para a coluna absorvedora para recuperação do VAM, de onde o produto de topo, contendo etileno, é encaminhado para um sistema de remoção de CO_2 e purga de etano antes de ser reciclado para o vaporizador. A corrente líquida do vaso separador é encaminhada junto com o produto de fundo da absorvedora a uma coluna de destilação azeotrópica de 20 estágios. O produto de fundo da coluna é redirecionado em parte à absorvedora como solvente e em parte ao vaporizador. O produto de topo é separado em um decantador no qual ocorre uma purga gasosa e a fase orgânica com 95 mol % de VAM e 5 mol % de H_2O é separada da fase aquosa com 99,8 mol % de H_2O e 0,2 mol % de VAM.

2.2 Planta de utilidades

A planta de utilidades é uma planta auxiliar utilizada para fornecimento e distribuição de serviços necessários à produção industrial, tais como combustíveis para fornos e fluidos de troca térmica (Towler e Sinnott, 2013). Como o processo de síntese de acetato de vinila utiliza vapor de aquecimento e água de resfriamento, foi proposta a planta de utilidades apresentada na Fig. 2 com base nos sistemas de água de resfriamento e geração de vapor apresentados por Turton *et al.* (2012) e Boyd (2011), respectivamente.

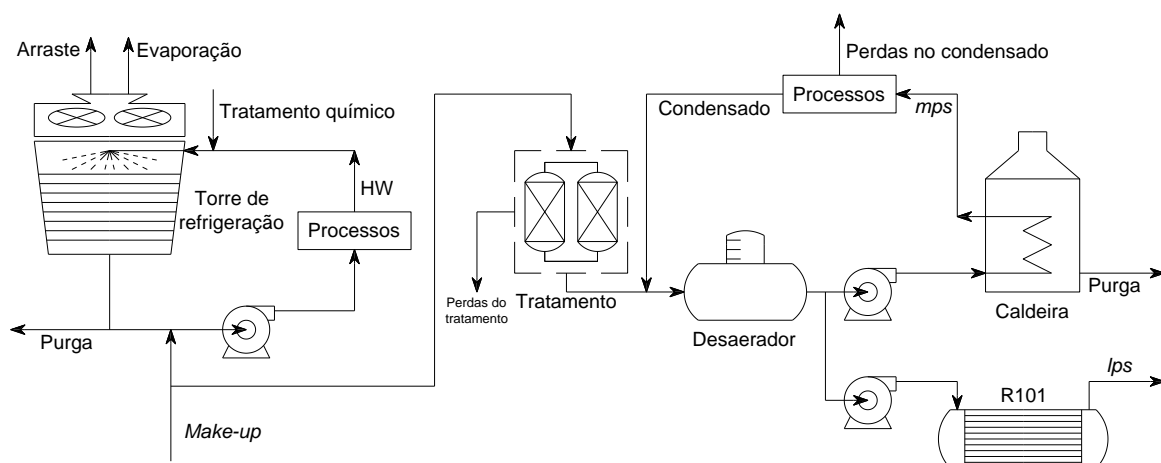


Figura 2- Planta de utilidades proposta para a síntese de acetato de vinila.

Uma corrente de *make-up* ou reposição de água é introduzida devido às purgas na torre e na caldeira, além das perdas associadas aos tratamentos e vazamentos durante os processos.

Considerou-se que a água de resfriamento é inserida nos processos a 303,2 K e sai a 313,2 K (Turton *et al.*, 2012), enquanto a água de *make-up*, inicialmente a 303,2 K e à pressão

atmosférica, é aquecida na caldeira para formar vapor de média pressão (*mps – medium pressure steam*) a 458,6 K e 1136 kPa, segundo as heurísticas apresentadas por Seider *et al.* (2009). Ainda segundo os autores, considerou-se que o resfriamento do reator R101 com água gera vapor de baixa pressão (*lps – low pressure steam*) a 407,6 K e 308 kPa.

A Tabela 1 apresenta as heurísticas para as perdas de água e suas respectivas referências.

Tabela 1- Heurísticas para perdas de água na planta de utilidades

Processo	Perda	Referência
Arraste	0,2 %	Walas (1990)
Evaporação	1,79 %	Walas (1990)
Perdas do tratamento	1 %	Turton <i>et al.</i> (2012)
Perdas no condensado	20 %	Boyd (2011)
Purga na torre	3 %	Walas (1990)
Purga na caldeira	1 %	Seneviratne (2007)

2.3 Integração energética e análise *pinch*

A integração energética tem como objetivo transferir calor entre correntes de processo quentes e frias antes que sejam empregadas utilidades térmicas (tais como vapor e água de resfriamento), de maneira a diminuir a demanda total da planta por essas utilidades (El-Halwagi, 2017). Considerando que essas utilidades geralmente envolvem o consumo de água e utilização de energia proveniente de fontes não-renováveis, a integração energética apresenta-se como uma estratégia para reduzir os impactos ambientais de um processo.

A análise *pinch* é uma metodologia para especificação de integrações energéticas e baseia-se na identificação de um ponto de *pinch* ou estrangulamento no diagrama entalpia-temperatura das correntes quentes e frias, no qual obtém-se o menor consumo de utilidades (Gadalla, 2015).

Uma maneira de realizar-se algebricamente a análise *pinch* é por meio do algoritmo denominado de Tabela Problema, descrito por Kemp (2007). A metodologia consiste inicialmente na estipulação de uma diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}) a ser estabelecida entre as correntes. Este valor permite converter as temperaturas iniciais e alvo das correntes quentes e frias em temperaturas de intervalo e construir um diagrama no qual é realizado um balanço de entalpia a cada intervalo de temperatura. O valor mais negativo de energia é adicionado ao topo do diagrama de maneira a solucionar o balanço de entalpia, e o ponto de *pinch* é encontrado na temperatura na qual o valor de energia acumulada é nulo.

2.4 Ecoindicadores e Índice Comparativo de Ecoeficiência

Os ecoindicadores são definidos, segundo a UNCTAD (2004), pela razão entre uma variável ambiental (tal como consumo de água ou emissão de gases do efeito estufa) e uma variável econômica (tal como taxa de produção ou receita). O cálculo de ecoindicadores para processos industriais tem como um dos principais objetivos auxiliar na escolha de quais tecnologias devem ser adotadas para tornar a produção mais ecoeficiente (UNCTAD, 2004).

A metodologia do Índice Comparativo de Ecoeficiência ou ICE proposta por Pereira *et al.* (2018), por sua vez, pode ser utilizada para avaliar processos industriais pela construção de gráficos de radar com os valores normalizados dos ecoindicadores em suas respectivas categorias. Com a área de cada gráfico, torna-se possível comparar quantitativamente os diferentes processos e determinar qual apresenta maior ecoeficiência.

3. METODOLOGIA

Nesta seção são apresentadas as metodologias empregadas para a simulação computacional da planta de acetato de vinila e da planta de utilidades, assim como para o cálculo dos ecoindicadores e do Índice Comparativo de Ecoeficiência.

3.1 Simulação computacional

A simulação computacional foi realizada no software UniSim Design Suite R390.1, pertencente à empresa Honeywell. Utilizaram-se as especificações das correntes de alimentação, condições operacionais dos equipamentos e dados cinéticos fornecidos no trabalho de Luyben e Tyréus (1998), realizando-se as adaptações necessárias para o *software* utilizado. A planta de acetato de vinila e a planta de utilidades foram simuladas no estado estacionário utilizando-se os pacotes termodinâmicos de Wilson na coluna de destilação e NRTL nos demais equipamentos.

3.2 Integração energética e análise *pinch*

Neste trabalho, foi sugerida a integração energética entre as correntes 6 e 10 do fluxograma apresentado na Fig. 1, arbitrando-se um valor de ΔT_{\min} igual a 10 K. Para esta nova configuração do processo, o vaporizador foi modificado de maneira a obter-se em sua saída vapor saturado a 350,2 K. No processo original, o equipamento aquecia as correntes de alimentação até a temperatura de 392,2 K.

A análise *pinch* foi realizada com a Tabela Problema, obtendo-se por meio do UniSim as variações de entalpia das correntes nos intervalos de temperatura. A simulação da planta foi então modificada introduzindo-se as correntes em um trocador de calor tipo casco e tubos, especificando-se neste as temperaturas de entrada e saída com os resultados da análise *pinch*.

3.3 Ecoindicadores e Índice Comparativo de Ecoeficiência

Os ecoindicadores de consumo de água e energia, emissão de CO₂ e geração de efluentes foram calculados conforme as equações da Tabela 2.

Tabela 2- Expressões para cálculo dos ecoindicadores

Ecoindicador	Expressão	Unidade
Consumo de água	$EI_{H_2O} = \frac{\text{Make-up - Vapor}_{\text{gerado}}}{\text{Taxa de produção}}$	$m^3_{H_2O}/t_{VAM}$
Consumo de energia	$EI_E = \frac{\text{Energia}_{\text{elétrica}} + \text{Energia}_{\text{combustão}}}{\text{Taxa de produção}}$	GJ/t_{VAM}
Emissão de CO ₂	$EI_{CO_2} = \frac{\text{Emissões (combustão + indiretas + fugitivas)}}{\text{Taxa de produção}}$	t_{CO_2}/t_{VAM}
Geração de efluentes	$EI_{ef} = \frac{\text{Purga}_{\text{refrigeração}} + \text{Purga}_{\text{caldeira}} + \text{Perdas}_{\text{processos}}}{\text{Taxa de produção}}$	m^3_{ef}/t_{VAM}

Escolheu-se como variável econômica a taxa de produção da planta em t_{VAM}/h . As vazões volumétricas associadas ao consumo de água e geração de vapor foram obtidas através

das simulações e das heurísticas apresentadas na seção 2.2. O consumo de energia elétrica é proveniente das bombas e compressores, para os quais considerou-se uma eficiência de 80 % (Walas, 1990), enquanto para o consumo de energia de combustão considerou-se a queima de gás natural na caldeira a uma eficiência de 80 %, segundo Seider *et al.* (2009).

As emissões de CO₂ provenientes do consumo de energia elétrica foram determinadas por meio do fator de conversão de 0,0258 t_{CO₂}/GJ (MCTIC, 2018), enquanto para as emissões por combustão de gás natural considerou-se o fator de conversão de 0,0561 t_{CO₂}/GJ (IPCC, 2006). As emissões fugitivas foram calculadas considerando-se combustão completa em *flare* dos componentes enviados para purga, por meio das relações mássicas estequiométricas que associam a quantidade de componente queimado com a quantidade de CO₂ emitido (Pereira *et al.*, 2018), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3- Relações mássicas para os componentes purgados

Componente	Reação de combustão	Relação mássica
Etileno	$C_2H_4 + 3 O_2 \rightarrow 2 CO_2 + 2 H_2O$	3,137
Etano	$2 C_2H_6 + 7 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 6 H_2O$	2,933
Acetato de vinila	$2 C_4H_6O_2 + 9 O_2 \rightarrow 8 CO_2 + 6 H_2O$	2,047
Ácido acético	$2 C_2H_4O_2 + 4 O_2 \rightarrow 4 CO_2 + 4 H_2O$	1,467

Após o cálculo dos ecoindicadores, a planta original e a planta modificada foram comparadas por meio do ICE, conforme a metodologia apresentada por Pereira *et al.* (2018).

4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados da simulação computacional da planta de acetato de vinila, da análise *pinch* para a integração energética, dos ecoindicadores e do ICE.

4.1 Simulação computacional

Na Fig. 1 é apresentado o fluxograma da simulação no UniSim da planta de síntese de acetato de vinila, com base nos dados fornecidos no trabalho de Luyben e Tyréus (1998).

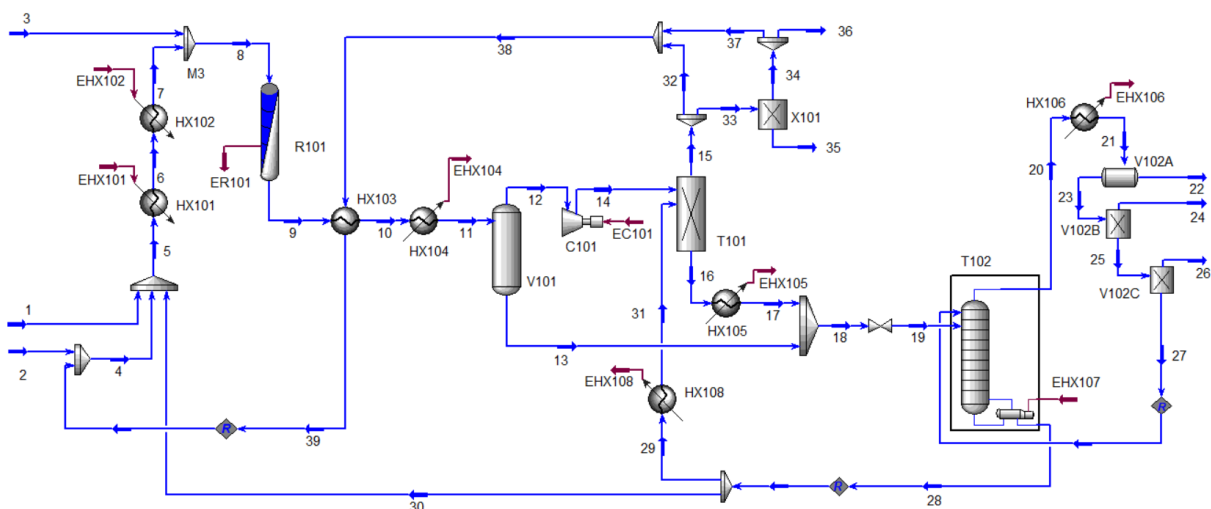


Figura 3- Simulação da planta de síntese de acetato de vinila no UniSim.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para condições operacionais e composição das principais correntes de processo em comparação com os resultados apresentados por Luyben e Tyréus (1998), identificados na tabela como L&T.

Tabela 4- Resultados da simulação computacional

Corrente	Vazão (kmol/h)	Temp. (K)	Pres. (kPa)	O ₂	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	VAM	H ₂ O	HAc	
				(fração molar)							
8	L&T	1155	422,2	882,5	0,074	0,006	0,579	0,215	0,002	0,009	0,115
	UniSim	1132	422,2	882,5	0,074	0,006	0,579	0,215	0,002	0,009	0,115
9	L&T	1131	432,2	620,5	0,049	0,011	0,551	0,221	0,043	0,055	0,070
	UniSim	1108	442,2	620,5	0,047	0,011	0,546	0,219	0,045	0,057	0,074
14	L&T	974	353,2	882,5	0,057	0,013	0,642	0,256	0,021	0,007	0,004
	UniSim	943	353,2	882,5	0,055	0,013	0,641	0,257	0,022	0,007	0,004
15	L&T	947	313,5	882,5	0,058	0,014	0,658	0,263	0,002	0,001	0,004
	UniSim	916	313,5	882,5	0,057	0,014	0,658	0,264	0,002	0,002	0,003
17	L&T	72,6	321,2	882,5	0,001	0,001	0,025	0,010	0,255	0,129	0,579
	UniSim	72,4	324,7	882,5	0,001	0,001	0,024	0,010	0,258	0,130	0,576
19	L&T	229	315,6	579,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,206	0,281	0,513
	UniSim	237	315,6	579,2	0,000	0,000	0,009	0,004	0,201	0,275	0,509
24	L&T	49,9	313,2	124,1	-	-	-	-	0,002	0,998	-
	UniSim	50,3	313,2	124,1	-	-	-	-	0,002	0,998	-
26	L&T	49,6	313,2	124,1	-	-	-	-	0,950	0,050	-
	UniSim	49,0	313,2	124,1	-	-	-	-	0,951	0,049	-
28	L&T	129	410,3	206,8	-	-	-	-	-	0,093	0,907
	UniSim	133	409,9	206,8	-	-	-	-	-	0,093	0,907
33	L&T	385	313,5	882,5	0,058	0,014	0,658	0,263	0,002	0,001	0,004
	UniSim	385	313,5	882,5	0,057	0,014	0,658	0,264	0,002	0,002	0,003
35	L&T	5,1	313,5	882,5	-	1,000	-	-	-	-	-
	UniSim	5,1	313,5	882,5	-	1,000	-	-	-	-	-
36	L&T	0,18	313,5	882,5	0,059	0,000	0,667	0,266	0,002	0,001	0,005
	UniSim	0,18	313,5	882,5	0,058	0,000	0,667	0,268	0,002	0,002	0,003

Os dados apresentados na Tabela 4 demonstram que foram obtidos, de maneira geral, resultados próximos aos informados no artigo de referência. A maior diferença é observada com um desvio de 2 % na temperatura da corrente 9, com um valor de 442,2 K contra 432,2 K apresentado pelos autores. Isto pode ser justificado pela ocorrência de um perfil parabólico de temperatura no interior do reator no trabalho de Luyben e Tyréus (1998), enquanto o UniSim descreve no interior do equipamento um perfil de temperatura linear.

As demais divergências foram atribuídas a diferenças na simulação computacional, visto que este trabalho utilizou o UniSim, enquanto o de Luyben e Tyréus (1998) utilizou um *software* proprietário da empresa DuPont. Diante dessas observações, os resultados da simulação foram considerados satisfatórios e coerentes com o artigo de referência.

4.2 Integração energética

A Tabela 5 apresenta os resultados do algoritmo da Tabela Problema, com base nos dados obtidos com a simulação computacional. Em **negrito**, é destacado o valor mais negativo da cascata de energia, utilizado para corrigir o balanço de entalpia.

Tabela 5- Resultados da análise *pinch*

T_{int} (K)	Int.	ΔT (K)	ΔH_q (GJ/h)	ΔH_f (GJ/h)	ΔH (GJ/h)	Cascata de energia (GJ/h)		Resultado
						Original	Corrigida	
428,4	1	26,2	-	1,685	-1,685	0,000	+1,685	Utilidades quentes
402,2						-1,685	0,000	
355,6	2	46,6	4,448	2,819	+1,629	-0,056	+1,629	
306,6	3	49,0	6,849	-	+6,849	+6,793	+8,478	Utilidades frias

O ponto de *pinch* foi encontrado na temperatura de intervalo igual a 402,2 K, que corresponde a 407,2 K para a corrente quente e 397,2 K para a corrente fria; além disso, de maneira a completar os processos de aquecimento e resfriamento das correntes envolvidas, são necessários 1,685 e 8,478 GJ/h de utilidades quentes e frias, respectivamente.

A Fig. 4 apresenta uma ampliação do fluxograma da simulação da planta de acetato de vinila modificada, no qual é destacada a integração energética entre as correntes 6 e 10.

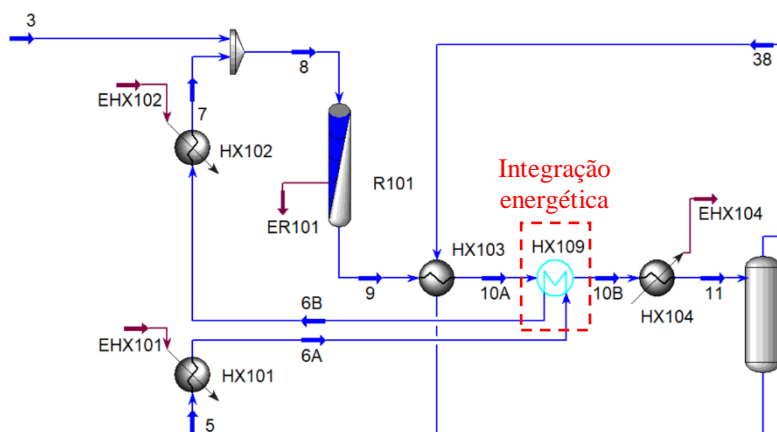


Figura 4- Integração energética na simulação da planta de acetato de vinila.

Os valores das correntes de energia nos trocadores de calor HX102 e HX104 após a modificação foram iguais a 1,685 e 8,479 GJ/h, respectivamente. Estes valores estão de acordo com os determinados para os consumos energéticos em utilidades quentes e frias no algoritmo da Tabela Problema, o que demonstra verossimilhança entre os resultados da simulação computacional e da análise *pinch*.

4.3 Ecoindicadores e Índice Comparativo de Ecoeficiência

A Tabela 6 apresenta os resultados para os ecoindicadores de consumo de água e energia, emissão de CO₂ e geração de efluentes, para a planta original e a modificada. Observa-se que todos os ecoindicadores apresentaram valores reduzidos para a planta com integração energética, o que indica que a modificação do processo foi, de fato, capaz de reduzir os impactos ambientais da síntese de acetato de vinila.

Tabela 6- Resultados para os ecoindicadores

Ecoindicador	Unidade	Planta original	Planta modificada
Consumo de água	$m^3_{H_2O}/t_{VAM}$	8,44	7,55
Consumo de energia	GJ/t_{VAM}	13,37	12,20
Emissão de CO ₂	t_{CO_2}/t_{VAM}	0,90	0,84
Geração de efluentes	m^3_{ef}/t_{VAM}	5,35	4,79

A Fig. 5 apresenta os gráficos de radar construídos para o processo original e para o modificado, utilizando-se os valores normalizados dos ecoindicadores, enquanto a Tabela 7 apresenta os resultados para o ICE.

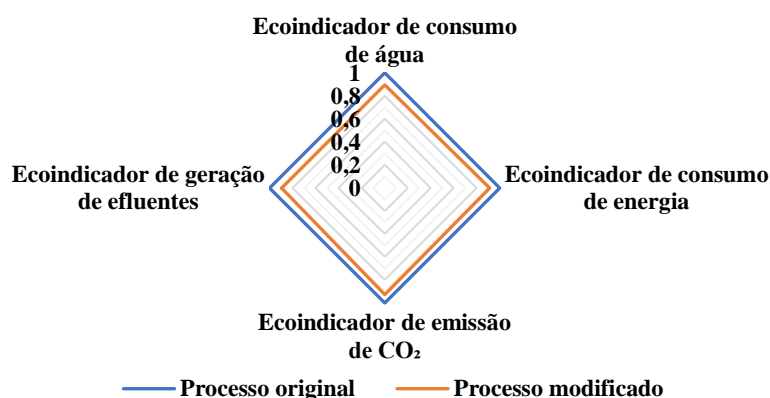


Figura 5- Gráficos de radar dos ecoindicadores normalizados.

Tabela 7- Índice Comparativo de Ecoeficiência.

Ecoindicador normalizado	Planta original	Planta modificada
Consumo de água	1,00	0,89
Consumo de energia	1,00	0,91
Emissão de CO ₂	1,00	0,93
Geração de efluentes	1,00	0,90
Área do gráfico	2,00	1,65
Índice Comparativo de Ecoeficiência		17,7%

O resultado obtido para o ICE indica que o processo de síntese de acetato de vinila modificado com a integração energética é 17,7 % mais ecoeficiente do que o processo original, principalmente devido à diminuição do consumo de água e energia em utilidades térmicas no aquecedor HX102 e no condensador HX104.

5. CONCLUSÕES

A simulação da planta de acetato de vinila foi realizada no UniSim e obteve resultados coerentes com os dados apresentados no artigo de referência. Utilizando-se a análise *pinch*, foi possível especificar uma integração energética adicional ao processo que, por meio do cálculo dos ecoindicadores e do ICE, mostrou-se capaz de tornar o processo 17,7 % mais ecoeficiente. Isto estabelece a integração energética como uma estratégia válida para diminuição dos

impactos ambientais de processos industriais. Acredita-se, portanto, que este trabalho contribua para os estudos na simulação computacional de processos industriais e no tema de sustentabilidade e ecoeficiência.

REFERÊNCIAS

- Boyd, B. (2011), “*Guidelines for Estimating Unmetered Industrial Water Use*”. Department of Energy, Washington, D.C.
- El-Halwagi, M.M. (2017), “*Sustainable Design Through Process Integration: Fundamentals and Applications to Industrial Pollution Prevention, Resource Conservation, and Profitability Enhancement*”, 2 ed., Elsevier, Cambridge.
- Gadalla, M.A. (2015), A New Graphical Method for Pinch Analysis and Energy Integration. *Chemical Engineering Transactions*, 43.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2006), “*2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Inventories*”, 1 ed., IGES, Japão.
- Kemp, I.C. (2007), “*Pinch Analysis and Process Integration – A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*”, 2 ed., Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Luyben, M.L.; Tyréus, B.D. (1998), An industrial design/control study for the vinyl acetate monomer process. *Computers & Chemical Engineering*, 22, 867-877.
- MCTIC – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2018), “*Fator médio – Inventários corporativos*”. Disponível em: <http://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/textogeral/emissao_corporativos.html>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- Pereira, C.P.; Prata, D.M.; Santos, L.S.; Monteiro, L.C.P. (2018), Development of Eco-efficiency Comparison Index Through Eco-Indicators for Industrial Applications. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 35, 63-84.
- Seider, W.D.; Seader, J.D.; Lewin, D.R.; Widagdo, S. (2009), “*Product and Process Design Principles – Synthesis, Analysis, And Evaluation*”, 3 ed., John Wiley & Sons, Inc., U.S.
- Seneviratne, M. (2007), “*A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities*”, 1 ed., Elsevier Science, Massachusetts.
- Towler, G.; Sinnott, R. (2013), “*Chemical Engineering Design – Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*”, 4^o ed., Prentice Hall, New Jersey.
- Turton, R.; Bailie, R.; Whiting, W.B.; Shaeiwitz, J.A.; Bhattacharyya, D. (2012), “*Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*”, 4 ed., Prentice Hall, New Jersey.
- UNCTAD – United Nations Conference on Trade and Development (2004), “*A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators*”, United Nations, New York.
- Wakatsuki, K (2015), “*Acetyls Chain – World Market Overview*”. Disponível em: <http://www.orbichem.com/userfiles/APIC%202015/APIC2015_Keiji_Wakatsuki.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2018.
- Walas, S.M. (1990), “*Chemical Process Equipment – Selection and Design*”, 1 ed., Butterworth-Heinemann, Massachusetts.

PROCESS INTEGRATION AND ECO-EFFICIENCY EVALUATION OF THE VINYL ACETATE MONOMER PROCESS

Abstract. *In this work, the computer simulation of the vinyl acetate monomer synthesis from acetic acid, ethylene and oxygen was carried aiming to design an additional process integration to the plant, specified using pinch analysis. For both the original and the heat integrated processes the water consumption, energy use, CO₂ emissions and wastewater generation indicators were evaluated aided by the simulation of a utilities plants that provides steam and cooling water needed to the operation of the main plant. Using the Eco-efficiency Comparison Index methodology, it was shown that the process integration was able to reduce the environmental impacts of the vinyl acetate monomer synthesis and made the process 17.7 % more eco-efficient.*

Keywords: *Vinyl acetate monomer, Eco-indicators, Process integration, Pinch analysis, Computer Simulation*