

Propuesta de acciones de integración energética para elevar la calidad del proceso de producción del alcohol técnico A

Proposal for energy integration actions to raise the quality of the alcohol technical production process A

Autores:

MS.C. Manuel Garcia Serret, <https://orcid.org/0000-0002-8920-6261>

Dr.C. José Sánchez Fonseca, <https://orcid.org/0000-0001-9775-1262>

Ing. David Alvarez Utria, <https://orcid.org/0000-0002-1194-0036>

Organismo: Universidad de Guantánamo. Avenida Che Guevara. Km 1/2. Carretera a Jamaica, Guantánamo. Cuba. CP: 95100.

E-mail: mgarciast@cug.co.cu; jsanchezf@cug.co.cu

Fecha de recibido: 3 oct. 2022

Fecha de aprobado: 9 dic. 2022

Resumen

La investigación se desarrolló entre los años 2017-2020 en la empresa azucarera Manuel Tames de Guantánamo, con el objetivo de proponer acciones de integración energética para elevar la calidad del alcohol técnico A. Se analizaron los consumos energéticos en dos sistemas, en el primero obtuvimos una presión mayor que la atmosférica de 0.158 Pa y en el segundo de 0.0225 Pa en la producción de alcoholes finos rectificadas, mejorando las condiciones de influencia en la integración energética, en las áreas de fermentación y destilación. El esquema de destilación convencional posee índices mayores de requerimiento de calor de 1857.52 KW y de frío 807.61KW. Este aprovecha mejor la integración térmica con un índice de calor de 2512.71 KW y un índice en frío de 1347.96 KW. Los consumos mínimos de utilidades obtenidos significaron un ahorro de 52% para el esquema de destilación doble efecto y de 75% para la destilación convencional.

Palabras Clave: Destilerías; Extracción; Normas e impurezas; Integración energética.

Abstract

The research was carried out between the years 2017-2020 in the Manuel Tames de Guantánamo sugar company, its objective is to propose energy integration actions to raise the quality of technical alcohol A. Energy consumption was analyzed in two systems, in the first we obtained a pressure greater than atmospheric of 0.158 Pa and in the second of 0.0225 Pa in the production of rectified fine alcohols, improving the conditions of influence in energy integration, in the fermentation and distillation areas, the conventional distillation scheme has higher rates of heat requirement of 1857.52 KW and cold 807.61KW. This takes better advantage of thermal integration with a heat index of 2512.71 KW and a cold index of 1347.96 KW. The minimum consumption of utilities obtained meant a saving of 52% for the double effect distillation scheme and 75% for conventional distillation.

Keywords: Distilleries; Extraction; Standards and impurities; Energy integration.

Introducción

En la industria azucarera, tradicionalmente el etanol se obtiene de la fermentación de las mieles del proceso azucarero; pero en el campo de la investigación pueden encontrarse un número considerable de trabajos que abordan el empleo de otros sustratos para la fermentación alcohólica, tales como jugos del proceso azucarero, hidrolizado de bagazo y vinazas de la destilación de alcohol Albernas., Y et, al (2012). ; Albernas., Y et, al (2014). ; González., M et, al (2014).

En el ámbito mundial, los 2 principales productores de etanol son Brasil (a partir de caña de azúcar) 21,375 billones de litros y Estados Unidos (a partir de maíz) con producciones anuales de 38,088, billones de litros, siendo el primer productor.

En los últimos años se ha observado un creciente interés en la producción de alcohol a partir de fuentes renovables. En Cuba, tradicionalmente el alcohol se obtiene de la fermentación de las mieles del proceso azucarero. Los derivados de la industria azucarera constituyen un renglón exportable y, por tanto, tiene gran importancia en el desarrollo económico del país. De todos estos derivados de la miel los de mayor valor económico han entrado al mercado, de ellos sobresalen los alcoholes, rones y aguardiente de caña. Estévez., R. (2007).

A nivel mundial, las empresas enfrentan un panorama de competencia por obtener el liderazgo del mercado e incrementar la productividad a través de la optimización de sus procesos productivos. Por ello es primordial que toda empresa aumente la utilización de sus recursos empresariales, optimizando sus procesos en general, lo cual conlleva a que se minimicen errores en los procesos, se logren los objetivos trazados, se brinde un mejor servicio y se obtenga una mayor satisfacción del cliente. Herrera., E., & Roa., A. (2016).

El problema de la calidad y eficiencia global de la producción de alcohol, tanto técnica como económica, puede lograrse por la influencia de la integración térmica del proceso de destilación si se reduce el consumo de utilidades y se aprovecha la energía disponible en las corrientes del proceso a través del intercambio de calor entre las mismas Días., M., *et al* (2009).

La investigación tiene como objetivo proponer acciones de integración energética para mejorar los parámetros tecnológicos de calidad en la producción de alcohol técnico A. La novedad de la investigación está dada en la forma que se mejora la calidad de este alcohol, mediante la aplicación de la integración energética que permiten reducir los contenidos de impurezas durante el proceso productivo.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló entre los años 2017-2020 en la empresa azucarera Manuel Tames, ubicada en el Km 7carretera de Argeo Martínez en la provincia de Guantánamo.

Durante la investigación se trabajó en las diferentes áreas de la destilería.

Durante la investigación se emplearon métodos teóricos y empíricos:

Métodos teóricos:

Análisis histórico y lógico.

Análisis y síntesis.

Estudio documental.

Métodos empíricos:

La observación

La entrevista

La encuesta

Análisis porcentual

El método de destilación doble efecto es similar a la configuración del método convencional, pero las columnas de destilación operan bajo un vacío, mientras que la columna de rectificación

opera bajo presión atmosférica. Debido a la diferencia de los niveles de temperatura que se crean entre el rehervidor de la columna destiladora y el condensador de la columna rectificadora, se puede realizar la integración térmica entre dichos equipos y consecuentemente lograr la reducción del consumo de energía en la etapa de destilación Modesto, M., Zemp, R., Nebra, S. (2009)., Palacios-Bereche, R., *et al.* (2013).

Destilación doble efecto: Para la integración térmica se siguen varios pasos que en este trabajo se han asumido; pero a partir de la influencia del proceso en la calidad del alcohol, teniendo en cuenta los objetivos del estudio en cuestión. Estos pasos se extrajeron de Kemp., I. (2007). Identificación de las corrientes calientes, frías y para uso general en el proceso: corrientes calientes son las que se enfrían o están disponibles para ser enfriadas; corrientes frías son las que se calientan; corrientes para uso general son las que se utilizan para calentar o para enfriar las corrientes del proceso cuando el intercambio de calor entre corrientes de proceso no es práctico o económico.

En la industria se utilizan diversos sistemas auxiliares calientes (vapor, agua caliente, humo, entre otros) y fríos (agua de enfriamiento, aire, refrigerante, entre otros). En este caso se utiliza vapor y agua como utilidad caliente y fría respectivamente. En este proceso las utilidades calientes y frías son vapor y agua respectivamente, cuyos costos son: costo vapor: 195,07USD/kW, costo agua: 0,00127USD/kW. Los costos de capital de los intercambiadores de calor se determinan por la siguiente expresión. Kemp., I. (2007):

Costo Capital= $a+b(A_{HEN})^c$. Dónde: $a=1600$, $b=3200$, $c=0,7$ De modo que el Costo Total es: =Costo energía+Costo de Capital (los costos de inversión de los equipos intercambiadores de calor y de las utilidades se determinan en USD).

Durante la investigación para comparar los patrones de calidad en el proceso de producción del alcohol técnico "A" se utilizaron las Normas. Oficina Nacional de Normalización. Bebidas alcohólicas. *Determinación de aldehídos totales-métodos químicos*. La Habana. Norma Cubana 535. (2007) et al (2015). (**Tabla 1**).

Tabla 1. Requisitos de calidad del alcohol técnico "A"

Requisitos	Valor
Grado alcohólico expresado en % de alcohol en volumen a 20° C (mínimo)	95.0
Tiempo de Permanganato expresado en minutos (mínimo)	5
Acidez total expresado en miligramos de ácido acético por litro de alcohol absoluto (máximo)	30
Aldehídos expresados en miligramos de acetaldehído por litro de alcohol absoluto (máximo)	30
Alcoholes superiores expresados en miligramos de alcoholes superiores por litro de alcohol absoluto (máximo)	150
Éteres totales expresados en miligramos de acetato de etilo por litro de alcohol absoluto (máximo)	100

Materias primas fundamentales y auxiliares en el proceso de producción de alcohol Finos

Miel final de caña, Urea, Fosfato de Amonio, Ácido sulfúrico, Formol, hipoclorito de sodio, Carbonato de sodio y Cal. Se debe tener en cuenta que existen variaciones de materia prima, como en la secuencia de las actividades realizadas, que a la vez generan variaciones en el producto final.

Esto se expresa por medio de mediciones concretas, como tiempos de procesos, rendimientos o porcentajes de algún parámetro en específico. Euskalit., (2015).

Resultados y discusión

Se puede apreciar que el sistema de destilación convencional posee índices mayores de requerimiento de calor 1857.52 KW y frío 807.61 KW, en el sistema de destilación de doble efecto aprovecha mejor la integración térmica con un índice de calor 2512.71 KW y un índice en frío de 1347.96 KW durante el proceso de producción de etanol teniendo en cuenta la capacidad de la planta. Palacios-Bereche, R., Ensinas A., Modesto M. (2015)., toma como base los trabajos de Junqueira., T., et al (2009)., Días, M. (2012). y analiza nuevamente el impacto de la destilación doble efecto en la reducción del consumo energético.

Estos resultados coinciden con Palacios-Bereche, R., Ensinas A., Modesto M. (2015)., que en los alcoholes extrafinos. Los consumos mínimos de utilidades obtenidos con la integración energética significaron un ahorro de 52% para el esquema de destilación doble efecto y de 75% para el esquema de destilación convencional.

Por tanto, a medida que se mejora la integración térmica en los procesos industriales para la destilación de alcoholes, se reduce la cantidad de impurezas que perjudican la calidad de los alcoholes.

Autores como Halwagi, M. (2006). Kemp, I. (2007). Cárdena, C. (2004). y Foo, DM., Tan R. (2011). Presentaron resultados similares en cuanto a la aplicación de la integración térmica como vía para mejorar la calidad de los alcoholes extrafino, pero en nuestra investigación se tuvieron en cuenta la influencia del intercambio de calor en la calidad del alcohol técnico A.

Estos resultados coinciden con M, González; A, Fariña; Y, Martínez; L, Castellano; Y, Albornas. (2016). que en los alcoholes extrafinos obtuvieron valores de 0.765 kg/s de producto de flujo másico, el calor específico mostro valores de 5.50 kJ/ kg °C, capacidad calorífica 4.21(kW/°C), 81 °C de temperatura de la fuente, temperatura objetivo 50 °C, ΔH , variación de entalpía 130.48 kW.

Autores como Dias, M., Ensinas, A., Nebra, S., Maciel, R., Rossell, C., Wolf, M. (2009)., tienen punto de coincidencia a través de la simulación en Hysys, la influencia de la destilación doble efecto en la reducción del consumo energético. La configuración estudiada en sus trabajos es similar a la destilación convencional, pero operando la columna de destilación a vacío (20-25 kPa), mientras que la columna de rectificación operaba a presiones cercanas a la presión atmosférica (101 kPa en el tope).

mejorando la eficiencia, utilidades en lo referido a la calidad de los alcoholes extrafino, obteniendo valores de 96.3 °GL los procesos apuntar hacia donde deben dirigirse **las acciones de integración energética**, aspectos que han sido abordados por. Halwagi, M. (2006)., Kemp, I. (2007).; Cardona, C., Sánchez, O. (2007).; Dias, M., Ensinas, A., Nebra, S., Maciel, R., Rossell, C., Wolf, M. (2009)., y Foo, D., Halwagi, M., Tan R. (2011).

En este trabajo se tuvieron en cuenta el estudio de Junqueira, T., Dias M., Maciel F., Wolf-Maciel, M., Rossell, C., Atala, D. (2009) a las columnas de alcohol extrafino incluyendo también operación en doble efecto entre las columnas lavadora y desmetilizadora de esta sección de la destilación. Por otro lado [20], toma como base los trabajos de Junqueira, T., Dias M., Maciel F., Wolf-Maciel, M., Rossell, C., Atala, D. (2009).; Días, M. (2012). y analiza nuevamente el impacto de la destilación doble efecto en la reducción del consumo energético no sólo en el proceso de obtención de alcohol con calidad.

Se puede apreciar en la tabla 2 que el esquema de destilación convencional posee índices mayores de requerimiento de calor y frío, en el esquema de destilación de doble efecto aprovecha mejor la integración térmica durante el proceso de producción de etanol teniendo en cuenta la capacidad de la planta.

Tabla 2. Demanda de utilidades de los procesos de destilación.

Esquema de Destilación	Demanda de Calor, KW	Demanda de Frio, KW	Capacidad de la planta, HL/d	Demanda de Calor KW/HL	Demanda de Frio, KW/KL
Convencional	1857.52	807.61	500	3.73	1.59
Doble Efecto	2512.71	1347.96	1000	2.39	1.31

La **tabla 3** muestra los índices de consumo de vapor por hectolitro de alcohol producido para las condiciones normales del proceso y cuando en los mismos se ha aplicado la integración energética y su influencia en la calidad del proceso, Además, se han incluido dos tecnologías reportadas en el trabajo de M, González; A, Fariña; Y, Martínez; L, Castellano; Y, Albornos. (2016). En el que se realizó un análisis similar en este trabajo, partiendo de la influencia de la integración térmica en las utilidades y en la calidad del proceso y consumo de vapor. También, se realiza la integración energética obteniéndose menores consumos de utilidades externas.

Tabla 3. Índice de consumo de vapor, T/HL de alcohol producido.

	Sin integración energética				Con integración energética			
	D.C**	D.D.E**	DC	D.D.E	D.C*	D.D.E*	DC*	D.D.E*
T/HL	0.568	0.234	0.260	0.160	0.140	0.122	0.23	0.102
Ahorro/T/HL	-	-	-	-	0.430	0.112	0.034	0.062
Ahorro %					75	52	14.53	38.75

Dónde: DC**: Destilación convencional este trabajo; DDE**: Destilación doble efecto este trabajo; DC*: Destilación convencional en las destilerías. Palacios-Bereche, R., Ensinas A., Modesto M. (2015).; DDE*: Destilación doble efecto. Palacios-Bereche, R., Ensinas A., Modesto M. (2015).

Tabla 4. Calidad del alcohol rectificado con criterios no conformes.

Muestras	Grado Alcohólico	Tiempo Permanganato	Acidez	Ésteres	Alcohol	Alcoholes superiores
1	90.0	4	1.71	56	3.76	89
2	85.2	2	0.50	26	11.54	87
3	92.1	8	1.50	57	18.51	88
4	90.4	5	1.90	4.98	8.51	90
5	95.4	10	12.0	9.32	0.46	90.4
6	92.1	9	1.97	1.92	2.69	88.5
7	93.1	7	1.95	58	1.39	89.4
8	90.4	11	1.20	9.32	0.46	89
9	91.0	9	0.97	7.92	0.69	90
10	90.2	10	1.66	8.13	0.46	89.7
11	89.6	10	4.57	12.23	2.37	87.7
12	94.2	12	1.62	4.70	0.46	87.9

De acuerdo con estos resultados y las mejoras energéticas, se logró altos valores del grado alcohólico 96.3 y tiempo de permanganato (tabla 5), que fue necesario obtener en el producto terminado. Los aldehídos y acidez se encuentran entre los requisitos establecidos y los ésteres se encuentran algo elevado incumpléndose en algunos valores.

Tabla 5. Comportamiento de los parámetros de calidad actuales en comparación con los anteriores.

Muestra	Grado alcohólico	Tiempo Permanganato	Acidez	Éteres	Aldehídos	Alcoholes Superiores
1	95.7	4.0	36.41	89	22.9	89.2
2	96.1	5.0	9.59	78	28.3	93.5
3	95.7	4.6	30.00	88	28.3	90.8
4	95.7	4.8	12.02	87	27.0	90.9
5	96.2	5.0	14.39	90.8	27.9	89.3
6	95.7	4.7	12.02	90	26.6	88.8
7	95.6	4.0	21.65	97.0	27.1	90.3
8	96.3	3.9	21.63	93.0	28.8	89.5
9	95.5	4.8	19.27	78.1	26.6	91.7
10	96.3	4.0	10.54	89.3	25.8	90.6
11	95.6	4.3	13.18	99.8	21.8	91.4

Cuando se comparan estos valores de la tabla 4 con los resultados actuales (tabla 5), se muestra que existe gran diferencia de los parámetros químicos de calidad en comparación con los anteriores, lográndose una disminución de las impurezas.

Comportamiento de las producciones después de las mejoras tecnológicas efectuadas

En la actualidad se han producido mejoras tecnológicas en la destilería. Se deben realizar acciones como:

1-El montaje de una columna al vacío para lograr una mejor integración energética (Columna de enfriamiento de tecnología China que tiene como objetivo):

- Lograr temperatura adecuada durante el proceso de fermentación entre 30-35 grados centígrados como máximo para una mejor eficiencia del ciclo químico fermentativo.
- Lograr mayor concentración de azúcares en alcoholes.
- Obtener mayor eficiencia en la fermentación, esto logra mejor calidad en la destilación.
- Mejorar los parámetros químico tecnológico en la producción de alcoholes y reducir los niveles de impurezas.

La otra mejora tecnológica consiste en la automatización del proceso de destilación que permite:

- Automatización de las válvulas que suministran vapor a las calderas y las columnas de destilación permiten mayor estabilidad del proceso.
- Conexión de un flujómetro de entrada para lograr la batición del flujo a la columna automatizada.
- Montaje de un flujómetro de alcohol y aguardiente permite mejor contabilidad del producto terminado.
- Montaje de un densímetro automatizado en los prefermentadores que permite la uniformidad en el brix de corrida.

Conclusiones

Se analizaron los consumos energéticos en dos esquemas de destilación de alcohol. En el primer esquema obtuvimos una presión mayor que la atmosférica de 0.158 Pa y en el segundo operaba a vacío de 0.0225 Pa en la producción de alcoholes finos rectificadas, mejorando las condiciones de la influencia que tiene la integración energética de la destilería en las áreas de fermentación y destilación, apreciándose que el esquema de destilación

convencional posee índices mayores de requerimiento de calor de 1857.52 KW y de frío 807.61KW.

Se puede apreciar que el esquema de destilación convencional posee índices mayores de requerimiento de calor 1857.52KW y frío 807.61KW, en el esquema de destilación de doble efecto aprovecha mejor la integración térmica con un índice de calor 2512.71KW y un índice en frío de 1347.96KW durante el proceso de producción de etanol teniendo en cuenta la capacidad de la planta.

Los consumos mínimos de utilidades obtenidos con la integración energética significaron en ahorros de 52% para el esquema de destilación doble efecto y de 75% para el esquema de destilación convencional.

Para el logro de estos fines se ejecutaron acciones de mejoras energéticas en los sistemas de fermentación, destilación, rectificación y de extracción de impurezas como elementos esenciales para alcanzar parámetros de calidad con valores óptimos.

Bibliografías

- Albernas, Y., González, M., Corsano, G., González, E. (2012). "Obtaining superfine ethanol in a Cuban distillery". *Ingeniería e Investigación Journal*. Vol. 32 (3)
- Albernas, Y., Corsano, G., Kafarov, V., González, M., González, E. (2014). "Optimal design of pre-fermentation and fermentation stages applying nonlinear programming". *Revista Energy Conversion and Management*. Vol.87, (4).
- Bessa, L., Batista, F., Meirelles, A. (2012) "Double effect multicomponent alcoholic distillation columns.", *Energy*, Vol. 45, No.1, Aug., pp.603-612.
- Cardena, C. (2004). "Seminario Internacional de Alcoholes Carburantes en Colombia". Medellín. Junio 10.
- Cardona, C., Sánchez, O. (2007). Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 12, pp. 2415-2457.
- Dias, M. (2012). Development and optimization of first- and second-generation bioethanol and electricity production processes from sugarcane, Ph.D. thesis, University of Campinas, Brazil.
- Dias, M., Ensinas, A., Nebra, S., Maciel, R., Rossell, C., Wolf, M. (2009). "Production of bioethanol and other bio-based materials from sugarcane bagasse: integration to conventional bioethanol production process"., *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 87, (9A).
- Estévez, R. (2007). 7-7-Tecnología de la destilación alcohólica. LA Habana. Editora ICIDCA. X.
- Euskalit. (2015). Modelo de gestión avanzada. España.
- Foo, D., Halwagi, M., Tan R. (2011). "Recent advances in sustainable process design and optimization", *Series on Advances in Process Systems Engineering*, World Scientific Publishing Company, pp. 485-556.
- González, M., Castellanos, L., Albernas, Y., González, E. (2014). "Integración de procesos y el esquema de biorefinería"., *AFINIDAD*, Vol. 71, (568)
- Halwagi, M. (2006). "Process integration, Amsterdam, Academic Press/Elsevier", pp. 231-282.
- Herrera, E., & Roa, A. (2016). Optimización del proceso productivo de infomedios Colombia Ltda. (Tesis de Licenciatura). Universidad Libre, Bogotá, Colombia.
- Junqueira, T., Dias M., Maciel F., Wolf-Maciel, M., Rossell, C., Atala, D. (2009). Propositions of alternative configurations of the distillation columns for bioethanol production using vacuum extractive fermentation process". *Chemical Engineering Transactions*, Vol.17, No.59, pp.1627-1632.

- Kemp, I. (2007). "Pinch analysis and process integration. A user guide on process integration for the efficient use of energy", 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann/Elsevier.
- M, González; A, Fariña; Y, Martínez; L, Castellano; Y, Albernas. (2016). Análisis energético e integración de la destilación de alcohol: método convencional y doble efecto., Vol 43, Julio-septiembre, ISSN: 2223-4861.
- Modesto, M., Zemp, R., Nebra, S. (2009) "Ethanol production from sugarcane: assess of possibilities of decrease of thermal energy consumption through exergetic cost analysis, Heat Transfer Engineering". Vol. 30, (4).
- Palacios-Bereche, R., Ensinas A., Modesto M. (2015). "Double-effect distillation and thermal integration applied to the ethanol production process", Energy, Vol. 82, Feb., pp. 512-523.
- Palacios-Bereche, R., Mosqueira-Salazar, K., Modesto, M., Ensinas, A., Nebra, S., Serra, L., Lozano, M (2013). "Exergetic analysis of the integrated first- and second-generation ethanol production from sugarcane"., Energy, Vol.62, No. 1.
- Torroba, A. (2020). Atlas de los biocombustibles líquidos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José. Costa rica. Recuperado de <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/igo/>
- Norma Cubana 519. (2007). "Oficina Nacional de Normalización. Bebidas alcohólicas. Determinación de aldehídos totales-métodos químicos". La Habana.
- Norma Cubana 535. (2007). Oficina Nacional de Normalización. Bebidas alcohólicas. Determinación de alcoholes superiores-método espectrofotométrico. La Habana.
- Norma Cubana 290. (2007). Oficina Nacional de Normalización. Bebidas alcohólicas. Determinación del grado alcohólico en alcoholes, bebidas alcohólicas destiladas, vinos, licores, bebidas alcohólicas preparadas, cócteles y extractos hidroalcohólicos. La Habana.
- Norma Cubana 291. (2009). Oficina Nacional de Normalización. Bebidas alcohólicas. Determinación de acidez total en bebidas alcohólicas destiladas, vinos, licores, bebidas alcohólica preparadas y cócteles. La Habana.
- Norma Cubana 706. (2010). Oficina Nacional de Normalización. Determinación del tiempo de permanganato. La Habana.
- Norma Cubana 792. (2015). Oficina Nacional de Normalización. Clasificación del etanol. La Habana.