

Simulación preliminar en Aspen Hysys de una planta de producción de levadura *Torula*

Arletis Cruz-Llerena^{1*}, María Alejandra González-Triana², Osney Pérez-Ones², Lourdes Zumalacárregui-de Cárdenas² y Gustavo Saura-Laria¹

1. Departamento de Bioingeniería, Dirección de Biotecnología, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca). Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

* arletis.cruz@icidca.azcuba.cu

2. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae. Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. La Habana, Cuba.

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el proceso de producción de levadura *Torula*, con el simulador Aspen Hysys v10.0. El modelo de simulación, obtenido para el caso base, fue validado con un error relativo menor de 10 %. Se estudiaron tres alternativas de mejora: 1) secado indirecto con gases de combustión, 2) secado directo con aire caliente y 3) digestión anaerobia de los efluentes y generación de electricidad. En la alternativa 1, se reporta un aumento por consumo de combustible equivalente y se reducen los costos por consumo de electricidad en 1 953 372.67 CUP/año. En la alternativa 2, el consumo de electricidad en la etapa de secado se incrementa en un 27.88 %. En la alternativa 3, a partir del biogás obtenido, se reducen los costos por compra de electricidad en 9 656 547.84 CUP/año. Se realizó la evaluación técnico-económica de las alternativas propuestas a partir de la razón beneficio/ costo, donde se concluyó que la alternativa 2 es la que mayor beneficio genera al proceso, para una relación de beneficio/costo de 1.48.

Palabras claves: levadura *torula*, simulación, Aspen Hysys.

ABSTRACT

In the present work, the fodder yeast production process was evaluated, using the Aspen Hysys v10.0 simulator. The simulation model obtained for the base case was validated with a relative error of less than 10%. Three improvements alternatives were studied: 1) indirect drying with combustion gases, 2) direct drying with hot air, and 3) anaerobic digestion of effluents and electricity generation. In alternative 1, an increase in equivalent fuel consumption is reported and the costs for electricity consumption are reduced by 1,953,372.67 CUP/year. In alternative 2 the electricity consumption in the drying stage is increased by 27.88%. In alternative 3, from the biogas obtained, the costs for electricity purchase are reduced by 9,656,547.84 CUP/year. The technical-economic evaluation of the proposed alternatives was carried out based on the benefit/cost ratio, where alternative 2 was found to be the one that generates the greatest benefit to the process, with a benefit-cost ratio of 1.48.

Key words: fodder yeast, simulation, Aspen Hysys.

INTRODUCCIÓN

La levadura forrajera, más conocida como *Torula*, está clasificada taxonómicamente como la especie *Candida utilis* y es la más utilizada para producir proteína unicelular en Cuba. La especie *Candida utilis* es muy empleada por su capacidad de asimilar hexosas y pentosas, además de otros compuestos orgánicos no azucarados, tales como ácidos, alcoholes y aldehídos (1).

Los subproductos de la agricultura, mostos azucarados, residuos lignocelulósicos, hidrolizados de subproductos cárnicos y de pescado pueden ser empleados como fuentes de carbono y nitrógeno para la producción de proteína unicelular. El uso de residuales industriales para la producción de levadura constituye una alternativa atractiva para la reducción de los costos, así como de la contaminación ambiental (2).

En Cuba, debido a la baja disponibilidad de miel final de caña, el uso de las vinazas residuales de la producción de etanol, para la producción de levadura *Torula*, constituye una alternativa con un impacto económico, social y ambiental favorable (3-5).

A pesar de que el empleo de vinazas representa una reducción significativa (60 %) (6) del costo de producción, aún el precio de algunas materias primas, el alto índice de depreciación, así como el aumento del valor del equipamiento de segunda mano, influyen en que los costos de inversión por mejoras del proceso y producción sean más elevados. Por consiguiente, resulta de vital importancia estudiar alternativas que puedan contribuir a la reducción de los costos de este proceso (4).

La simulación de procesos constituye una útil herramienta para la evaluación de plantas industriales de una forma más rápida, económica y completa. Es esencial en la elaboración de mejores diseños, automatización, control y en la optimización; a partir de localizar los problemas de funcionamiento y predecir comportamientos (7). En este sentido, resulta de gran importancia contar con un modelo de simulación para el estudio del proceso de producción de levadura *Torula*.

En el presente trabajo se evalúa el proceso de producción de la levadura *Torula* a partir de la obtención de un modelo de simulación validado para el análisis de posibles alternativas de mejoras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Simulación con el empleo de Aspen Hysys v10.0

Se tomó como referencia una planta de producción de levadura *Torula* de 10 t/d. Para el balance en el fermentador se consideró que la levadura presentaba una concentración celular de biomasa de 10 g/L. Las vinazas de destilería se emplearon como fuente de carbono. Se consideró que tenían una DQO de 75.9 kg/m³, y se requiere un aporte de DQO de 50 kg/m³ para el crecimiento de la levadura, para el rendimiento de un 20 % (8).

Selección de los componentes

Para la simulación de la vinaza se utilizaron componentes representativos, según lo reportado en la literatura (9, 10). En la tabla 1 se muestra la composición másica seleccionada de la vinaza.

Algunos de estos componentes no se encuentran en la base de datos del simulador Aspen Hysys v10.0, por lo que fue necesaria su inserción como hipotéticos. La cisteína se insertó como componente hipotético y se suministraron al simulador los datos de: masa molar (120.2 kg/kmol), punto normal de ebullición (425.9 °C), temperatura crítica (747.9 °C), presión crítica (6 740 kPa), volumen crítico (0.234 m³/kgmol) y factor acéntrico (0.686). En la tabla 2 se presentan los compuestos hipotéticos sólidos insertados en el simulador, con algunas de sus propiedades.

Tabla 1. Composición másica de la vinaza

Componentes de la vinaza	Fórmula química	Fracción másica
Sacarosa	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	0.0120
Dextrosa*	C ₆ H ₁₂ O ₆	0.0600
Ácido acético	C ₂ H ₄ O ₂	0.0030
Agua	H ₂ O	0.9248
Cisteína	C ₃ H ₆ NO ₂ S	0.0002

*Se considera la glucosa+fructuosa.

Tabla 2. Componentes sólidos hipotéticos

Componentes	Fórmula química	Masa molar (kg/kmol)	Densidad (kg/ m ³)
Sulfato de amonio	(NH ₄) ₂ SO ₄	132.14	1 770
Fosfato de amonio	(NH ₄) ₂ HPO ₄	115.03	1 800
Biomasa	C _{3,72} H _{6,28} O _{1,52} N _{0,612}	90.56	1 562

Para el desarrollo de la simulación fue necesaria la inserción de otros componentes disponibles en el simulador: aire, sulfuro de hidrógeno (H₂S) y ácido fosfórico (H₃PO₄).

La tabla 3 muestra los componentes y la composición másica de los gases de combustión empleados en la etapa de secado (9).

Tabla 3. Composición másica de los gases de combustión

Componente	Fórmula química	Fracción másica	
Agua	H ₂ O	0.0850	
Dióxido de carbono	CO ₂	0.1952	
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	0.0002	
Dióxido de azufre	SO ₂	0.0005	
Nitrógeno	N ₂	0.7170	
Parafinas	n-C11	C ₁₁ H ₂₄	0,0001
	n-C12	C ₁₂ H ₂₆	0.0001
	n-C13	C ₁₃ H ₂₈	0.0001
	n-C14	C ₁₄ H ₃₀	0.0001
	n-C15	C ₁₅ H ₃₂	0.0003
	n-C16	C ₁₆ H ₃₄	0.0002
	n-C17	C ₁₇ H ₃₆	0.0001
	n-C18	C ₁₈ H ₃₈	0.0002
	n-C19	C ₁₉ H ₄₀	0,0001
Naftenos	Ciclopentano	C ₅ H ₁₀	0.0003
Asfálticos	Oxigenados (Furano)	C ₄ H ₄ O	0.0005

Selección del paquete de propiedades

Se seleccionó el paquete NRTL, empleado para el equilibrio entre el agua y las sustancias orgánicas (líquido-líquido) a bajas presiones y Peng Robinson para la fase de vapor, por el predominio de hidrocarburos en los gases de combustión.

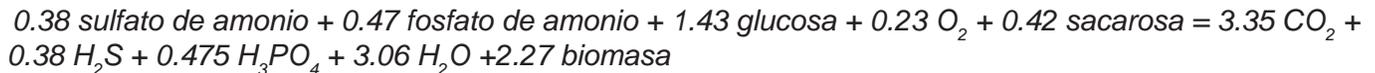
Herramientas de simulación

Simulación del caso base

Para la construcción del modelo de simulación del proceso de producción de levadura *Torula* se emplearon 13 módulos. El módulo *Plate exchanger* se utilizó para simular el enfriamiento de las vinazas (IC-1). Se seleccionó el módulo *Mixer* para representar la mezcla de varios componentes (MIX-1, MIX-2, MIX-3, MIX-4, MIX-5). Por otra parte, el módulo *Tank* permitió simular el fermentador (fermentador) y el almacenamiento de los efluentes obtenidos en la etapa de centrifugación (TK-1). Para simular el suministro de aire se usó un soplador empleado en el proceso de fermentación, para ello se seleccionó un *Compressor*. El módulo *Pump* representó las bombas empleadas en el proceso (P-Vz, P-1, P-2, P-F, P-C, P-E).

El módulo *Heat exchanger* se empleó para simular el sistema de enfriamiento en el fermentador (E-102), debido a que la reacción que ocurre es exotérmica y se le suministró, como dato, la caída de presión ($\Delta P=0$ kPa). El módulo *Adjust* se utilizó a la salida del fermentador (ADJ-1) para ajustar a 35 °C la temperatura de la corriente Mosto F y manipular la variable que representa las pérdidas de energía en el fermentador (se suministró un valor de $-6.277 \cdot 10^6$ kJ/h).

Para representar la generación de biomasa, en esta etapa se insertó la reacción química (7) que tuvo lugar en el fermentador:



Luego el fermento obtenido en esta etapa pasa a las centrífugas, donde ocurre la separación de la crema de levadura y de la corriente líquida de efluentes. El módulo empleado para la simulación de este proceso es *Simple Solid Separator* (centrífuga 1 y centrífuga 2). En las centrífugas 1 y 2, se suministró una caída de presión ($\Delta P= 0$ kPa). Se consideró que en la centrífuga 1, la fracción de sólidos en el líquido es 0 y que la fracción de líquidos por el fondo es 0.3. Mientras que para la centrífuga 2, la fracción de sólidos en el líquido es 0 y que la fracción de líquidos por el fondo es 0.2.

Para la simulación de la etapa de concentración de la crema de levadura, como el simulador Aspen Hysys v10.0 no dispone de módulos de evaporadores, las operaciones unitarias que se llevan a cabo en el evaporador, se adaptan al ambiente de simulación del programa. Los dos vasos evaporadores se simularon con la combinación de los módulos *Cooler* (IC-2 y IC-3) y *Separator* (evaporador 1 y 2). Con el primero se simuló la calandria del equipo en la que se cede energía calorífica y se condensa el vapor y en el segundo se simuló el cuerpo del equipo, donde ocurre la separación de la evaporación y del fluido concentrado. Ambos módulos se conectaron mediante una corriente de calor (Heat Stream) que aporta el calor cedido por el vapor, al condensar en el *Cooler*, al módulo *Separator* (separador de fases).

Se empleó el módulo *Heat exchanger* para simular el calentamiento de la crema de levadura empleada en este proceso (E-101). El módulo *Tee* permitió simular las divisiones de flujo de vapor (Tee-100): el vapor empleado para el calentamiento de la crema de levadura y el vapor utilizado nuevamente en el segundo evaporador.

Para el caso del secado de la crema de levadura se utilizaron varios módulos: el módulo *Component splitter* se empleó para la simulación de parte del cuerpo del secador (secador) y se seleccionó el módulo *Cyclone* (ciclón) para la simulación del ciclón en el secador. También se empleó el módulo *Compressor* para la simulación del ventilador de aire (ventilador). En la tabla 4 se presentan los datos que fueron suministrados a cada corriente del proceso.

En la figura 1 se presenta el modelo de simulación obtenido para el caso base.

Tabla 4. Datos de las corrientes para la simulación del caso base

Corriente	Descripción	Presión (kPa)	Temperatura (°C)	Flujo (kg/h)	Composición
Vinazas	Vinazas de destilerías	101.3	90	27 000	Tabla1
Agua f	Agua de enfriamiento del IC-1	101.3	28	83 380	Agua 100 %
Agua c	Agua caliente del IC-1	-	45	-	-
Fosfato de amonio	Fosfato de amonio sólido	101.3	25	60	Fosfato de amonio 100 %
Sulfato de amonio	Sulfato de amonio sólido	101.3	25	60	Sulfato de amonio 100 %
Agua, agua 1	Agua de dilución de las sales nutrientes	101.3	25	950	Agua 100 %
Aire atm	Aire atmosférico	101.3	25	16 000	(Molar) Oxígeno 21 % Nitrógeno 79 %
Aire	Aire empujado en la fermentación	200	-	-	-
Afría 1	Agua de enfriamiento del fermentador	101.3	28	3 000	-
Agua lavado	Agua de lavado para la crema de levadura	101.3	25	3 000	Agua 100 %
Crema	Crema de levadura a la salida de la bomba P-C	111.3	-	-	-
Crema term	Crema de levadura termolizada	-	85	-	-
Vapor directo	Vapor de calentamiento del primer vaso evaporador	120	130	795	Agua 100 %
Crema conc 2	Crema de levadura concentrada	-	90	-	-
Crema concentrada 2	Crema de levadura a la salida de la bomba P-E	120	-	-	-
Gases de combustión	Gases de combustión alimentados al secador	101.3	500	3 583	Tabla 3
Aire atm	Aire atmosférico del soplador 2	101.3	28	3 000	Aire 100 %
Aire comp-2	Aire a la salida del ventilador del secador	250	-	-	-
Vapores	Vapores que salen del secador	120	300	-	-
Levadura seca	Levadura tratada en el secador	120	90	-	-

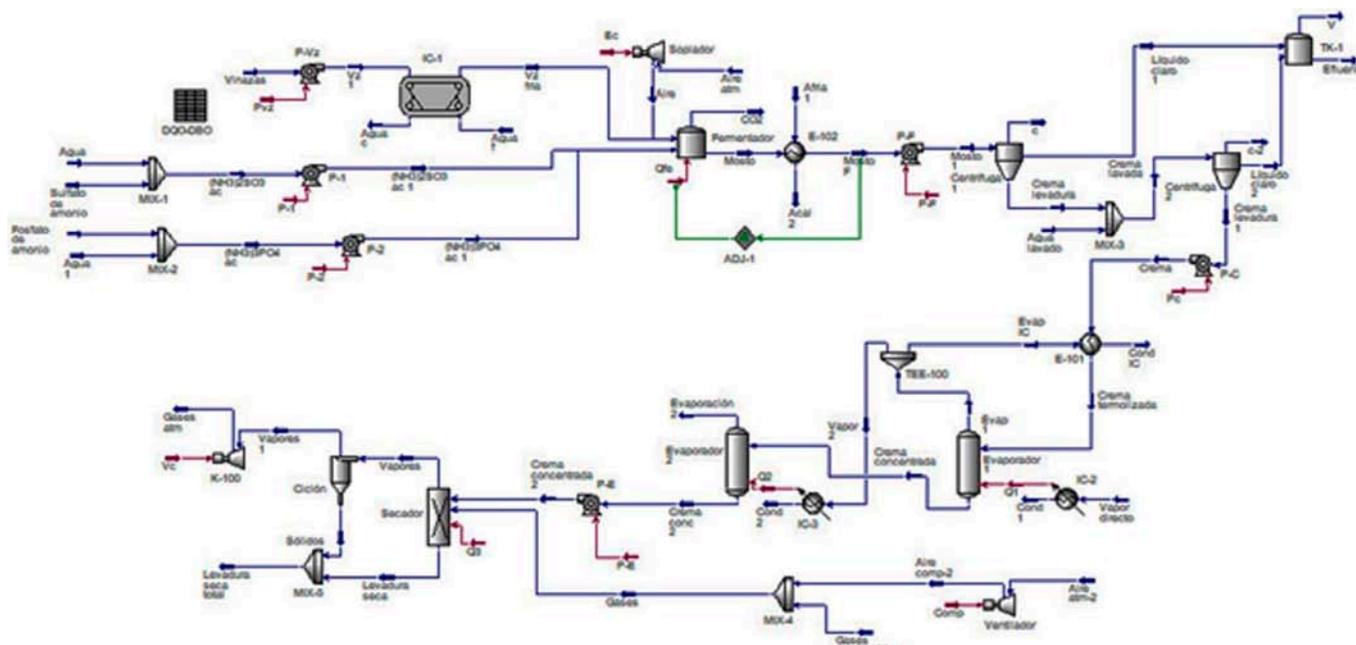


Figura 1. Modelo de simulación del caso base del proceso.

Alternativas de mejoras

Alternativa 1. Secado indirecto con gases de combustión

Se propone eliminar la mezcla de gases de combustión con aire. En la figura 2 se presentan las modificaciones realizadas al modelo de simulación en la etapa de secado.

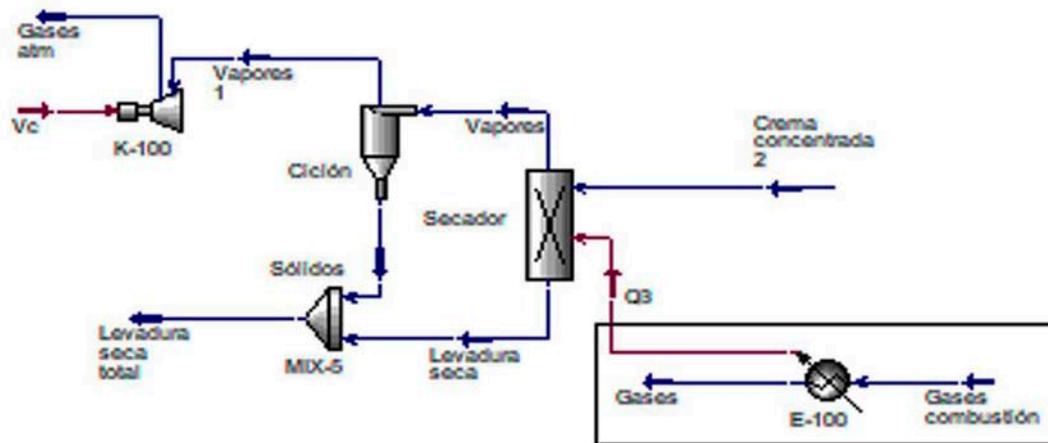


Figura 2. Modelo de simulación de la alternativa 1.

Alternativa 2. Secado directo con aire caliente

Se propone el secado directo con aire caliente con gases de combustión como medio de calentamiento. En la figura 3 se presentan las modificaciones realizadas en la etapa de secado.

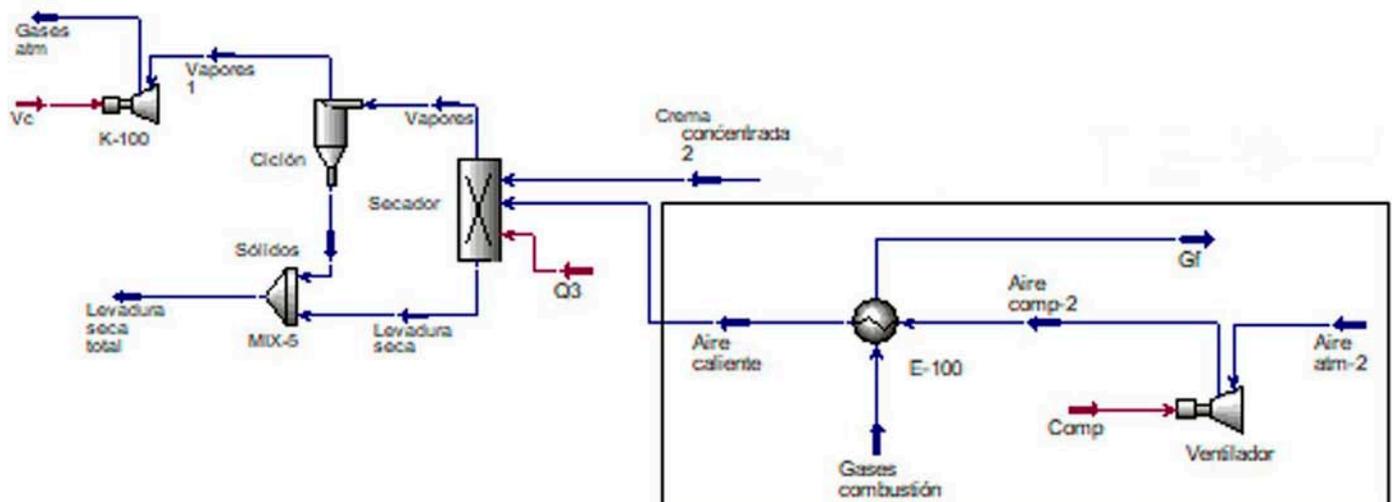


Figura 3. Modelo de simulación de la alternativa 2.

Alternativa 3. Digestión anaerobia de los efluentes de la centrifugación y generación de electricidad

Para la evaluación de esta alternativa se tomó como referencia el modelo propuesto por Cruz-Llerena *et al.* (9), en el que se obtuvo un modelo de simulación para la digestión anaerobia de vinazas y generación de electricidad.

En las alternativas 1 y 2 se determinó el consumo de combustible equivalente, se consideró una composición másica de carbono en los gases de combustión de un 86 %. En el caso de la alternativa 3 se estimó el consumo de combustible, se fijó un índice de generación de vapor de 15 kg vapor/kg combustible.

Validación de los modelos de simulación

Para la validación de los modelos obtenidos en la simulación se realizó la comparación entre los resultados obtenidos en el simulador Aspen Hysys con lo reportado en la literatura y en la planta real. Para aceptar el modelo como validado se consideró un error de validación menor de un 10 %, según lo planteado por Batstone (11).

Análisis económico

Para el análisis económico se determinó el costo de inversión y los ingresos generados en cada una de las alternativas propuestas. En las tres alternativas se lleva a cabo un análisis de beneficio/costo, con el objetivo de determinar si son rentables o no para la planta. En la tabla 5 se presentan los costos y precios utilizados para el cálculo de los beneficios del proyecto.

Tabla 5. Costos y precios

	Costo	Precio
Electricidad (CUP/kWh)	0.18	0.16
Combustible (CUP/L)	12.44	-
Agua (CUP/m ³)	2.88	-

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación del modelo de simulación

En la tabla 6 se presentan los resultados obtenidos en el simulador y su comparación con lo reportado en la planta y en la literatura.

Tabla 6. Comparación de los resultados obtenidos en la simulación y los datos reportados en la literatura y en la planta

Parámetro	Fuente	Valor	Aspen-Hysys	Error relativo (%) y criterio
Concentración de biomasa en el mosto fermentado (g/L)	Planta (8)	10	10.14	1.4
Concentración de biomasa obtenida en la primera etapa de centrifugación (g/L)	Planta	3-4 veces la concentración de biomasa producida en la fermentación	33.30	Cumple
Flujo másico de levadura <i>Torula</i> producida (t/d)	Planta (8)	10	9.6	4.0
Remoción de la DQO alcanzada en la segunda separación (%)	Planta	40-50	41.51	Cumple
Humedad de la levadura seca (% másico)	(12)	7-8	7.11	Cumple
Temperatura del mosto fermentado (°C)	(8)	35.41	37	4.29
Potencia del soplador de aire (kW)	Planta	375	382.1	1.89
Consumo de electricidad (kWh/t)	(6)	1 300	1 206.57	7.19
	(13)	1 256		3.94

A partir de esta comparación se concluye que el modelo de simulación obtenido queda validado con un error relativo menor al 7.5 % (error máximo relativo de 7.19 %). Se obtuvo un flujo másico de efluentes de 1 489 kg/h, un consumo de electricidad en la etapa de secado de 247.9 kWh/t y que la energía térmica cedida en el secador fue de $3.38 \cdot 10^6$ kJ/h (3 583 kg/h de gases de combustión).

Alternativas propuestas

Alternativa 1

En la tabla 7 se reportan los resultados obtenidos en la simulación de la alternativa 1.

Tabla 7. Resultados obtenidos en la alternativa 1

Parámetro	Aspen Hysys
Flujo másico de los gases de combustión (kg/h)	11 480
Calor cedido por los gases de combustión (kJ/h)	$3.6 \cdot 10^6$
Humedad de la levadura seca obtenida (% másico)	7.11
Flujo másico de los vapores obtenidos en el secador (kg/h)	1 405
Flujo másico de levadura seca (kg/h)	395.7

En la tabla 7 se muestra que para el secado indirecto con gases de combustión se requiere de un flujo de gases (11 480 kg/h) tres veces superior a lo consumido en el caso base (3 583 kg/h). Por lo cual, en esta alternativa se reporta un elevado consumo de combustible equivalente a 725.61 kg/h, para el secado de la crema de levadura.

El secado indirecto que se propone en esta alternativa representa una propuesta que es ampliamente utilizada a nivel industrial para retirar la humedad de sustancias o materiales que son sensibles a las altas temperaturas (14). Es necesario destacar que el limitar el contacto directo de los gases de combustión con la crema de levadura puede proporcionar beneficios a las características organolépticas del producto final.

Alternativa 2

En la tabla 8 se presentan los resultados obtenidos en la simulación.

Tabla 8. Resultados obtenidos en la simulación de la alternativa 2

Parámetro	Aspen Hysys
Potencia consumida por el ventilador (kW)	148.7
Humedad de la levadura seca (% másico)	7.11
Flujo másico de levadura seca producida (kg/h)	399.5
Flujo másico de vapores generados en el secador (kg/h)	5 899
Calor cedido por el aire caliente en el secador (kJ/h)	$2.78 \cdot 10^6$

El flujo de aire que se emplea en la etapa de secado de esta alternativa se incrementó a 4 500 kg/h que representa un aumento del 50 % de lo consumido en el caso base (3 000 kg/h), por lo que se reporta un aumento en la potencia consumida por el ventilador de 49.14 kW en comparación con el caso base (99.56 kW). El consumo de electricidad en la etapa de secado es de 371.75 kWh/t, lo que se incrementa en un 27.88 % a lo obtenido en el caso base (247.9 kWh/t). La humedad de la levadura seca obtenida (7.11 %) no varía con respecto a lo reportado en el caso base.

En este caso, al igual que en la alternativa 1, pueden existir beneficios en las características organolépticas del producto final, ya que se elimina el contacto directo con los gases de combustión.

Alternativa 3

En la tabla 9 se presentan los resultados alcanzados en la simulación de la tercera alternativa propuesta.

Tabla 9. Resultados obtenidos en la simulación de la alternativa 3

Parámetro	Aspen Hysys
Flujo másico del biogás generado en el biodigestor (kg/h)	1 594
Metano producido (Nm ³ /h)	622.8
Eficiencia de remoción de la DQO (%)	85.56
Potencia generada en el turbogenerador (kW)	Etapas 1: 248.6
	Etapas 2: 241.7
	Total: 490.2
Pérdidas en el generador de vapor (kJ/h)	$4.89 \cdot 10^5$
Índice de generación de electricidad por cantidad de metano producido (kWh/m ³)	0.75
Rendimiento (Nm _{3CH4} /DQO _r)	0.24
Potencia consumida por el compresor (kW)	36.89
Potencia consumida por el ventilador de aire (kW)	3.96
Potencia consumida por la bomba que alimenta (kW)	7.27
Flujo másico de vapor de baja generado (kg/h)	2 830

Como se observa en la tabla 9, la eficiencia de remoción de la DQO obtenida (85.56 %) se encuentra entre los valores reportados por varios autores (15,16) de 70-80 % para una planta de ge-

neración de biogás lo que propicia, en gran medida, la disminución del impacto ambiental negativo de estos efluentes.

La electricidad neta producida (1 104.95 kWh/ tonelada de levadura) representa un 91.58 % del consumo de electricidad generado en la producción de levadura Torula. Se genera en la segunda etapa del termocompresor un flujo de vapor de baja de 2 830 kg/h. Este vapor generado, contribuye a un ahorro del combustible equivalente consumido para la generación del vapor en la planta de 13 663 883 CUP/ año.

A partir de la aplicación de la digestión anaerobia y la generación de electricidad como alternativa de tratamiento de los efluentes obtenidos en el proceso de producción de levadura Torula, se reducen los impactos negativos ocasionados por este residual. Se logra disminuir la carga orgánica y se genera electricidad, a partir de la producción de biogás. Los efluentes tratados pueden emplearse en el fertirriego.

Análisis económico

Alternativa 1

Los beneficios obtenidos están referidos a la disminución del consumo energético de la planta en el sistema de secado, con lo que se obtienen ganancias por concepto de ahorro de energía eléctrica. También se generan beneficios a través de los ingresos producidos por concepto de venta de la levadura Torula, obtenida con una mejor calidad.

Los costos están asociados al incremento que se produce en el flujo de los gases de combustión, que son analizados por concepto de compra del combustible equivalente y por la inversión realizada en la compra del equipamiento que se emplea en la alternativa (secador de contacto indirecto).

Alternativa 2

Los beneficios están asociados a los ingresos por concepto de venta de levadura Torula de mejor calidad.

Los costos en esta propuesta están asociados a los gastos generados por compra de electricidad, al emplear un ventilador que reporta un aumento en el consumo energético y a los gastos producidos igualmente por concepto de compra del combustible equivalente. También se tuvo en cuenta el costo del intercambiador de calor empleado en esta alternativa.

Alternativa 3

Los beneficios están referidos al ahorro por concepto de compra de electricidad, compra de agua, a partir de los efluentes que se trataron, los cuales pueden emplearse como agua de proceso o agua de riego y al ahorro por consumo del combustible, por el vapor de baja que se genera.

Los costos se asocian a la compra de combustible, ya que se produce un aumento del consumo de vapor en el precalentamiento de los efluentes. También se tuvieron en cuenta los costos por concepto de compra de agua, debido a que se reporta un mayor consumo del agua empleada, en las etapas de lavado del biogás y generación de vapor.

En la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos para el análisis del incremento de combustible equivalente, en las alternativas 1 y 2.

Tabla 10. Incremento del consumo de combustible equivalente

Parámetro	Caso base	Alternativa 1	Alternativa 2
Flujo de combustible (kg/h)	229.6	725.61	313.26
Incremento por consumo de combustible equivalente (kg/h)	-	496.55	84.20

En la tabla 11 aparecen los resultados obtenidos, a partir del análisis de beneficio/costo realizado para cada alternativa.

Tabla 11. Resultados de los indicadores económicos

Indicador	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Beneficios totales (CUP/año)	11 328 804.67	9 375 432	23 724 921.34
Costos totales (CUP/año)	37 401 843.99	6 339 229.48	18 841 456.93
Relación beneficio/costo	0.30	1.48	1.26

CONCLUSIONES

1. El modelo de simulación del caso base obtenido fue validado con un error relativo menor que un 5 %, en la mayoría de las variables analizadas, excepto en el consumo de electricidad por tonelada de levadura producida que difiere en 7.19 %.
2. Se propusieron tres alternativas de mejora del proceso: (1) secado indirecto con gases de combustión, (2) secado directo con aire caliente con gases de combustión como medio de calentamiento y (3) digestión anaerobia de los efluentes de la centrifugación y generación de electricidad, que permitió obtener ingresos por venta de una levadura *Torula* con mejor calidad y por ahorro en el consumo de electricidad y combustible equivalente.
3. Se realizó el análisis técnico-económico de las alternativas propuestas en el que se determinó que la alternativa de secado directo con aire caliente es la que brinda los mejores beneficios en el proceso de producción de levadura *Torula*. Se obtuvo una razón de beneficio/costo de 1.48, para un incremento por concepto de venta de levadura de 9 375 432 CUP/año.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Rodríguez B, Iben Ch, Valdivié M, Martínez M. Perfil de ácidos grasos de la levadura *torula* (*Candida utilis*) desarrollada en vinaza de destilerías. Nota técnica. Revista Cubana de Ciencia Agrícola. 2012; 46(2):199-201.
2. Kieliszek M, Kot AM, Bzducha-Wrobel A, BLazejak S, Gientka I, Kurcz A. Biotechnological use of *Candida* yeasts in the food industry: A review. Fungal Biology Reviews. 2017; 31:185-198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fbr.2017.06.001>
3. Isaac E, González VM, Miño JE, González E. Diseño óptimo económico de la etapa deconcentración de crema para la obtención de levadura *torula* en una destilería de etanol. Centro Azúcar. 2015;42(3):10-22.
4. Garrido N, Navarro H, Díaz M, Pérez I. Evaluación de alternativas de producción de levadura forrajera a partir de vinazas mediante simulación con SuperPro Designer. ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 2010;44(2):34-40.
5. Díaz M. Consideraciones sobre la interrelación etanol-levadura *torula* en un complejo agroindustrial. Centro Azúcar. 2017;44(4):33-43.
6. Díaz M, Alonso D. Estudio sobre la interrelación etanol, levadura *torula* y producción de biogás. XIV Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados; Junio 26-30; La Habana, Cuba, 2017. <https://www.researchgate.net/publication/318153180>.
7. Valderrama, J.O.; Toselli, L.A.; Faúndez, C.A. Advances on modeling and simulation of alcoholic distillation. Part 2: process simulation. Food and Bioproducts Processing. 2012; 90:832-40.
8. Pérez I. Diseño de una planta de levadura *Torula* utilizando la herramienta de software SuperPro Designer. Revista Cubana de Química. 2006;18(1):100-6.

9. Cruz-Llerena A, Pérez-Ones O, Zumalacárregui-de Cárdenas L, Pérez-de los Ríos JL. Techno-Economic Analysis of Vinasse Treatment Alternatives Through Process Simulation: A Case Study of Cuban Distillery. Waste and Biomass Valorization, (Preprint). ISSN 1877-265X. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-518806/v1>
10. Noa-Bolaño A, Pérez-Ones O, Zumalacárregui-de Cárdenas L, Pérez-de los Ríos JL. Simulation of concentration and incineration as an alternative for vinasses' treatment. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 2020, 19(3):1265-1275.
11. Batstone DJ, Keller J. Industrial applications of the IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1). Water Science and Technology. 2003; 47(12): 199–206.
12. Díaz M, Saura G, Pérez I. La producción de levadura *Candida utilis* (levadura Torula). Resultados de los institutos cubanos de investigación Desarrollo e innovación en las tecnologías sobre azúcar y derivados. La Habana, Cuba: Instituto Cubano de Investigación de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca); 2019. p. 338-51.
13. Herrera S. Síntesis e integración de tecnologías de producción de etanol y otros productos a partir de caña de azúcar [Trabajo de diploma]. Santa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas; 2016.
14. Manual de operación del equipo de secado [22/11/2021]. Available from: <https://ingenieria.bogota.unal.edu.co/en/component/phocadownload/category/424-secador-indirecto.html?download=2339:secado-indirecto-guia-practica>.
15. Lorenzo Y, Valdés A, Domenech F, Rojas L, Eng F. Cálculos técnicos en el diseño de una planta de biogás. Caso de estudio "Tratamientos de vinazas de destilerías en reactores UASB". ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar. 2014;48(2):29-34.
16. Lorenzo Y, Doménech F, Eng F, Almazán O, Chanfón JM. Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB. Tecnología química. 2015;XXXV(1):108-23.