

# Rentabilidad económica y análisis de sensibilidad de una planta de producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña de azúcar

## Economic profitability and sensitivity analysis of a citric acid production plant from sugarcane bagasse

Luis E. Guerra Rodríguez<sup>1</sup>, Amaury Pérez Sánchez<sup>1,\*</sup>, Luis M. Zayas Zayas<sup>1</sup>

1- Facultad de Ciencias Aplicadas, Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz". Carretera Circunvalación Norte, Km. 5½, e/ Camino Viejo de Nuevitas y Ave. Ignacio Agramonte, Camagüey, Cuba. CP 74650.

\* E-mail: amauryps@nauta.cu

### Resumen

Se llevó a cabo la simulación de una planta de producción de ácido cítrico de 5.000 t/año de capacidad, utilizando bagazo de caña de azúcar como materia prima. Se utilizó el simulador de procesos SuperPro Designer® v.8.5, para determinar la rentabilidad económica del proyecto. Se realizó un estudio de sensibilidad que incluyó 15 corridas para evaluar la influencia de 6 variables de entrada mediante 3 indicadores económicos: Valor Actual Neto, Tasa Interna de Retorno y Período de Recuperación de la Inversión, mediante un diseño estadístico del tipo superficie de respuesta. Los resultados obtenidos en el estudio de sensibilidad fueron posteriormente optimizados. Se necesitaría una inversión de US\$ 29 millones para construir la planta. El proyecto tendría ganancias netas anuales de US\$ 6 millones, un Valor Actual Neto de US\$ 2.429.000, una Tasa Interna de Retorno del 16,48%, y el Período de Recuperación de la Inversión es de 4,69 años.

Palabras clave: Ácido cítrico; Bagazo de caña de azúcar; SuperPro Designer®; Análisis de sensibilidad; Optimización.

### Abstract

The simulation of 5.000 Ton/year citric acid production plant using sugarcane bagasse as the main feedstock was carried out. The SuperPro Designer® v.8.5 process simulator was used, with the main objective of determine the economic profitability of the project. A sensitivity study comprising 15 runs was performed to evaluate the influence of 6 input variables by 3 economic indicators: Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR) and Payback Period (PP) by means of a Response Surface-type statistical design. The obtained results in the sensitivity study were then optimized. A capital investment of about US \$ 29 million would be needed to construct the plant. The project would have US \$ 6 million of net annual profits, an IRR value of 16,48%, a PP of 4,69 years and a NPV of \$ 2.429.000.

Keywords: Citric acid; Sugarcane bagasse; SuperPro Designer®; Sensitivity analysis; Optimization.

### Introducción

El ácido cítrico es un ácido orgánico débil encontrado en los cítricos. En la actualidad constituye uno de los ácidos más usados a escala industrial, fundamentalmente en las industrias alimenticia (70% del total) y farmacéutica (12%) como agente preservante, saborizante y aditivo [1]. Son precisamente estas propiedades las que han ubicado a esta sustancia en una posición predominante en el mercado internacional contemporáneo, aunque la competencia intensa existente entre los diferentes productores, así como también el amplio rango que presenta, han requerido la búsqueda de rutas de producción más eficientes para reducir costos e incrementar la productividad [2]. Aunque el ácido cítrico puede obtenerse a escala industrial mediante la síntesis química, los costos involucrados en esta ruta son mayores comparados con aquellos obtenidos a través de la

fermentación microbiana. En la actualidad, el método de producción principal aplicado a escala industrial para obtener ácido cítrico es la fermentación sumergida utilizando el hongo filamentoso *Aspergillus niger* [2,3].

La simulación de procesos juega un papel importante durante la evaluación y/o el diseño de plantas químicas, así como también para reducir las pérdidas económicas en un proceso dado, ya que puede revelar, a escalas diferentes, si el proceso puede suministrar (o no) resultados rentables en el futuro [4]. El análisis de sensibilidad constituye una herramienta útil usualmente empleada en la actualidad para estimar la influencia de diferentes factores de entrada sobre variables de salida seleccionadas. Puede establecerse entonces que la aplicación de un análisis de sensibilidad para determinar la rentabilidad de una inversión establece un estudio tecno-económico esencial en aras de medir el rendimiento y productividad de un proyecto químico,

permitiendo de esta manera la identificación inicial, y la predicción futura, de problemas eventuales de cualquier tipo que pudieran emerger durante la ejecución del proyecto [4, 5].

Actualmente no existen plantas de producción de ácido cítrico operando en Cuba [6], por lo que este constituye un producto totalmente importado por el gobierno del país. En consecuencia se han llevado a cabo varios estudios, investigaciones y proyectos en los último años, relacionados mayormente con la determinación de la factibilidad económica de plantas de ácido cítrico presentando diferentes capacidades de producción (5.000; 7.500 y 10.000 t/año) y ubicada en la región central del país [7, 8], así como también la estimación de la demanda de ácido cítrico también en la región central del país, considerando tres condiciones económicas (óptima, recesión y probable) [9].

En los últimos años se han considerado varias materias primas para llevar a cabo la producción de ácido cítrico, desde hidrolizado de almidón de maíz [10], pulpas de frutas [11], salvado de avena [12], mazorca de maíz [13] hasta melaza de caña de azúcar [14]. Varios investigadores han utilizado satisfactoriamente el bagazo de caña de azúcar como sustrato principal para la producción de ácido cítrico mediante la ruta fermentativa [15, 16, 17, 18]. En Cuba, el bagazo de caña de azúcar se emplea fundamentalmente como combustible, por lo que este residuo agrícola puede ser empleado como materia prima barata y relativamente abundante para la producción de ácido cítrico.

Los objetivos de este estudio consisten en determinar la rentabilidad económica de una planta de ácido cítrico

consumiendo bagazo de caña de azúcar como materia prima principal, considerando las condiciones económicas actuales de Cuba; efectuar un estudio de sensibilidad conteniendo 6 variables de entrada (precio de venta del ácido cítrico, capacidad de producción, costo del bagazo, costo del combustible, costos fijos, y periodo de construcción) y 3 parámetros de salida [Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)]; evaluar la influencia estadística de las 6 variables de entrada consideradas sobre los parámetros VAN, TIR y PRI, para efectuar la posterior optimización del estudio de sensibilidad realizado. Finalmente, también se estiman las oportunidades de exportación debido a la construcción de una planta de ácido cítrico de 5.000 t/año en Cuba.

### Materiales y Métodos

#### Descripción del proceso de producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña de azúcar

El proceso de producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña de azúcar es descrito en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 1.

En este proceso, el bagazo es mezclado con una corriente de reciclo líquida conteniendo mayormente agua, glucosa y ácido cítrico, la cual proviene de un filtro rotatorio al vacío. Esta mezcla es enviada hacia un intercambiador de calor en donde es esterilizada a 140° C, para ser bombeada entonces hacia el fer-

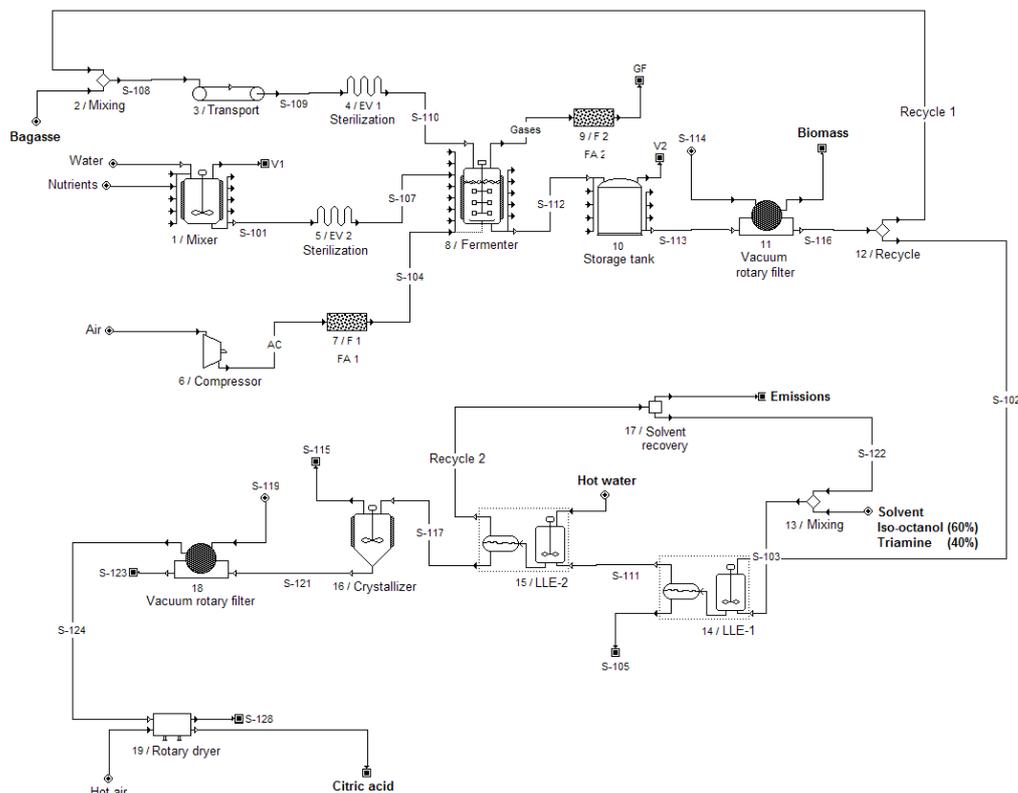


Figura 1: Diagrama de flujo del proceso de producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña de azúcar por la ruta fermentativa.

mentador industrial. En otra sección de la planta, se mezclan urea, sulfato de amonio y agua en un tanque de mezclado por 2 horas aproximadamente, para obtener la solución de nutrientes. Una vez finalizado el periodo de agitación, la solución resultante es bombeada hacia un intercambiador de calor para ser esterilizada antes de ser alimentada al fermentador industrial. El microorganismo empleado para efectuar la transformación aerobia de la glucosa en ácido cítrico es el *Aspergillus niger*. La fermentación industrial es realizada bajo los siguientes parámetros de fermentación: tasa de aireación de 1,25 vvm, velocidad de agitación de 250 rpm, pH de 4,0 y una temperatura de 30° C. Una vez finalizada la fermentación industrial, el caldo de fermentación obtenido es enviado hacia un tanque de almacenamiento de 200 m<sup>3</sup> de capacidad, para ser bombeado entonces hacia un filtro rotatorio al vacío (área de filtrado: 80 m<sup>2</sup>), del cual se obtienen dos corrientes de salida: una líquida (conteniendo mayormente ácido cítrico y glucosa) y otra sólida (conteniendo mayormente biomasa). La corriente líquida obtenida del filtro rotatorio es enviada hacia un Extractor Líquido-Líquido (ELL 1), en donde es lavada usando una mezcla líquida compuesta por un 60% de iso-octanol y 40% de triamina como solvente principal. Del extractor se obtienen dos corrientes de salida, la fase *ligera* (conteniendo mayormente ácido cítrico) y la fase *pesada* o *densa* (conteniendo esencialmente agua y glucosa). La corriente de fase ligera es enviada hacia un segundo Extractor Líquido-Líquido (ELL 2), en donde se emplea agua caliente como solvente, mientras que la fase pesada es enviada hacia la planta de tratamiento de residuales. Se recomienda evaluar la instalación de operaciones adicionales de tratamiento de residuales para recuperar la glucosa contenida en la corriente de fase pesada antes de ser vertida, con el fin de ser comercializada como producto valioso. La fase pesada obtenida en el ELL 2 es enviada hacia el cristizador continuo, mientras que la fase ligera es recirculada hacia el ELL 1. En el cristizador ocurre la formación y posterior acumulación de cristales de ácido cítrico dentro de una fase líquida densa llamada licor madre. Este licor madre es enviado hacia un segundo filtro rotatorio al vacío para separar la fase sólida (cristales de ácido cítrico) de la fase líquida (sirope). Finalmente, los cristales de ácido cítrico separados son deshidratados en un secador rotatorio, obteniendo al final el producto final (ácido cítrico granulado) con un ~ 99% de pureza. El sirope es vendido a trabajadores agrícolas y agricultores como alimento animal enriquecido.

#### Simulación del proceso de producción de ácido cítrico

El proceso de producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña de azúcar fue simulado en el simulador profesional de proceso SuperPro Designer<sup>®</sup>, haciendo uso

de las herramientas de balance de masa y energía, diseño de equipo y cálculos económicos contenidos en este, el cual fue referido como el *Caso Base*. Fue seleccionada esta tecnología de acuerdo con las recomendaciones establecidas por Guerra [20], como esquema de diversificación para la industria azucarera cubana con el fin de obtener productos exportables a partir de residuos lignocelulósicos de la caña de azúcar. La simulación del Caso Base en SuperPro Designer<sup>®</sup> permitió obtener valores de todos los parámetros técnico-económicos que caracterizan este tipo de proceso de producción, esto es, inversión total de capital, VAN, TIR, PRI, retorno de la inversión, costos de operación, capital de trabajo, entre otros.

Para efectuar la simulación del proceso se asumió un periodo de construcción de la planta de 15 meses, con 3 meses para realizar operaciones de arrancada. El VAN fue determinado considerando un 15% de interés [20], se estimó que el proyecto tiene un tiempo de vida promedio de 15 años, y se asumió un 25% de impuestos por concepto de ingresos [20]. Los costos de validación y arrancada se asumieron como un 18% del Costo Total Directo de la Planta (CTDP), mientras que los costos relacionados con el aseguramiento y control de la calidad se suponen alrededor del 25 % de los costos de mano de obra.

Se tomó en cuenta que la planta opera al 60% de su capacidad de producción total durante los primeros 2 años, para operar entonces al 90% por el resto de su tiempo de vida. La planta emplea todos los servicios auxiliares comúnmente consumidos en una planta de este tipo, esto es, agua de enfriamiento, electricidad, vapor de agua y aire comprimido. Se supone que la planta trabaja 11 meses por año, con 1 mes para efectuar operaciones usuales de mantenimiento e ingeniería. El precio de venta final del producto (cristales de ácido cítrico) fue tomado como US \$ 2 500/t [21,22], y se asumió que el costo de tratamiento de aguas residuales (principalmente aguas residuales provenientes de las operaciones de limpieza y desinfección de equipamiento, accesorios y áreas) es de 30% de los costos de operación. Se seleccionó una capacidad de producción anual de la planta de 5 000 toneladas de ácido cítrico para este estudio tomando en cuenta resultados previos publicados en [7] y [8], los cuales establecen que esta debe ser la capacidad mínima que debe presentar una planta de producción de ácido cítrico en Cuba con el fin de ser rentable desde el punto de vista económico.

Se asumió un costo de mano de obra de US\$ 4,50 y US\$ 7,00 por hora para un operario y supervisor, respectivamente, mientras que se especificó un costo de la electricidad de US\$ 1,20/Kw-h.

Finalmente, se proyectó construir la planta de producción de ácido cítrico anexa a una fábrica de azúcar, con el fin de recibir un suministro constante de vapor y agua de enfriamiento, los cuales serán adquiridos de la fábrica de azúcar de acuerdo a los precios mostrados en la Tabla 3.

La Tabla 1 muestra el costo del equipamiento principal

usado en el proceso de producción, mientras que las Tablas 2 y 3 exponen el costo de las principales materias primas y servicios auxiliares consumidos, respectivamente.

**Tabla 1:** Costo del equipamiento principal usado en la planta de producción de ácido cítrico.

Equipamiento	Cantidad	Descripción	Costo (US \$)
Tanque de mezclado	1	60 m <sup>3</sup>	113.000
Intercambiador de calor de tubo y coraza	1	100 m <sup>3</sup> /h	10.000
Intercambiador de calor de placas	1	40 m <sup>3</sup> /h	43.000
Compresor centrífugo	1	35 kW	40.000
Filtro de aire	2	1,2 m <sup>3</sup> /min	1.000
Filtro de los gases de salida	2	1,2 m <sup>3</sup> /min	2.000
Fermentador industrial	3	240 m <sup>3</sup>	900.000
Tanque de recepción	4	150 m <sup>3</sup>	240.000
Filtro rotatorio al vacío # 1	3	80 m <sup>2</sup>	75.000
Filtro rotatorio al vacío # 2	2	70 m <sup>2</sup>	70.000
Transportador de cinta	2	12 m	108.000
Mezclador-Extractor # 1	1	100 m <sup>3</sup> /h	165.000
Mezclador-Extractor # 2	1	100 m <sup>3</sup> /h	180.000
Cristalizador	4	350 m <sup>3</sup>	600.000
Secador rotatorio	1	3 m	25.000
Equipamiento adicional (bombas, equipos de laboratorio, aire acondicionados, motores, etc.)	-		1.385.000
TOTAL			3.957.000

**Tabla 2:** Costo unitario de las materias primas

Materia prima	Costo unitario (US \$/kg)	Cantidad anual (kg/año)	Costo anual (US \$)
Sulfato de amonio	0,080	77.689	6.215
Urea	0,150	530.108	79.516
Bagazo	0,300	12.760.200	3.828.060
Solvente (60% iso-octanol and 40% triamina)	0,200	239.598	47.920
Agua	0,001	85.598.783	85.599
NaOH (1 M)	0,020	24.560	491
TOTAL			4.047.801

**Tabla 3:** Servicios auxiliares suministrados por la fábrica de azúcar y su costo unitario

Servicio auxiliar	Costo unitario (US \$/MT)
Agua fría	0,40
Agua de enfriamiento	0,05
Vapor de agua	3,50

### Estudio de sensibilidad

Se llevó a cabo un estudio de sensibilidad para evaluar la influencia estadística de 6 variables de entrada sobre 3 parámetros de salida. Las 6 variables de entrada que se tuvieron en cuenta fueron las siguientes: 1) Costo de la materia prima (costo del bagazo); 2) Tasa de producción del producto principal (ácido cítrico); 3) Precio de venta del producto final (ácido cítrico); 4) Tiempo de construcción de la planta; 5) Costo anual de combustible; y 6) Costos fijos de la planta, mientras que los 3 parámetros de salida evaluados fueron el Valor Actual Neto (VAN); Tasa

Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación de la Inversión (PRI). Según [19], esas 6 variables afectan directamente a los 3 indicadores de salida para cualquier planta de procesamiento químico. Las 6 variables de entrada se configuraron para variar dentro de un rango de porcentaje de variación a fin de considerar fluctuaciones esperadas de sus valores en el futuro (Tabla 4).

**Tabla 4:** Valores que deberán presentar cada variable de entrada considerando el porcentaje de variación seleccionado para efectuar el estudio de sensibilidad.

Parámetro	Valor del Caso Base	Valor mínimo	Valor máximo
Precio de venta del ácido cítrico (US \$/kg)	2,50	(- 20 %) 2,00	(+ 20 %) 3,00
Producción de ácido cítrico (kg/lote)	108.083	(- 20 %) 86.466,40	(+ 20 %) 129.699,60
Costo del bagazo (US \$/kg)	0,3	(- 10 %) 0,27	(+ 30 %) 0,39
Costo de combustible (US \$/año)	10.000	(- 50 %) 5.000	(+ 100 %) 20.000
Costo fijo (US \$)	26.887.000	(- 20 %) 21.509.600	(+ 100 %) 53.774.000
Periodo de construcción (meses)	15	6	24

Para generar el estudio de sensibilidad, se elaboró un diseño de experimento tipo Surface de Respuesta utilizando el paquete estadístico *Statgraphics Centurion*<sup>®</sup>, obteniendo 54 corridas inicialmente, las que fueron optimizadas aplicando la herramienta “*D-Optimality*” contenida en el software estadístico, con el fin de seleccionar específicamente aquellas corridas que presentan la mayor influencia estadística en los parámetros de salida considerados, así como para reducir la longitud del estudio de sensibilidad, obteniendo 15 corridas finalmente (Tabla 5).

**Tabla 5:** Estudio de sensibilidad optimizado que contiene los valores a considerar para cada parámetro de entrada.

Run	Precio venta ácido cítrico [US \$/kg]	Producción [kg/lote]	Costo bagazo [US \$/kg]	Costo combustible [US \$/año]	Costo fijo [US \$]	Período construcción [meses]
1	2,00	129.699,6	0,27	20.000	53.774.000	6
2	3,00	86.466,4	0,39	20.000	53.774.000	6
3	3,00	129.699,6	0,39	5.000	21.509.600	24
4	3,00	86.466,4	0,27	5.000	53.774.000	24
5	3,00	86.466,4	0,39	20.000	53.774.000	24
6	2,00	129.699,6	0,39	20.000	21.509.600	6
7	3,00	129.699,6	0,39	5.000	21.509.600	6
8	3,00	129.699,6	0,27	5.000	53.774.000	6
9	2,00	129.699,6	0,27	20.000	53.774.000	24
10	3,00	86.466,4	0,27	20.000	21.509.600	6
11	2,00	86.466,4	0,39	5.000	21.509.600	24
12	2,00	129.699,6	0,27	5.000	53.774.000	24
13	3,00	86.466,4	0,27	20.000	21.509.600	24
14	2,00	86.466,4	0,39	5.000	53.774.000	6
15	2,00	86.466,4	0,27	5.000	21.509.600	6

### Evaluación de la influencia estadística de las variables de entrada sobre los indicadores VAN, TIR y PRI

Conforme a los resultados obtenidos en el estudio de sensibilidad, se evaluó la influencia estadística de las 6 variables de entrada en los 3 parámetros de salida considerados (VAN, TIR y PRI). Esto permitió conocer la influencia estadística de cada variable de entrada en la rentabilidad del proceso de producción. También se determinó qué corrida presentó el resultado más positivo y negativo con respecto a los valores obtenidos de VAN, TIR y PRI.

### Optimización de los valores de las variables de entrada

Se efectuó la optimización de los resultados obtenidos durante el estudio de sensibilidad, mediante el empleo de la herramienta “*Multiple Response Optimization*” contenida en el software *Statgraphics Centurion*<sup>®</sup>, para determinar el valor óptimo que debe presentar cada una de las 6 variables de entrada consideradas para maximizar el valor de VAN y TIR.

## Resultados y Discusión

### Principales resultados técnico-económicos obtenidos durante la simulación del Caso Base.

La Tabla 6 muestra los resultados de los principales indicadores tecno-económicos obtenidos durante la simulación del proceso de producción de ácido cítrico (Caso Base) utilizando el simulador *SuperPro Designer*<sup>®</sup>. Los porcentajes de los costos relacionados con la inversión de capital fijo se estimaron sobre la base de la metodología publicada en [25].

**Tabla 6:** Principales indicadores técnico-económicos obtenidos durante la simulación del proceso de producción de ácido cítrico usando el simulador *SuperPro Designer*<sup>®</sup>.

Indicador	Value
Inversión total de capital [US \$]	28.745.000
Costo de operación anual [US \$/año]	6.361.000
Costo unitario de producción [US \$/kg]	1,23
Período de Recuperación de la Inversión (PRI) [años]	4,69
Tasa Interna de Retorno (TIR) [%]	16,48
Valor Actual Neto (VAN) [US \$]	2.429.000
<b>Costo Total Directo de la Planta (CTDP)</b>	
Costo de adquisición del equipamiento [US \$]	3.958.000
Instalación [US \$]	3.163.000
Tuberías [US \$]	1.583.000
Instrumentación [US \$]	1.583.000
Aislamiento [US \$]	119.000
Instalaciones eléctricas [US \$]	554.000
Edificaciones [US \$]	1.544.000

Mejoras del terreno [US \$]	594.000
Servicios auxiliares [US \$]	1.425.000
<b>CTDP [US \$]</b>	<b>14.523.000</b>
<b>Costo Total Indirecto de la Planta (CTIP)</b>	
Ingeniería [US \$]	3.776.000
Construcción [US \$]	5.083.000
Pagos al contratista [US \$]	1.169.000
Contingencias [US \$]	2.338.000
<b>CTIP [US \$]</b>	<b>12.366.000</b>
<b>Capital Fijo Directo (CFD) = CTDP + CTIP [US \$]</b>	<b>26.889.000</b>
<b>Otros</b>	
Capital de trabajo [US \$]	512.000
Costo de arrancada [US \$]	1.344.000
Tasa de producción anual de ácido cítrico [t/year]	5.178
Ingresos anuales gruesos [US \$/año]	6.585.000
Ingresos anuales netos [US \$/año]	6.124.000
Margen grueso [%]	50,85
Tiempo del lote [h]	228
Número de lotes por año [lotes/año]	50

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 6, para una planta de ácido cítrico con una inversión inicial superior a US\$ 28 millones, el PRI tuvo un valor inferior a 5 años, la TIR fue superior al 15% y el VAN fue positivo (US\$ 2.429.000,00), que es un indicador de rentabilidad y viabilidad económica [4,8,19,26].

La Figura 2 muestra el diagrama de Gantt obtenido de *SuperPro Designer*<sup>®</sup> para el proceso de producción de ácido cítrico.

### Evaluación del estudio de sensibilidad considerando las variables de entrada seleccionadas

La Tabla 7 muestra los resultados del estudio de sensibilidad efectuado para las 15 corridas seleccionadas

**Tabla 7:** Resultados obtenidos para cada corrida de acuerdo con el estudio de sensibilidad efectuado

Run	VAN (\$)	TIR (%)	PRI (años)
1	- 18.682.000	7,58	10,61
2	- 23.334.000	5,55	12,54
3	21.567.000	29,61	2,50
4	- 22.065.000	7,11	9,68
5	- 28.422.000	4,30	12,74
6	1.024.000	15,85	5,95
7	32.167.000	47,42	2,50
8	12.446.000	19,92	5,25
9	- 24.374.000	6,02	10,61
10	11.930.000	26,17	4,00
11	- 17.709.000	-	35,69
12	- 24.378.000	6,02	10,61
13	5.628.000	19,14	4,00
14	- 45.249.000	-	80,45
15	- 9.692.000	5,86	11,40

Se puede observar que la corrida # 7 presentó el escenario más optimista tomando en cuenta los valores más altos obtenidos para los parámetros VAN (US\$ 32.167.000) y TIR (47,42%), así como el resultado más bajo para el PRI (2,50 años). Esto se debe a que esa corrida tiene la mayor tasa de producción de ácido cítrico por lote (129.699 kg/lote); el precio de venta más alto de ácido cítrico (US\$ 3,00/kg), así como los valores más bajos de las variables costo fijo de planta (US\$ 21.509.600), gastos de combustible (US\$ 5.000) y tiempo de construcción de la planta (6 meses). La corrida # 14 tuvo, a su vez, el peor escenario económico, presentando resultados de VAN y PRI de US\$ - 45.249.000 y 80,45 años, respectivamente. Esto se debe a que esta corrida presenta la tasa de producción de ácido cítrico más baja por lote (86.466 kg/lote), el precio de venta de ácido cítrico más bajo (US\$ 2,00/kg), el valor de costo fijo más alto (US\$ 53.774.000) y el costo de bagazo más alto (US\$ 0,39/kg), (ver Tabla 5).

**Influencia estadística de las variables de entrada en los valores de VAN, TIR y PRI**

Los gráficos de Pareto estandarizados (Figura 3) muestran los resultados obtenidos con respecto a la influencia estadística de las diferentes variables de entrada consideradas sobre los parámetros VAN, TIR y PRI.

En vista de los resultados mostrados, se puede establecer que la única variable de entrada que tiene influencia estadística en cada uno de los tres indicadores técnico-económicos considerados (para un 95% de confianza) es el *costo fijo de la planta*.

**Resultados del estudio de optimización**

Como se estableció anteriormente, el estudio de sensibilidad fue optimizado para maximizar los valores de los parámetros económicos de VAN y TIR. En vista de eso, para obtener valores óptimos de US\$ 41.408.000 y 51,47% para los parámetros VAN y TIR, respectivamente, las 6 variables de entrada consideradas deben tener los valores

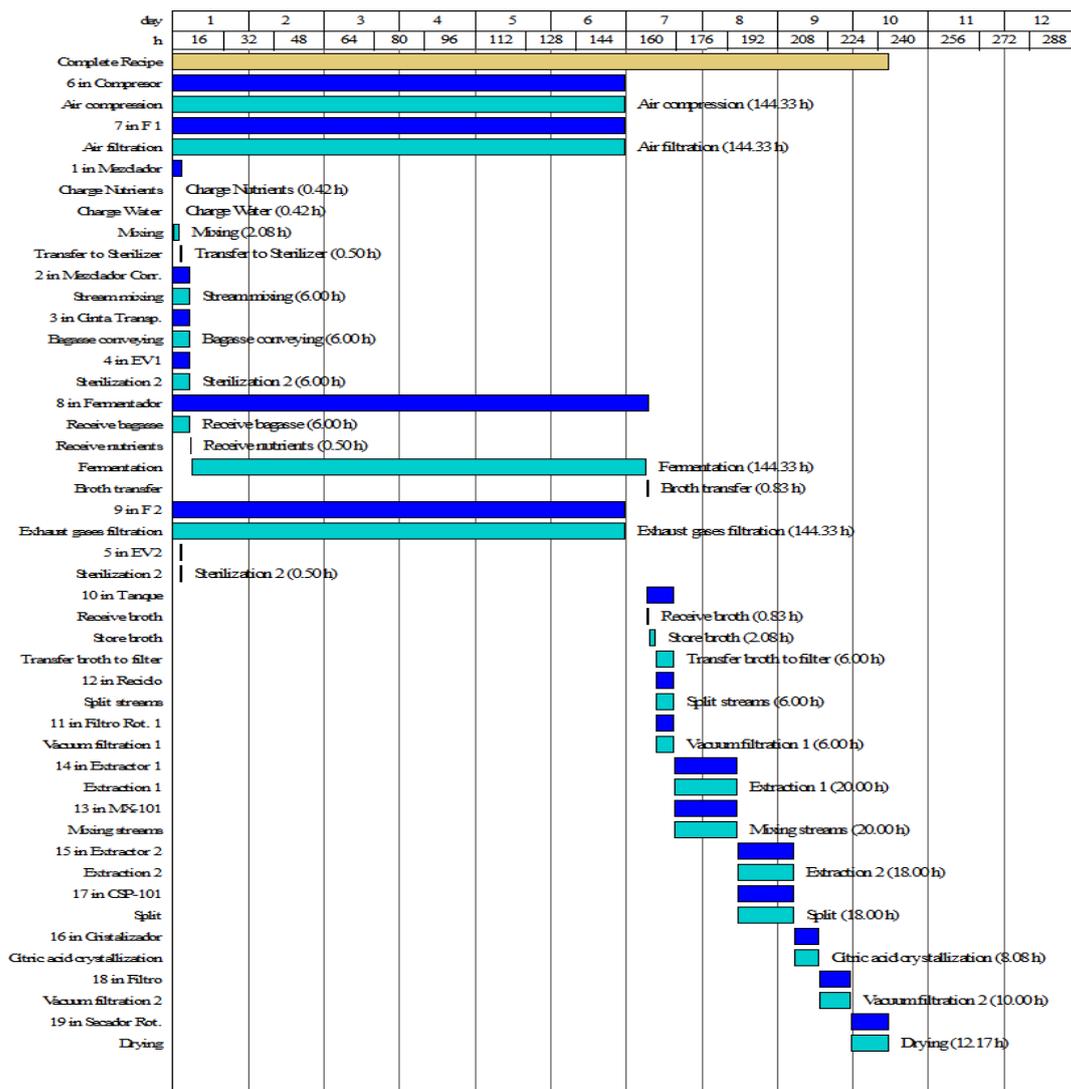
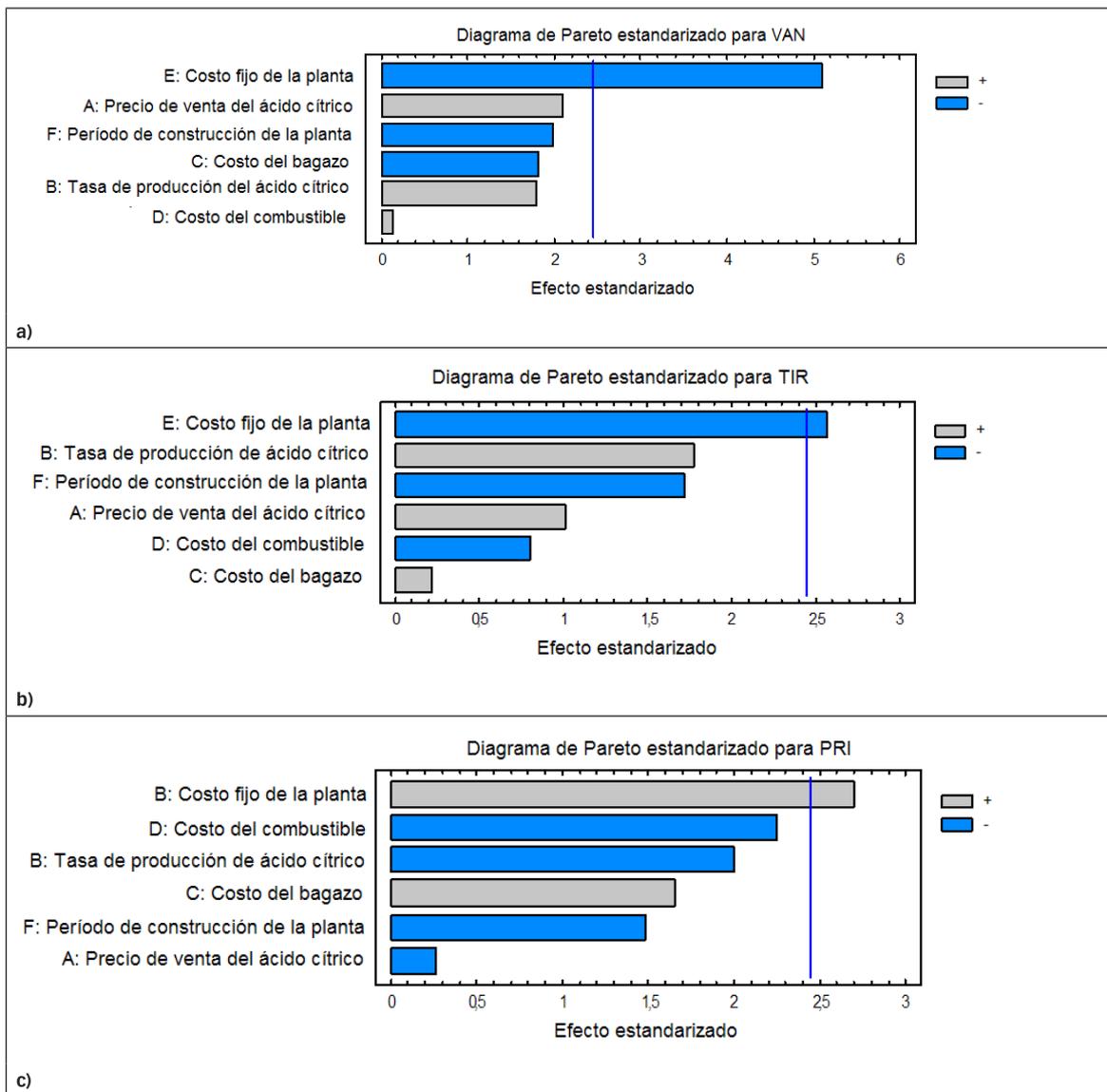


Figura 2: Grafico de operaciones de Gantt obtenido a partir del SuperPro Designer® para el proceso de producción de ácido cítrico



**Figura 3:** Gráficos de Pareto estandarizados obtenidos durante la evaluación de la influencia estadística de las diferentes variables de entrada en los tres parámetros de salida considerados. (a) Valor actual Neto; (b) Tasa Interna de Retorno y (c) Periodo de Recuperación de la Inversión.

óptimos mostrados en la Tabla 8.

**Tabla 8:** Valores óptimos que deben tener las 6 variables de entrada de acuerdo con el estudio de optimización efectuado

Parámetro	Factor óptimo	Valor óptimo
Precio de venta del ácido cítrico [US \$/kg]	1,37906	4,14
Tasa de producción de ácido cítrico [kg/lote]	1,54014	199.756,00
Costo del bagazo [US \$/kg]	-1,23985	0,28
Costo del combustible [\$/año]	-0,89978	9.498,95
Costo fijo de la planta [\$]	-1,92644	1.582.246,18
Período de construcción de la planta [meses]	-1,20670	5

Los resultados mostrados en la Tabla 8 sugieren que el precio de venta del ácido cítrico y la tasa de producción de ácido cítrico deberían aumentar US\$ 1,64 (65,6%) y 91.673 kg/lote (84,8%), respectivamente, mientras que el costo del bagazo, el costo del combustible, el costo fijo de la planta y el período de construcción de la planta deberían

disminuir US\$ 0,02/kg (6,67%), US\$ 501,45/año (5,0%), US\$ 25.304.754 (94,1%) y 10 meses (66,7%), respectivamente, para alcanzar valores óptimos de VAN y TIR de US \$ 41.408.000 y 51,47%, respectivamente.

**Oportunidades para satisfacer la demanda interna de ácido cítrico en Cuba y perspectivas de ingresos económicos debido a las exportaciones de ácido cítrico**

Teniendo en cuenta los resultados publicados en [8], en el año de referencia la demanda anual de ácido cítrico en Cuba fue de 3.700 toneladas, aproximadamente. Teniendo en cuenta este valor, la construcción y operación de una planta de producción de ácido cítrico en Cuba de 5.000 toneladas al año permitirá cubrir las necesidades internas existentes para este producto químico, y también exportar alrededor de 1.300 toneladas a otros países. Debido a que el ácido cítrico se cotiza en el mercado internacional a un

precio de aproximadamente US\$ 2.500/t [21,22], se obtendrán ingresos anuales equivalentes a \$ 3,25 millones debido a la exportación de ácido cítrico. Resumiendo, no sería necesario pagar aproximadamente \$ 9,25 millones para adquirir las 3.700 toneladas de ácido cítrico solicitadas por la demanda interna cubana, generando aproximadamente \$ 3,25 millones debido a la exportación del excedente de ácido cítrico producido.

### Conclusiones

1. En este estudio se verificó la rentabilidad técnico-económica de una planta de producción de ácido cítrico a partir de bagazo de caña de azúcar en Cuba utilizando SuperPro Designer®.

2. Se estimaron la inversión de capital total (US\$ 28.743.000) y el costo de producción anual total (US\$ 6.361.000).

3. El retorno de la inversión (ROI) fue de 21,31%, la tasa interna de retorno (TIR) fue de 16,48% y el período de recuperación de la Inversión (PRI) fue de 4,69 años, mientras que el valor actual neto (VAN) tuvo un valor de US\$ 2.429.000.

4. La variable de entrada que más afectó, desde el punto de vista estadístico, los parámetros VAN, TIR y PRI fue el costo fijo de la planta.

5. La búsqueda de los resultados óptimos para maximizar los parámetros VAN y TIR condujo al resultado teórico de que las 6 variables de entrada consideradas en el estudio de sensibilidad deben presentar los siguientes valores óptimos: precio de venta de ácido cítrico: \$ 4,14/kg; tasa de producción de ácido cítrico por lote: 199.756 kg/lote; costo del bagazo: \$ 0,48/kg; costo de combustible: US\$ 9.498,95; costo fijo de planta: US\$ 1.582.246,18; y período de construcción de la planta: 6 meses, para obtener valores óptimos de \$ 41.408.000 y 51,47%, tanto para el VAN como para la TIR, respectivamente.

6. La instalación en Cuba de una planta de producción de ácido cítrico de 5.000 t/año permitirá satisfacer la demanda interna existente para este producto y también generar ingresos adicionales de aproximadamente \$ 3,25 millones debido a la exportación del exceso de ácido cítrico.

### Referencias

1. Krupavathi, M. y Mangala, D.S. *Production of Citric Acid: A Short Review*, International Journal of Development Research. 5(4): p. 4002–4006. 2015.
2. Kumar, A. y Jain, V.K. *Solid state fermentation studies of citric acid production*, African Journal of Biotechnology. 7(5): p. 644–650. 2008.
3. Darouneh, E.; Alavi, A.; Vosoughi, M.; Arjmand, M.; Seifkordi, A. y Rajabi, R. *Citric acid production: Surface culture versus submerged culture*, African Journal of Microbiology Research. 3 (9): p. 541–545. 2009.
4. Dimian, A.C. y Bildea, C.S. *Chemical Process Design: Computer-Aided Case Studies*, WILEY-VCH Verlag GmbH y Co. KGaA, Weinheim. p. 16-49. 2008.
5. Boyadjiev C. *Theoretical Chemical Engineering-Modeling and Simulation*, Springer-Verlag, New York. p. 28-67. 2010.
6. Blanco, G. y Herryman, M. *Situación Mundial y Tendencias en la Producción y Uso del Ácido Cítrico*, Revista ATAC. (1): p. 48–51. 2005.
7. López L.; de la Cruz R. y Gómez M. *Estudio de Diferentes Capacidades Productivas de Ácido Cítrico en la Región Central de Cuba*, Centro Azúcar. 33(3): p. 43–47. 2006.
8. Lopez, L. y Cruz, R. d. I. *Estudio de la Demanda para el Producto Acido Cítrico en la Región Central de Cuba*, Revista Universidad EAFIT. 45(153): p. 62–69. 2009.
9. de la Cruz R. (2006). *Estudio de la Demanda para el Producto Ácido Cítrico en la Región Central de Cuba*, Centro-Azúcar. 33(1): 87–91.
10. Amenaghawon N.A. y Aisien F.A. *Modelling and simulation of citric acid production from corn starch hydrolysate using Aspergillus niger*, Environment and Natural Resources Research. 2(1): p. 73–85. 2012.
11. Gomashe A.; Sanap H. y Gulhane P. *Production and Optimization of Citric Acid by Aspergillus niger using Fruit Pulp Waste*, International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2(10): 347–352. 2013.
12. Raja P. y Kruthi R. *Production of citric acid by Aspergillus niger using oat bran as substrate*, International Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 3(3): p. 181–190. 2013.
13. Ahmed A. *Production of citric acid from corncobs with its biological evaluation*, Journal of cosmetics, dermatological sciences and applications. 4: p. 141–149. 2014.
14. Ikram-Ul-Haq; Ali S.; Qadeer M.A. y Iqbal J. *Citric acid fermentation by mutant strain of Aspergillus niger GCMC-7 using molasses based medium*, Electronic Journal of Biotechnology. 5(2): p. 125–132. 2002.
15. Abdullah-Al-Mahin, Hasan, S. M., Khan, M. H., y Begum, R. *Citric Acid Production by Aspergillus niger through Solid-State Fermentation on Sugarcane Bagasse*. Bangladesh J Microbiol, 25(1), 9-12. 2008.
16. Abdullah-Al-Mahin, A.M.; Faruk, M.O.; Kader, M.A.; Alam, J.; Begum, R. y Harun-Or-Rashid. *Improved citric acid production by radiation mutant Aspergillus niger using sugarcane bagasse extract*, Biotechnology. 11(1): p. 44–49. 2012.
17. Yadegary, M.; Hamidi, A.; Abolhasan, S.; Khodaverdi, E.; Yahaghi, H.; Sattari, S. y Yahaghi, E. *Citric Acid Production from Sugarcane Bagasse Through Solid State Fermentation Method using Aspergillus niger Mold and Optimization of Citric Acid Production by Taguchi Method*, Jundishapur J Microbiol, 6(9): p. 36–48. 2013.
18. Sharan, A., Charan, A. A., Bind, A., y Tiwari, S. B. *Citric acid production from pre-treated sugarcane bagasse by As-*

- pergillus niger* under solid state fermentation. Asian J. Bio Sci, 10(2), 162-166. 2015.
19. Towler G. y Sinnott R. *Chemical Engineering Design - Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, Butterworth-Heinemann, London. p. 156-240. 2008.
  20. Guerra L. E. *Propuesta tecnológica para la producción de ácido cítrico a partir de un residuo de la agroindustria azucarera cubana*. (Tesis de Maestría), Universidad de Camagüey, Camagüey. 2015.
  21. COMTRADE. (2016) *Commodities: Citric Acid [Online]*. Available at <http://www.comtrade.un.org/pb/CommodityPagesNew.aspx?y=2013> (verified 25 Oct. 2016).
  22. ICIS. (2016) *Citric acid cost, trends, and markets [Online]*. Available at <http://www.icis.com/home/default.aspx> (verified 25 Oct. 2016).
  23. Wang L. K.; Hung Y. T. y Shamma N. K. *Handbook of advanced industrial and hazardous wastes treatment*, CRC Press, Boca Raton. p. 48-89. 2010.
  24. Sharma J. R. *Development of a Preliminary Cost Estimation Method for Water Treatment Plants*. (Master of Science Thesis), The University of Texas at Arlington, Texas. 2010.
  25. Peters, M. S.; y Timmerhaus, K. D. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, (5ta. ed.). McGraw Hill Inc., New York. p. 112-154. 1991.
  26. Baca G. *Evaluación de proyectos*, McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A de C.V, México D.F., p. 47-96. 2010.

Recibido: 12/07/2018.

Aprobado: 25/02/2019.