

## Análisis tecno-económico de una biorrefinería negativa en carbono formulado como un problema de optimización multiobjetivo

Stephanie Martinez-Victoria, Arturo Sanchez \*

Laboratorio de Futuros en Bioenergía, Centro de Investigación y Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Guadalajara, Jalisco, México

\* Autor de correspondencia: arturo.sanchez@cinvestav.mx

**Energías renovables** (Biocombustibles).

**Resumen:** Con la finalidad de promover la diversificación de la caña de azúcar en la producción de biocombustibles y bio-productos este trabajo estudia el desempeño económico del diseño de una biorrefinería que coproduce azúcar, melaza y alcohol. Los gases de fermentación se consideran también como coproducto. También se capturan los gases de combustión de caldera con la finalidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Dicha biorrefinería, se identifica como “biorrefinería negativa en carbono” (BNC). El análisis de rentabilidad se formula como un problema de optimización multiobjetivo en el que se maximiza la eficiencia de uso de azúcares totales recuperables ( $E_{ATR}$ ) y ganancia neta (NP) en función de la coproducción de bioetanol, azúcar, melaza, aceite fusel y dióxido de carbono. Las variables de decisión en el problema de optimización multiobjetivo son definidas como fracciones de flujo másico, que modifican la producción de un producto u otro para maximizar los funcionales arriba definidos. El desempeño económico de BNC se compara con el diseño de una biorrefinería multi-producto que usa la caña de azúcar como materia prima sin la revalorización del dióxido de carbono (BB). Los resultados muestran a BB con el mejor desempeño en la producción de azúcar y BNC para la producción de bioetanol. A pesar de que BNC y BB tienen su origen en la reconversión de ingenios azucareros con el objetivo de producir biocombustibles convencionales y avanzados, BNC considera al dióxido de carbono como un producto y no una emisión a la atmósfera mejorando la rentabilidad del proceso. Por ello, BNC es una alternativa de producción de biocombustibles para el sector transporte que puede contribuir a combatir el cambio climático.

**Palabras clave:** optimización multiobjetivo; análisis tecno-económico; biorrefinería; bioetanol; caña de azúcar

## Techno-economic analysis of a carbon-negative biorefinery formulated as a multi-objective optimization problem

**Abstract:** To promote the diversification of sugarcane in the production of biofuels and bio-products, this work studies the economic performance of the design of a biorefinery that co-produces sugar, molasses and alcohol. The fermentation gases are also considered a by-product. Boiler combustion gases are also captured to reduce greenhouse gas emissions. This biorefinery is identified as a “carbon-negative biorefinery” (BNC). The profitability analysis is formulated as a multi-objective optimization problem in which the efficiency of use of total recoverable sugars and net profit are maximized as a function of the co-production of bioethanol, sugar, molasses, fusel oil and carbon dioxide. The decision variables in the multiobjective optimization problem are defined as mass flow fractions, which adapt the biorefinery model to produce one product or another. The economic performance of BNC is compared to the design of a multi-product biorefinery that uses sugarcane as a raw material without the revaluation of carbon dioxide (BB). The results show BB with the best performance in the production of sugar and BNC for the production of bioethanol. Although BNC and BB originate from the reconversion of sugar mills to produce conventional and advanced biofuels, BNC considers carbon dioxide as a product and not an emission into the atmosphere getting better the profitability of the process. Therefore, BNC encourages and promotes good practices for the development of liquid biofuels in the transportation sector.

**Keywords:** multi-objective optimization; techno-economic analysis; biorefinery; bioethanol; sugarcane

### Introducción

Ante la creciente demanda de energía del sector transporte se estima que la demanda de la gasolina para el 2050 sea el doble que en 2014, con un consumo principal destinado a vehículos de transporte privado y de carga ligera (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, 2021). Por esta razón, han surgido propuestas para la producción de bioetanol a partir de la reconversión de industrias azucareras (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar [CONADESUCA], 2012) y su uso como componente en gasolinas (Secretaría de Energía [SENER], 2014). México cuenta con 51 ingenios azucareros distribuidos entre siete regiones, de los cuáles 40 ingenios pueden ser candidatos para el desarrollo del bioetanol (CONADESUCA, 2012).

Los biocombustibles se pueden clasificar de acuerdo con la materia prima utilizada. Por ejemplo, los biocombustibles convencionales (antes conocidos como de 1ª generación) son los que utilizan azúcar y almidones que involucran métodos convencionales. Los biocombustibles avanzados son aquellos que se producen a partir de materiales que no participan en la cadena alimenticia del ser humano y utilizan procesos más complejos. Los biocombustibles lignocelulósicos, como parte de los biocombustibles avanzados son elaborados con biomasa lignocelulósica usualmente en biorrefinerías de plataforma bioquímica. Una biorrefinería típica de plataforma bioquímica está compuesta por 5 etapas principales: pretratamiento, sacarificación-fermentación, separación, tratamiento de aguas residuales y cogeneración (Sanchez, et al., 2014).

Los insumos y tecnologías de producción a gran escala en el ámbito nacional se limitan a la producción de bioetanol convencional (CONADESUCA, 2012). Ante esta situación, el desarrollo de biocombustibles en México se ha considerado como un factor clave para el desarrollo económico y la promoción de la participación de energías renovables en el país (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2014; SENER, 2017). Sin embargo, si no se considera una práctica adecuada del proceso de producción, las emisiones de gases de efecto invernadero tales como el dióxido de carbono derivadas de la etapa de fermentación y cogeneración pueden ser significativas.

La comercialización del dióxido de carbono producido en procesos fermentativos es una práctica bien establecida en el sector alimenticio (Amanatidou, et al., 2008; Esposito, et al., 2019; Yu, et al., 2020): Por esta razón, existen propuestas para incluir etapas de captura en los procesos de la biorrefinería (Pires, et al., 2012; Wetenhall, et al., 2014; Seth & Wangikar, 2015). Además, varios trabajos proponen optimizar procesos de biorrefinerías típicas, a partir de variables de proceso en determinadas etapas para mejorar su producción o minimizar costos de inversión, por ejemplo, optimizar el tamaño de algún equipo u optimizar las condiciones de operación (Sadhukhan, et al., 2014; Woinaroschy, 2014; Hernandez-Perez, et al., 2020; Martinez-Victoria, et al., 2021), por otro lado, algunos trabajos abordan un problema de optimización para biorrefinerías desde una visión del ciclo de vida del producto o la optimización de la cadena de suministro (Martínez-Guido, et al., 2016; Ulonska, et al., 2018) con la finalidad de analizar la viabilidad de las biorrefinerías.

El presente trabajo, consiste en el análisis tecno-económico de una biorrefinería que coproduce azúcar, melaza, aceite fusel y bioetanol (convencional y avanzado). Los gases de fermentación se consideran también como coproducto y con la finalidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, también se capturan los gases de combustión de caldera. Dicha biorrefinería, se identifica como “biorrefinería negativa en carbono” (BNC). El análisis tecno-económico de BNC es utilizado para el cálculo de los costos totales de producción de cada uno de los productos de la biorrefinería. Este análisis se realiza con la herramienta de análisis de flujo de efectivo descontado, calculando el Valor Presente Neto (VPN) que relaciona el flujo de efectivo anual y la inversión inicial a modo de obtener el costo de producción relacionado con cada producto por medio de una asignación económica.

La evaluación económica de BNC se plantea como un problema de optimización multiobjetivo considerando como variables de decisión las fracciones de flujo másico del modelo de la biorrefinería. Los resultados son comparados con el modelo de biorrefinería de Lopez-Ortega *et al.*, (2021), con el fin de identificar los beneficios económicos en la revalorización del dióxido de carbono además de incentivar la producción y uso de los biocombustibles líquidos en México.

## Materiales y Métodos

Para llevar a cabo la evaluación económica de BNC como un problema de optimización multiobjetivo, la Figura 1 muestra un resumen gráfico del trabajo formado por dos secciones principales: diseño conceptual de la biorrefinería y análisis de rentabilidad económica planteado como un problema de optimización multiobjetivo.

La primera sección definida como “diseño conceptual de la biorrefinería negativa en carbono”, que consiste en el modelo de BNC. BNC es una superestructura de biorrefinerías, de la que es posible obtener bioetanol (convencional y avanzado), electricidad y productos derivados del azúcar a través de cinco variables de diseño definidas por fracciones de flujo másico. Por consiguiente, la segunda sección definida como “análisis de rentabilidad económica” se mide utilizando dos indicadores: eficiencia de azúcares totales recuperables y ganancia neta. Estos indicadores son definidos como funciones objetivo en un problema de optimización multiobjetivo (MOOP, por sus siglas en inglés). MOOP es restringido por: i) las variables de proceso, conocidas en la literatura como variables de decisión (Deb, 2001), ii) el costo

total de producción (TPC, por sus siglas en inglés) para cada uno de los productos, y iii) balances de materia y energía del modelo de BNC. A continuación, se explican a detalle las siguientes dos secciones principales.

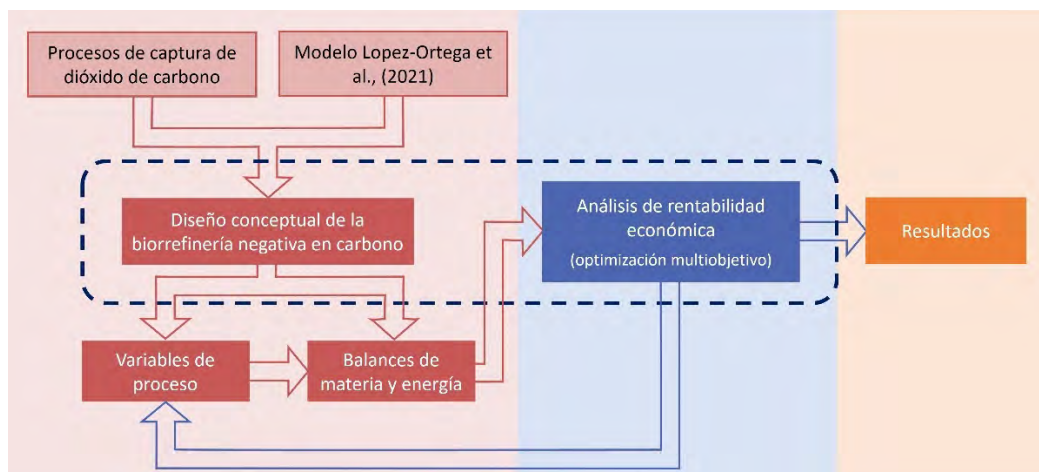


Figura 1. Resumen gráfico de la metodología.

### *Diseño conceptual de la biorrefinería negativa en carbono*

El modelo de la superestructura de biorrefinerías, BNC, está basado en el diseño de una biorrefinería propuesta por Lopez-Ortega *et al.*, (2021). Este diseño base (BB) se propuso como una alternativa para la reconversión de ingenios azucareros a biorrefinerías. El proceso multiproducto (azúcar, melaza, electricidad, aceite fusel, y bioetanol convencional y avanzado) es definido con una capacidad de 459.3 toneladas de caña (TC) por hora. En el caso de BNC cuyo objetivo es capturar el CO<sub>2</sub>, el modelo incluye dos etapas de captura: una que recibe los gases de combustión (captura B) y otra unida a la etapa de fermentación (captura A). Los parámetros de proceso y diseño pueden ser consultados en Lopez-Ortega *et al.*, (2021). La Figura 2 muestra el diagrama de bloques general de esta biorrefinería modificada. Las etapas del proceso se describen brevemente a continuación.

**Extracción.** Una vez que la caña se cosechó y se recibe en la biorrefinería, esta se acondiciona para separar el jugo del bagazo. El jugo es enviado a la etapa de clarificación mientras que el bagazo puede ser destinado a pretratamiento para la obtención de bioetanol avanzado (1-x1) o cogeneración para la producción de electricidad (x1).

**Clarificación.** El jugo es purificado de tal forma que se obtienen dos corrientes: jugo claro y lodos sedimentados conocidos como cachaza. El jugo claro es filtrado para enviarse a la etapa de concentración. En cambio, la cachaza es utilizada por algunos ingenios para combinarse con las cenizas que se derivan de la cogeneración y comercializarse como bio-fertilizante.

**Concentración.** Consiste en elevar la concentración del jugo para producir meladura o jugo concentrado, empleando el vapor de proceso (producido en cogeneración). La concentración de la meladura depende del producto final a obtener (azúcar y/o bioetanol)

**Cristalización.** Es la etapa final para la producción de azúcar y melaza. La meladura proveniente de la etapa de concentración favorece el crecimiento de cristales, al finalizar el proceso de cristalización se tienen dos corrientes: miel y azúcar. La corriente de miel puede ser retornada al proceso para la producción de melaza (1-x3) o enviarse a la etapa de fermentación para la producción de bioetanol convencional (x3). En caso de que no se desee destinar una fracción del flujo de melaza (1-x4), este es enviado a fermentación para la producción de bioetanol convencional (x4).

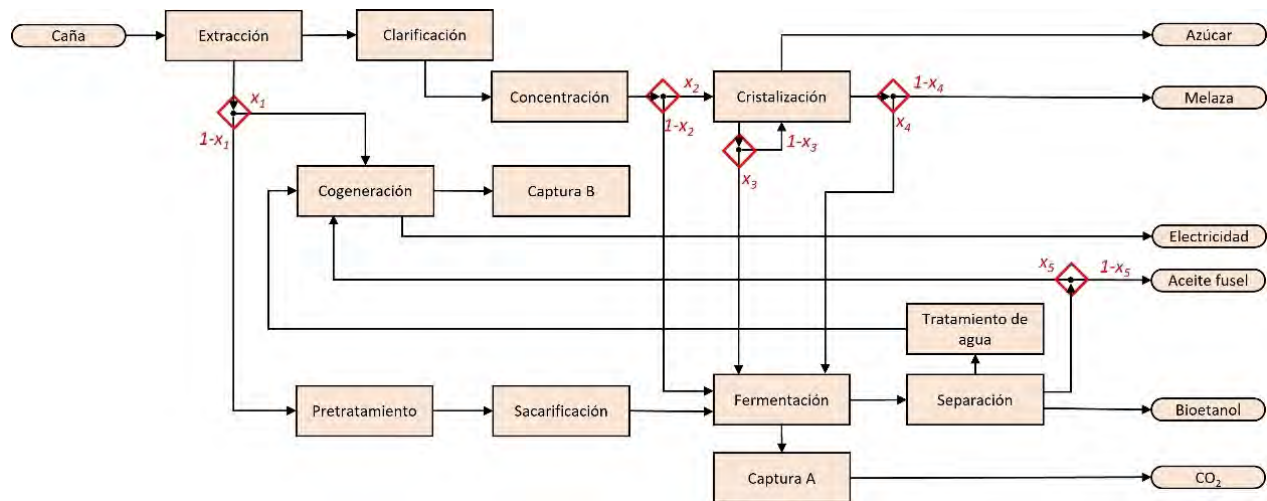


Figura 2. Diagrama de bloques simplificado de la superestructura de la biorrefinería multi-producto.

**Pretratamiento.** La corriente de bagazo (de la etapa de extracción) es pretratada con un tratamiento físico-químico, cuyo fin en general es debilitar la estructura de la hemicelulosa para un mayor acceso a la celulosa y hemicelulosa en la etapa de sacarificación.

**Sacarificación.** Despolimeriza la celulosa y los polisacáridos de hemicelulosa restantes del pretratamiento a sus monómeros de glucosa y xilosa. En este paso, los azúcares liberados están listos para ser fermentados y producir bioetanol avanzado.

**Fermentación.** Esta etapa con ayuda de levaduras, los monómeros de azúcar son convertidos en bioetanol convencional o avanzado dependiendo de la corriente aguas arriba. Una vez concluida la conversión de los azúcares, la corriente debe ser purificada. En la fermentación de los azúcares se obtienen dos corrientes: una mezcla líquida de bioetanol con caldos de fermentación y una corriente gaseosa formada por dióxido de carbono y remanentes. La corriente líquida es enviada a la etapa separación mientras que la gaseosa se envía a la etapa de captura A.

**Separación.** Por medio de destiladores y purificadores, se obtienen tres corrientes: bioetanol (convencional y avanzado), el caldo de fermentación el cual es enviado a la etapa de tratamiento de aguas residuales, y aceite fusel ( $x_5$ ). En caso de que no se desee destinar una fracción del flujo de aceite fusel ( $1-x_5$ ), este es enviado a la etapa de cogeneración para la producción de electricidad.

**Captura A.** Al recibir la corriente gaseosa de la etapa de fermentación, se captura el dióxido de carbono por medio de un procedimiento de absorción. La corriente de dióxido de carbono es enviado a un tren de compresores para obtener las especificaciones de grado alimenticio. (Martinez-Victoria, et al., 2021).

**Cogeneración.** Los fondos de destilación de la etapa de separación (azúcares sin reaccionar, lignina y otros sólidos) junto al bagazo de la etapa de extracción y biogás provenientes del tratamiento de aguas residuales son enviados a la etapa de cogeneración con el fin de producir vapor HP-LP y electricidad, que son destinados a la energía eléctrica y mecánica de la planta. Debido al uso de generadores de vapor se tienen gases de combustión que se envían a la etapa de Captura B.

**Captura B.** Esta etapa recibe los gases de combustión de calderas que son enviados a un precipitador electroestático con una eficiencia de recolección de 90% (Ghafghazi, et al., 2011; Singh & Shukla, 2014).

**Tratamiento de aguas residuales.** Esta etapa trata el agua de proceso, con una recuperación del 80%. También se produce biogás que se envía a la etapa de cogeneración.

### Análisis de rentabilidad económica

El análisis de rentabilidad económica en este trabajo se calcula con base en dos indicadores: ganancia neta (NP) y eficiencia de azúcares totales recuperables ( $E_{ART}$ ). El análisis está basado en la metodología propuesta por Sanchez, *et al.*, (2014) y Lopez-Ortega, *et al.*, (2021).

El indicador NP, representa la utilidad después de impuestos generada por la operación de la planta, provenientes de la venta de los productos finales, por lo tanto, se realiza un análisis tecno-económico a partir de un análisis de flujo de efectivo descontado tradicional (DCF, por sus siglas en inglés). DCF calcula el valor presente neto (VPN). VPN depende de la inversión capital, la tasa interna de retorno y del costo capital anualizado. Por lo tanto, la superestructura de biorrefinerías utiliza una asignación económica para el cálculo de los costos totales de producción (TPCs) para cada producto final.

$$TPC = R * PC \quad (1)$$

TPC de un producto, definido por la Ecuación 1, es calculado a partir del rendimiento del producto (R) por materia procesada y el costo de producción (PC) por cada unidad de producto. Por lo tanto, la asignación económica para PC se define como los ingresos de un producto entre el ingreso total del proceso, de tal forma que, los costos de la superestructura se reparten entre cada proceso con base al porcentaje de asignación del producto (Bonomi, *et al.*, 2016), como se describe en las normas ISO 14040-1044 (Organización Internacional de Normalización, 2006a, 2006b). Los principales parámetros adoptados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros económicos adaptados para el análisis tecno-económico correspondientes a las condiciones económicas mexicanas de diciembre del 2017 (Lopez-Ortega, *et al.*, 2021).

Parámetro	Unidad	Valor
Tiempo de vida del proyecto	años	25
Impuesto sobre la renta	%	30
Tasa de retorno mínima	%	10
Tasa de depreciación lineal	%	10

Dado que se tiene un proceso multiproducto, la unidad a emplear es USD por tonelada de caña (TC), de forma que se evalúen los ingresos en función de la materia prima procesada. Por consiguiente, NP es definido por la Ecuación 2, en la que NP se calcula como la suma de los ingresos netos (con base en TPC del producto  $i$  y VPN de la biorrefinería) de cada producto  $i$  por TC ( $M_{NP_i}$ )

$$NP = \sum (M_{NP_i}) \quad (2)$$

Los precios de venta adoptados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Precios de venta (Lopez Ortega, 2021).

Producto	Unidad	Valor
Caña de azúcar	USD/TC	34.49
Bioetanol	USD/L	0.52
Azúcar	USD/T	555.12
Melaza	USD/T	100
Aceite fusel	USD/Kg	1
Electricidad	USD/MWb	67.8
Dióxido de carbono*	USD/kg	0.3

\*(U.S. Bureau of Labor Statistics, 2021)

El indicador  $E_{ART}$ , representa la eficiencia en el uso de azúcares de la caña de azúcar para su transformación en diferentes productos en la superestructura. De tal forma, que al haber cambios en el rendimiento de un producto puede verse afectado en el desempeño económico del proceso, visto como una penalización por no usar los azúcares

disponibles. Por lo tanto,  $E_{ART}$  es definido por la Ecuación 3. Donde,  $M_{ART}$  es la suma de los azúcares utilizados en la fabricación de azúcar, melaza y bioetanol convencional y avanzado por TC.  $ATR_B$  es el contenido de ATR en la biomasa y  $C$  es el costo por kg de ATR con valor de 0.33 USD/kg ATR (Secretaría de Economía, 2017; CONADESUCA, 2018) para traducir  $E_{ART}$  a USD/TC.

$$E_{ART} = (M_{ART} - ATR_B)C \quad (3)$$

La traducción del indicador  $E_{ART}$  es fundamental para comparar con los resultados del indicador NP de la superestructura que opera bajo las condiciones establecidas.

Tabla 3. Parámetros adaptados para NSGA-II (López Ortega, 2021)

Parámetro	Valor
Tamaño de población	30
Fracción de individuos a conservar en el primer frente de Pareto	0.7
Número máximo de iteraciones antes de que se detenga el algoritmo.	30
Fracción de la población en la próxima generación, sin incluir individuos de élite.	0.8

Con el interés de alcanzar la máxima NP y que la superestructura tenga un buen  $E_{ART}$ , se propone plantear el análisis como un problema de optimización multiobjetivo (MOOP, por sus siglas en inglés). Por lo tanto, MOOP es definido por la Ecuación 4. MOOP tiene el fin de encontrar soluciones factibles que satisfagan a dos o más objetivos, por medio de variables de decisión. MOOP se resolvió con un algoritmo genético no dominado elitista, conocido como NSGA-II (Deb, 2001). Los principales parámetros adoptados para el arranque de NSGA-II se muestran en la Tabla 3.

$$\begin{aligned} \max_x F(\mathbf{x}) &= \max_x [E_{ATR}(\mathbf{x}), NP(\mathbf{x})]^T \\ \mathbf{x} &= [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5] \\ \text{sujeto a } &\begin{cases} \text{Balances materia y energía} \\ \text{TPC de cada producto obtenido del DCF} \\ 0 \leq x_i \leq 1 \quad \therefore i = 5 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

Por lo tanto, MOOP es definido por la Ecuación 4. Donde, el valor de la función objetivo,  $F(\mathbf{x})$ , depende de los valores que puede tomar  $\mathbf{x}$ .  $\mathbf{x}$  es un vector formado por cinco variables de decisión.

Las variables de **decisión** corresponden a las fracciones de flujos másicos correspondientes a las salidas de cada etapa de producción del diseño de la biorrefinería que se muestran en la Figura 2. Estas variables pueden favorecer la producción de un producto u otro. En este sentido, los límites de  $\mathbf{x}$  están relacionados a una fracción másica de 0 a 1, como se muestra en la Ecuación 4.

Una solución  $\mathbf{x}$  que satisface todas las restricciones dentro de los límites se conoce como una solución factible. Si  $\mathbf{x}$  es una solución factible tanto para las restricciones como la función objetivo, será definida como solución óptima sólo si forma parte del frente óptimo de Pareto. El frente de Pareto es la curva formada al unir estas soluciones en el espacio de solución de las funciones objetivo (Deb, 2001).

## Resultados y Discusión

La Figura 3, muestra el frente de Pareto obtenido para BB y BNC. El frente de Pareto para BB está formado por 15 soluciones factibles con un rango  $E_{ART}$  de -4.23 a -2.09 USD/TC, y NP de -20.63 a 6.62 USD/TC. El frente de Pareto para BNC está formado por 17 soluciones factibles con un rango  $E_{ART}$  de -4.44 a -2.23 USD/TC, y NP de -5.43 a 5.3 USD/TC. Para conocer bajo qué circunstancias se considera como una solución óptima algunos de los puntos del frente de Pareto y los beneficios de BNC contra BB. Primero se discuten los puntos límites de dicho frente. Estos puntos están

relacionados por ambos indicadores: el punto con el valor más bajo en NP (PB), se puede interpretar como el valor de dinero que debe cubrir la superestructura a pesar de que tiene el mejor aprovechamiento de azúcares por el indicador  $E_{ART}$ , y el punto con el valor más alto en NP (PA) representa el mejor beneficio económico que tiene la superestructura a pesar de tener el peor aprovechamiento de azúcares por el indicador  $E_{ART}$ . Por último, también se discute el punto de mejor TPC de bioetanol para el caso de BB (PE).

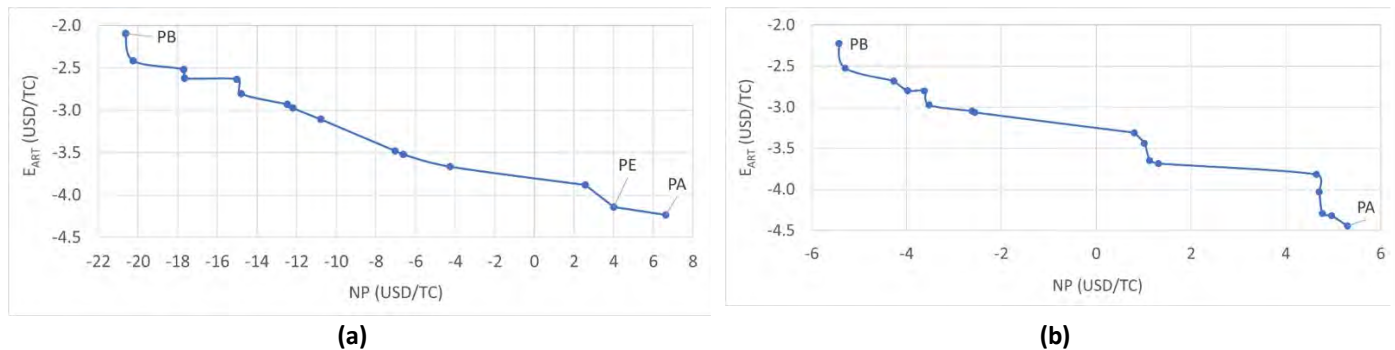


Figura 3. Frentes de Pareto: (a) de la biorrefinería base BB y (b) una biorrefinería negativa en carbono BNC.

La Tabla 4 muestra los datos que corresponden la fracción masa de los puntos del frente de Pareto (PB, PM, PA, y PM) y el valor de la función objetivo. La Tabla 5 muestra la relación de los parámetros óptimos con el TPC de cada producto final.

El punto PB para el caso de BB, consigue un  $E_{ART} = -2.09$  USD/TC que representa la mayor eficiencia de ATR con un  $NP = -20.63$  USD/TC, representando pérdidas por favorecer la producción de electricidad ( $x_1=1$  y  $x_5=1$ ), la producción de bioetanol convencional ( $x_2=0.05$ ). Los TPCs de los productos son: TPC bioetanol = 0.78 USD/L, TPC azúcar = 0.83 USD/Kg, TPC melaza = 149.37 USD/T, y TPC aceite fusel = 1.49 USD/Kg.

En cambio, PB para el caso de BNC, consigue un  $E_{ART} = -2.23$  USD/TC similar a BB, pero con una menor pérdida ( $NP = -5.43$  USD/TC). Esto es a causa de un TPC de etanol = 0.57 USD/L, TPC azúcar = 0.61 USD/Kg, TPC melaza = 109.04 USD/T, TPC aceite fusel = 1.09 USD/Kg, y TPC  $CO_2 = 0.33$  USD/Kg. Los TPC para cada uno de los productos representó un 27% (promedio de la diferencia) menor que los TPC de cada producto para el caso de BB. A pesar de que el punto PB en BB tiene una mejor eficiencia de ATR, la biorrefinería no es rentable por los costos de la producción de bioetanol y electricidad, a diferencia de BNC.

El punto PA representa las máximas ganancias para ambas biorrefinerías. BB consigue un  $E_{ART} = -4.23$  USD/TC que representa la menor eficiencia de ATR para este diseño, pero con ganancias de  $NP = 6.62$  USD/TC. Estos parámetros representan la producción de electricidad ( $x_1=1$ ,  $x_5=0.98$ ), azúcar ( $x_2=1$ ) y melaza ( $x_3=0$ ,  $x_4=0$ ). El TPC del azúcar es 0.49 USD/Kg. Esto es 10% menor que el precio de venta. En cambio PA para el caso de BNC, consigue un  $E_{ART} = -4.44$  USD/TC con  $NP = 5.3$  USD/TC, 1.32 USD menos que su contraparte BB. La diferencia radica en la producción de bioetanol convencional ( $x_4 = 0.93$ ) y aceite fusel ( $x_5 = 0.87$ ). El TPC para el bioetanol es 0.48 USD/L que es 7.7% menor que el precio de venta. El TPC del azúcar es 0.51 USD/Kg, 7.3% menos que el precio de venta. Los TPCs de melaza, aceite fusel y  $CO_2$  son 92.19 USD/T, 0.92 USD/Kg, y 0.28 USD/Kg, respectivamente. Este último es 6.6% menor que el precio de venta. BB exhibe una mayor ganancia que BNC, funcionando como ingenio azucarero bajo las condiciones de operación de PA, sin producir bioetanol ni aceite fusel. Sin embargo, BB y BNC tienen una producción igual de azúcar (45.43 T/hr).

Considerando una perspectiva económica en la se quiere impulsar el uso del bioetanol (logrando un TPC igual o menor al precio de venta) con ganancia netas en la biorrefinería, el punto PE de BB consigue un  $E_{ART} = -4.14$  USD/TC con ganancias de  $NP = 3.99$  USD/TC. A pesar de que el valor es de NP es menor que en el punto PA, PE considera que el 75% de las melazas ( $x_4$ ) sean destinadas a la producción de bioetanol convencional a diferencia que el punto PA.

Los TPCs del bioetanol, azúcar, melaza y fusel son 0.48 USD/L (7.6% menor que el precio de venta), 0.52 USD/Kg (5.4% menor que el precio de venta), 93.26 USD/T y 0.93 USD/Kg. Dichos TPCs son similares a BNC en el punto PA.

Tabla 4. Fracción masa de las variables de decisión y su valor en las funciones objetivo para los puntos del frente de Pareto

	Punto Pareto	Función Objetivo (USD/TC)		Fracción masa de variables de decisión				
		NP	E <sub>ART</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
BB	PB	-20.63	-2.09	1	0.05	0.58	0.13	1
	PE	3.99	-4.14	1	1	0	0.75	1
	PA	6.62	-4.23	1	1	0	0	0.98
BNC	PB	-5.43	-2.23	0.97	0.12	0	0	1
	PA	5.30	-4.44	0.97	1	0	0.93	0.87

Tabla 5. TPC de los productos de la biorrefinería para los puntos de Pareto.

	Punto Pareto	Bioetanol	Azúcar	Melaza	Fusel	CO <sub>2</sub>
		USD/L	USD/kg	USD/T	USD/kg	USD/kg
BB	PB	0.78	0.83	149.37	1.49	-
	PE	0.48	0.52	93.26	0.93	-
	PA	-	0.49	88.73	-	-
BNC	PB	0.57	0.61	109.04	1.09	0.33
	PA	0.48	0.51	92.19	0.92	0.28

## Conclusiones

BB tiene mayor beneficio económico para la producción de azúcar y melaza, que BNC. Sin embargo, considerando escenarios de producción de bioetanol convencional y avanzado, BNC es más rentable que BB. Mas aún, al capturar el CO<sub>2</sub> y considerarlo como subproducto, resulta muy importante estudiar el impacto de la operación de BNC y BB en los dominios ambiental y social.

## Bibliografía

- Amanatidou, A., Slumo, R. A., Gorris, L.G. M., & Smid, E. J. (2000). High Oxygen and High Carbon Dioxide Modified Atmospheres for Shelf-life Extension of Minimally Processed Carrots. *Journal of Food Science*, 65, 61-66.
- Bonomi, A., Cavalett, O., Cunha, M., & Lima, M. A. (2016). Virtual biorefinery. *Springer International Publishing*.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2012). Propuesta Para la Inclusión de la Producción de Etanol Anhidro Como Alternativa al Campo Cañero Mexicano en el Programa Nacional de la Agroindustria Azucarera. México.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2018). 5° Informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México. México.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2021). Transport: Energy consumption. México.
- Deb, K. (2001). Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. Wiley.
- Esposito, E., Dellamuzia, L., Moretti, U., Fuoco, A., Giorno, L., & Jansen, J. C. (2019). Simultaneous production of biomethane and food grade CO<sub>2</sub> from biogas: an industrial case study. *Energy & Environmental Science*, 12, 281-289
- Ghafghazi, S., Sowlati, T., Sokhansanj, S., Bi, X., & Melin, S. (2011). Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 3019-3028.
- Hernandez-Perez, L. G., Alsuhaibani, A. S., Radwan, N., El-Halwagi, M. M., & Ponce-Ortega, J. M. (2020). Structural and Operating Optimization of the Methanol Process Using a Metaheuristic Technique. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(8), 3135-3150.
- López Ortega, M. G. (2021). Optimización de la producción sostenible de etanol de caña en una biorrefinería adaptada a un ingenio azucarero mexicano. *CINVESTAV: Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Guadalajara*, México.
- Lopez-Ortega, M. G., Guadalajara, Y., Junqueira, T. L., Sampaio, I. L. M., Bonomi, A., & Sanchez A. (2021). Sustainability analysis of bioethanol production in Mexico by a retrofitted sugarcane industry based on the Brazilian expertise. *Energy*, 232.
- Martínez-Guido, S. I., González-Campos, J. B., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., El-Halwagi, M. M. Optimal reconfiguration of a sugar cane industry to yield an integrated biorefinery. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18, 553-562
- Martinez-Victoria, S., Castro, C., & Sanchez, A. (2021). Assessing Profitability of Bioenergy Production with Minimal Environmental Impact Biorefineries. *29th European Biomass Conference and Exhibition*, 1418-1422.
- Organización Internacional de Normalización. (2006a). Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia (ISO 14040). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- Organización Internacional de Normalización. (2006b). Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Requisitos y directrices (ISO 14044). <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Pires, J. C. M., Alvim-Ferraz, M. C. M., Martins, F. G., & Simoes, M. (2012). Carbon dioxide capture from flue gases using microalgae: Engineering aspects and biorefinery concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3043-3053.

- Sadhukhan, J., Ng, K. S., & Hernandez, E. M. (2014). *Biorefineries and Chemical Processes: Design, Integration and Sustainability Analysis*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Sanchez, A., Magaña, G., Gomez, D., Solis, M., & Banares-Alcantara, R. (2014). Bidimensional sustainability analysis of lignocellulosic ethanol production processes. Method and case study. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 8, 670-685.
- Sanchez, A., Sevilla-Güitrón, V., Magaña, G., Gutierrez, L. (2013). Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production. *Fuel*, 113, 165-179.
- Secretaría de Economía. (2017). Precio de referencia del azúcar base estándar para el pago de la caña de azúcar de la zafra 2017/2018. *DOF*, 2
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2014). Versión de Difusión del Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. México.
- Secretaria de Energía. (2014). Análisis y propuesta para la introducción de etanol anhidro en las gasolinas que comercializa PEMEX. México.
- Secretaria de Energía. (2017). Mapa de Ruta Tecnológica Bioetanol. México.
- Seth, J. R., & Wangikar, P. P. (2015). Challenges and opportunities for microalgae-mediated CO<sub>2</sub> capture and biorefinery. *Biotechnology & Bioengineering*, 112 (7), 1281-1296.
- Singh, R., & Shukla, A. (2014). A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 854-864.
- Ulonska, A., König, A., Klatt, M., Mitsos, A., & Viell, J. (2018). Optimization of Multiproduct Biorefinery Processes under Consideration of Biomass Supply Chain Management and Market Developments. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(20), 6980-6991.
- U.S. Bureau of Labor Statistics. (2021). Producer Price Index by Commodity: Chemicals and Allied Products: Carbon Dioxide [WPU06790302]. Recuperado de <https://fred.stlouisfed.org/series/WPU06790302>
- Wetenhall, B., Aghajani, H., Chalmers, H., Benson, S. D., Ferrani, M-C., Li, J., Race, J.M., Singh, P., & Davison, J. (2014). Impact of CO<sub>2</sub> impurity on CO<sub>2</sub> compression, liquefaction and transportation. *Energy Procedia*, 63, 2764-2778.
- Woinaroschy, A. (2014). Multiobjective optimal design for biodiesel sustainable production. *Fuel*, 135, 393-405.
- Yu, T., Niu, L. & Iwahashi, H. (2020). High-Pressure Carbon Dioxide Used for Pasteurization in Food Industry. *Food Eng Rev*, 12, 364–380.