

Artículo Original

**EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE LEVADURA
TORULA A PARTIR DE BALANCES EN SECCIONES
DE LA PLANTA**

**ECONOMIC EVALUATION OF TORULA YEAST PRODUCTION FROM
BALANCES IN PLANT SECTIONS**

Massiel Figueroa Rodríguez ^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-3780-876X>

Osney Pérez Ones ¹ <https://orcid.org/0000-0002-0366-0317>

Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas ¹ <https://orcid.org/0000-0001-6921-737X>

Arletis Cruz Llerena ^{1,2} <https://orcid.org/0000-0002-8113-1592>

¹ 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.

² Departamento de Alcohol, Levadura y Alimento Animal, Dirección de Derivados, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (ICIDCA). Vía Blanca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

Recibido: Abril 9, 2022; Revisado: Abril 25, 2022; Aceptado: Mayo 9, 2022

RESUMEN

Introducción:

Las condiciones actuales de operación del proceso de producción de levadura torula a partir de las vinazas de destilería en la Unidad Empresarial de Base "Antonio Sánchez", en Cienfuegos, fueron analizadas mediante los balances de masa y energía en algunas secciones de la planta.

Objetivo:

Evaluar el proceso de producción de la levadura torula a partir de la obtención de los balances de masa y energía.

Materiales y métodos:

Se calculó el flujo de agua de enfriamiento de las vinazas, la biomasa producto de la fermentación y el flujo de crema de levadura obtenido de la primera centrifugación, empleando el Excel. Se realizó una prueba de hipótesis en el *Statgraphics Centurion XVII* para analizar las mediciones realizadas en la planta para un cambio en las sales nutrientes y se evaluó la incidencia del cambio de fuente de nitrógeno sobre los costos de materias primas.



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Massiel Figueroa, Email: mfigueroa@quimica.cujae.edu.cu



Resultados y discusión:

Se obtuvo que la biomasa a la salida del fermentador representa el 1,46 % del mosto producido, con una concentración de 10,05 g/L y se compararon los valores calculados con los reportados por el simulador Aspen Hysys con un error relativo máximo inferior al 3 %.

Conclusiones:

El proceso se vio beneficiado al utilizarse la urea como fuente de nitrógeno, ya que se determinó una reducción en los costos de materias primas por tonelada de levadura producida.

Palabras clave: balances de masa y energía; costo de producción; levadura torula; sales nutrientes.

ABSTRACT

Introduction:

The current operating conditions of the torula yeast production process from distillery vinasse at the “Antonio Sanchez” Basic Business Unit (UEB), in Cienfuegos, were analyzed by means of mass and energy balances in some sections of the plant.

Objective:

Evaluate the torula yeast production process by obtaining mass and energy balances.

Materials and methods:

The flow of cooling water from the vinasses, the fermentation biomass product and the flow of yeast cream obtained from the first centrifuge were calculated using Excel. A hypothesis test was carried out in Statgraphics Centurion XVII to analyze the measurements made in the plant for a change in nutrient salts and the incidence of the change in nitrogen source on raw materials costs was evaluated.

Results and discussion:

It was obtained that the biomass at the fermenter outlet represents 1.46% of the must produced, with a concentration of 10.05g/L. The calculated values were compared with those reported by the Aspen Hysys simulator with a maximum relative error of less than 3%.

Conclusions:

The process benefited from the use of urea as a nitrogen source, since a reduction in raw material costs per ton of yeast produced was determined.

Keywords: mass and energy balance; production cost; torula yeast; nutrients salts.

1. INTRODUCCIÓN

La producción de levadura torula o forrajera constituye una tecnología de fermentación aeróbica que está seguida por etapas de separación centrífuga, concentración y secado. Dicha tecnología, originaria de los años setenta, emplea mieles de caña de azúcar o vinazas como fuente de carbono, así como sulfato de amonio y fosfato de amonio como fuentes de nitrógeno y fósforo respectivamente; estas últimas materias son de importación con elevados precios en el mercado internacional (Torres y col., 2016),

(Díaz y col., 2019). El sustrato tradicionalmente utilizado en Cuba para la producción de levadura forrajera ha sido la miel final de caña. A partir de los años 90 del siglo XX, el empleo de este sustrato para la producción de levadura presenta problemas de índole económico y de disponibilidad; por lo que estudios realizados demostraron que las vinazas de destilería, residuo de gran potencialidad en la industria alcoholera cubana, podían ser usadas para la producción de proteína unicelular (Pérez y col., 2015), (Noa-Bolaños y col., 2020). La sustitución de las vinazas de destilería por la miel final ha significado el ahorro del costo de la miel, pero aun así los costos de producción de levadura forrajera están fuertemente influenciados por los altos precios de algunos nutrientes (Garrido y col., 2010).

Por esta razón, se propone como objetivo de trabajo evaluar el proceso de producción de la levadura torula a partir de la obtención de los balances de masa y energía.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Balance de energía en el sistema de enfriamiento de vinazas

Las vinazas de destilería deben poseer una temperatura determinada antes de entrar al fermentador. Para determinar el flujo de agua de enfriamiento se realizan los balances correspondientes, se asume un 2 % de pérdidas y se dispone de los datos de operación ilustrados en la tabla 1.

Tabla 1. Datos de operación en el sistema de enfriamiento de vinazas

<i>Fluido</i>	<i>Flujo másico (kg/h)</i>	<i>Capacidad calórica (kJ/kg °C)</i>	<i>Temperatura de entrada (°C)</i>	<i>Temperatura de salida (°C)</i>
Vinazas	27 000	3,9849	90	35
Agua	-	4,1816	28	45

Los valores de las capacidades calóricas de ambos fluidos fueron extraídos de (Jiménez y col., 2015).

Los cálculos de los balances se efectúan mediante las siguientes ecuaciones:

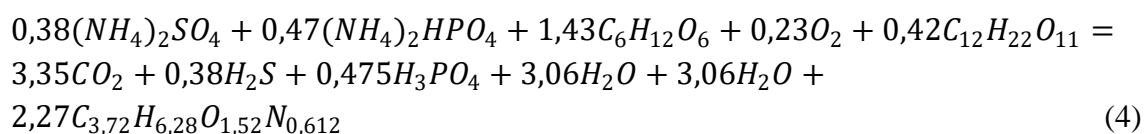
$$Q_{ced} = m_{vinazas} C_{p_{vinazas}} \Delta T_{vinazas} \quad (1)$$

$$Q_{abs} = m_{agua} C_{p_{agua}} \Delta T_{agua} \quad (2)$$

$$\% \text{ pérdidas} = \frac{Q_{abs} + Q_{ced}}{Q_{ced}} * 100 \quad (3)$$

2.2. Balance de materiales en el fermentador

El objetivo fundamental del proceso fermentativo en la producción de torula es la obtención de biomasa. Esta etapa del proceso está caracterizada por la siguiente reacción química (Pérez, 2006):



El mosto obtenido en la corriente de salida del fermentador presenta un volumen de 27,39 m³/h. El fermentador está siendo alimentado con 440 kg/h de fosfato de amonio

acuoso, 1 010 kg/h de sulfato de amonio acuoso, 16 000 kg/h de oxígeno y 27 000 kg/h de vinazas. En las tablas 2 y 3 se muestran los principales componentes que integran a algunas de las materias primas fundamentales del proceso (Cruz, 2020).

Tabla 2. Composición másica de las vinazas

<i>Componentes de las vinazas</i>	<i>Fórmula química</i>	<i>Fracción másica</i>
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

Tabla 3. Composición másica del sulfato de amonio y fosfato de amonio acuoso

<i>Componentes</i>	<i>Sulfato de amonio</i>	<i>Fosfato de amonio</i>
	<i>Fracción másica</i>	
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,0594	-
(NH ₃) ₂ PO ₄	-	0,1364
H ₂ O	0,9406	0,8636

Se procede al cálculo del grado de avance de la reacción, teniendo en cuenta una conversión de 95 %.

$$\text{Flujo másico: } m_{i_0} = \text{fracción másica} * \text{flujo} \quad (5)$$

$$\text{Grado de avance máximo: } \varepsilon_{m\acute{a}x} = \frac{m_{i_0}}{v_i} \quad (6)$$

Para proceder al cálculo del grado de avance de la reacción se toma el grado de avance máximo de menor valor, el cual corresponde a la sustancia limitante:

Grado de avance de la reacción:

$$\varepsilon = \varepsilon_{m\acute{a}x} * x \quad (7)$$

Luego, con los coeficientes estequiométricos y el grado de avance se calculan las masas que reaccionan o se forman y los flujos que salen del fermentador para cada compuesto:

$$m_{i_{reacc \text{ o forma}}} = v_i * \varepsilon \quad (8)$$

$$m_{i_{sale}} = m_{i_0} \pm m_{i_{reacc \text{ o forma}}} \quad (9)$$

Flujo de salida total del fermentador:

$$m_{sale} = \sum m_{i_{sale}} \quad (10)$$

2.3. Balance de sólidos en la primera centrífuga

En la primera centrífuga entra el mosto obtenido de la fermentación y desemulsión. En esta primera etapa se separan la crema de levadura de los líquidos residuales. El flujo crema de levadura obtenida puede ser hallado mediante las siguientes ecuaciones de balance de masa:

$$\text{Balance total en la centrífuga: } \text{mosto} = \text{líquido claro} + \text{crema de levadura} \quad (11)$$

Balace de sólidos en la centrífuga:

$$\frac{\% m.s.(mosto)}{100} * mosto = \frac{\% m.s.(crema de levadura)}{100} * crema de levadura \quad (12)$$

Para los cálculos se cuenta con los datos de composición reportados en la tabla 4.

Tabla 4. Composición de las corrientes

<i>Compuestos</i>	<i>Composición de sólidos (% m.s.)</i>	<i>Composición de líquidos (% m.h.)</i>
Mosto	1,53	98,47
Crema de levadura	3,31	96,69
Líquidos residuales	0	100

2.4. Posibilidad de la sustitución del sulfato de amonio por urea

Con el objetivo de disminuir los costos de producción en el proceso, se evalúa la posibilidad de sustituir en el área de fermentación el fosfato de amonio por urea. Para ello se realizan pruebas de hipótesis de comparación de medias y varianzas, empleando *Statgraphics Centurion XVII*, donde se analiza la influencia de las nuevas sales en la concentración de biomasa y nitrógeno para valores de pH entre 2,7, y 5,1 y temperaturas entre 31 y 34 °C. Estos valores habían sido obtenidos en el ICIDCA en estudios anteriores.

Se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$\text{Media: } X = \frac{\sum X_i}{n} \quad (13)$$

$$\text{Varianza: } S^2 = \frac{\sum (X_i - X)^2}{n-1} \quad (14)$$

2.5. Análisis económico

El proceso de producción de torula en Cuba se caracteriza por altos costos de producción, por lo que se evalúa la incidencia de las sales nutrientes en el costo de las materias primas. Para ello se cuenta con los datos reportados en la tabla 5, los cuales fueron extraídos de la base de precios del Grupo Empresarial AZCUBA en el 2021.

Tabla 5. Índices de consumo y precios de las materias primas

<i>Materia prima</i>	<i>Índice de consumo (t/t)</i>	<i>Precio (CUP/t)</i>
Sulfato de amonio	0,3500	6 977,95
Fosfato de amonio	0,0190	11 413,25
Urea	0,1690	6 519,33
Antiespumante	0,0027	63 784,56
Ácido nítrico	0,0001	9 312,00
Sosa cáustica	0,0020	2 078,88

Para determinar los costos de materias primas se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Costo materia prima (CUP)} = \text{masa de levadura (t)} * \text{índice de consumo} \left(\frac{t}{t}\right) * \text{precio} \left(\frac{CUP}{t}\right) \quad (15)$$

$$\text{Costo unitario (CUP)} = \sum \text{costo de materia prima} \quad (16)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados de los cálculos realizados en la sección de enfriamiento de las vinazas

En la sección de enfriamiento de las vinazas se calcula el flujo de agua de enfriamiento y el resultado obtenido se ajusta a las condiciones de la planta, ver tabla 6.

Tabla 6. Resultados del balance de energía en la sección de enfriamiento de las vinazas

<i>Variable calculada</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad de medida</i>
Calor cedido (Qced)	-5 917 576,50	kJ
Calor absorbido (Qabs)	5 799 224,97	kJ
Flujo másico de agua de enfriamiento (m agua)	81 579,03	kg/h

3.2. Resultados del balance de materiales en el fermentador

Se determina que la sustancia limitante de la reacción que ocurre en el fermentador es el fosfato de amonio y se obtiene que el grado de avance de la reacción es 121,31 kg/h. Para el cálculo del flujo másico de biomasa en la corriente de salida del fermentador se hace un balance de materiales, cuyos resultados aparecen reportados en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos del balance de materiales en el fermentador

<i>Componente</i>	<i>Corriente de entrada (m_{i_0}) (kg/h)</i>	<i>Reacciona o forma ($m_{i_{reacc\ o\ forma}}$) (kg/h)</i>	<i>Corriente de salida ($m_{i_{sale}}$) (kg/h)</i>
Vinazas	27 000	-	-
Sacarosa	324	-50,95	273,05
Glucosa	1 620	-173,47	1 446,53
Fosfato de amonio	60,016	-57,02	3,001
Sulfato de amonio	59,994	-46,10	13,89
O ₂	16 000	-27,90	15 972,10
CO ₂	-	406,38	406,38
H ₂ S	-	46,10	46,10
H ₃ PO ₄	-	57,62	57,62
H ₂ O	-	371,21	371,21
Biomasa	-	275,37	275,37
Total	18 064,01	801,25	18 865,26

El flujo de biomasa obtenido es de 275,37 kg/h, con una concentración de 10,05 g/L y representa un 1,46 % del mosto a la salida del fermentador.

3.3. Resultados del balance de sólidos en la primera centrífuga

A la salida de la primera centrífuga se obtiene un flujo de crema de levadura de 8 739,21 kg/h, de la cual 289,27 kg es de masa seca, es decir, el 3,31 %. A partir del balance total en el equipo, se determina que el flujo de líquido residual es de 10 126,04 kg/h.

3.4. Comparación entre los valores calculados por los balances y los obtenidos en el simulador Aspen Hysys

En la tabla 8 se muestra una comparación entre las variables calculadas y los resultados obtenidos en el simulador Aspen Hysys según (González, 2021).

Tabla 8. Comparación entre las variables calculadas por los balances y los valores obtenidos en Aspen Hysys

<i>Parámetro</i>	<i>Valor calculado</i>	<i>Aspen Hysys</i>	<i>Error relativo (%)</i>
Flujo másico del agua de enfriamiento (kg/h)	81 579,03	83 380,00	2,20
Flujo másico de la biomasa a la salida del fermentador (kg/h)	275,37	277,6	0,81
Concentración de la biomasa a la salida del fermentador (g/L)	10,05	10,14	0,90
Flujo másico de crema de levadura a la salida de la primera centrífuga (kg/h)	8 739,21	8 515,00	2,57

Los valores obtenidos mediante los balances son similares a los del simulador Aspen Hysys con un error relativo inferior a 3 % (error máximo relativo de 2,57 %). Por tanto se comprueba la veracidad de los resultados; por lo que los valores obtenidos se ajustan a las condiciones de operación de la planta.

3.5. Resultados de la posibilidad de sustitución de fosfato de amonio por urea

Las mediciones realizadas en la planta de producción de levadura torula durante el pasado mes de enero (tabla 9) permiten analizar la influencia de las sales nutrientes sobre las concentraciones de nitrógeno y biomasa. Los valores de media y varianza hallados aparecen reportados en la tabla 10.

Tabla 9. Mediciones realizadas para analizar la influencia de las sales nutrientes

<i>Día</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>pH</i>	<i>Biomasa (g/L)</i>	<i>Nitrógeno (g/L)</i>	<i>Fuente de nitrógeno</i>
1	35	2,7	6,6	207	Sulfato
2	33	3,4	3,9	365	Sulfato
3	33	4,7	4,0	165	Sulfato
4	35	5,1	5,0	169	Sulfato
5	35	3,3	4,0	186	Sulfato
6	35	3,9	3,7	245	Sulfato
7	35	4,3	4,9	146	Urea
8	35	3,6	5,3	144	Urea
9	33	4,3	4,9	140	Urea
10	31	4,4	4,6	232	Urea
11	34	2,7	5,4	245	Urea
12	35	2,8	5,3	198	Urea

Tabla 10. Resultados de las medias y varianza para las concentraciones de nitrógeno y biomasa para ambas fuentes de nitrógeno

	<i>Sulfato de amonio</i>		<i>Urea</i>	
	<i>Concentración de nitrógeno</i>	<i>Concentración de biomasa</i>	<i>Concentración de nitrógeno</i>	<i>Concentración de biomasa</i>
Media	222,833	4,533	184,167	5,067
Varianza	5 710,567	1,231	2 240,167	0,099

En la prueba de hipótesis se obtiene para ambos casos que se cumple la hipótesis nula por lo que los resultados obtenidos en las mediciones de las concentraciones de nitrógeno y biomasa no sufren cambios cuando se sustituye el sulfato de amonio por la urea, es decir, son similares para ambas fuentes de nitrógeno utilizadas. Por tanto, se comprueba que la cepa responde favorablemente desde el punto de vista fisiológico en presencia de urea.

3.6. Resultados del análisis económico

Los costos de las materias primas para una tonelada de levadura producida se calculan empleando las ecuaciones 14 y 15. Los resultados se muestran en la tabla 11:

Tabla 11. Costos de las materias primas

<i>Materia prima</i>	<i>Sulfato de amonio</i>	<i>Urea</i>
	<i>Costo (CUP)</i>	<i>Costo (CUP)</i>
Fuente de nitrógeno	2 442,28	1 101,77
Fosfato de amonio	216,85	216,85
Antiespumante	172,22	172,22
Ácido nítrico	0,93	0,93
Sosa cáustica	4,16	4,16
Costo unitario	2 836,44	1 495,93

Si se utilizara como fuente de nitrógeno la urea el proceso se vería beneficiado ya que provoca una reducción de los costos de las materias primas de 1 340,52 CUP por tonelada de levadura producida, por lo que hay una incidencia positiva sobre los costos de producción de la levadura torula.

4. CONCLUSIONES

1. En el sistema de enfriamiento de las vinazas se obtuvo un flujo de agua de 81 579,03 kg/h, en el fermentador se determinó que el flujo de la biomasa es de 275,37 kg/h lo cual representa el 1,46 % de la corriente de salida y que la crema de levadura como producto de la primera centrifugación es de 8 739,21 kg/h.
2. Mediante una prueba de hipótesis se comprobó que la cepa no presenta afectaciones desde el punto de vista fisiológico ante el cambio de la fuente de nitrógeno.
3. Los costos de materias primas empleando como fuente de nitrógeno la urea, evidenció que el proceso se vería beneficiado al determinarse una reducción de los costos de 1 340,52 CUP por tonelada de levadura producida.

REFERENCIAS

- Cruz, A., Propuestas de mejoras en la Ronera San José basadas en la simulación de procesos., Tesis presentada en opción al título de Máster en Análisis y Control de Procesos, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba, 2020.
- Díaz, M., Saura, G., y 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, pp. 338-51.
- Garrido, N., Navarro, H., Díaz, M., y Pérez, I., Evaluación de alternativas de producción de levadura forrajera a partir de vinazas mediante la simulación con SuperPro Designer., ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, Vol. 44, No. 2, 2010, pp. 34-40.
https://www.researchgate.net/publication/311207673_Evaluacion_de_alternativas_de_produccion_de_levadura_forrajera_de_vinazas_mediante_simulacion_con_SuperPro_Designer
- González, M., Simulación preliminar en Aspen Hysys de una planta de producción de levadura Torula., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba, 2021.
<https://cloud.quimica.cujae.edu.cu/apps/files/?dir=/Biblioteca/Ejercicio%20de%20Culminaci%C3%B3n%20de%20Estudios/Ejercicio%20de%20Culminaci%C3%B3n%20de%20Estudios%202021&fileid=2330777>
- Jiménez, O., González, V., Miño, J., y González, E., Diseño óptimo económico de la etapa de preparación de residuos de destilería de etanol para producir crema nutriente., Centro Azúcar, Vol. 42, No. 2, 2015, pp. 61-71.
http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/218
- Noa-Bolaño, A., Pérez-Ones, O., Zumalacárregui-de Cárdenas, L., & Pérez-de los Ríos, J.L., Simulation of concentration and incineration as an alternative for vinasses' treatment., Revista Mexicana de Ingeniería Química, Vol. 19, No. 3, 2020, pp. 1265-1275. <http://rmiq.org/ojs311/index.php/rmiq/article/view/883>
- Pérez, E., González, V., Miño, J., y González, E., Diseño óptimo económico de la etapa de concentración de crema para la obtención de levadura Torula en una destilería de etanol., Centro Azúcar, Vol. 42, No. 3, 2015, pp. 10-22.
http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/223
- Pérez, I., Diseño de una planta de levadura Torula utilizando la herramienta de Software SuperPro Designer., Revista Cubana de Química, Vol. XVIII, No. 1, 2006, pp. 100-106. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543688045>
- Torres, A., Díaz, M., y Saura, G., Factibilidad económica de alternativas de inversión para reducir el costo de producción de la levadura Torula., Centro Azúcar, Vol. 43, No. 1, 2016, pp. 10-17.
http://centrozucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/125

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Est. Massiel Figuroa Rodríguez. Realizó el estudio, análisis y escritura del artículo. Realizó los cálculos en el Excel.
- Dr.C. Osney Pérez Ones. Colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo.
- Dra.C. Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas. Colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo.
- M.Sc. Arletis Cruz Llerena. Colaboró con el análisis de los resultados y la escritura del artículo.