

Producción de gas de síntesis a partir de CO₂ residual de la industria sucroalcoholera: un enfoque basado en simulación de procesos

Ángeles C. Jerez¹, Ana M. Cuezco^{1,2}, Fernando D. Mele^{1,2} y Paula Z. Araujo¹

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, T4002 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, T4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

camila2.jerez@gmail.com
acuezco@herrera.unt.edu.ar
fmele@herrera.unt.edu.ar
paraujo@herrera.unt.edu.ar

Resumen. Este trabajo aborda el estudio de un proceso de conversión de dióxido de carbono (CO₂) residual, proveniente de la industria sucroalcoholera, en gas de síntesis, un combustible gaseoso compuesto por monóxido de carbono e hidrógeno (H₂), utilizado tanto en la generación de energía eléctrica y térmica, como en la producción de combustibles y productos químicos. El diseño y modelado se realiza con la asistencia del simulador comercial de procesos UniSim® Design v500. La metodología empleada permite definir el diagrama de flujo del proceso, establecer las mejores condiciones de operación y analizar indicadores técnicos de desempeño. Al final del proceso, se obtienen 0,75 toneladas de gas de síntesis por cada tonelada de CO₂ capturado. Los resultados obtenidos reflejan la factibilidad técnica de la propuesta. El uso de CO₂ residual e H₂ renovable como materias primas alternativas para producción de gas de síntesis podría impulsar la transición energética, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles. Este trabajo forma parte de un proyecto más amplio, cuyo objetivo es transformar el CO₂ biogénico generado en los procesos de combustión y fermentación de biomasa en productos monocarbonados, como estrategia para reducir la huella de carbono y mitigar el impacto ambiental del sector químico. El estudio será complementado en investigaciones futuras con integración energética, análisis de costos y evaluación ambiental.

Palabras clave: *Captura y Utilización de Carbono; Huella de Carbono; Biorrefinería.*

Syngas production from residual CO₂ of the sugar-alcohol industry: A process simulation-based approach

Ángeles C. Jerez¹, Ana M. Cuezco^{1,2}, Fernando D. Mele^{1,2} y Paula Z. Araujo¹

¹ Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán. Av. Independencia 1800, T4002 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, CCT CONICET NOA Sur, Crisóstomo Álvarez 722, T4000 San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.
camila2.jerez@gmail.com
acuezco@herrera.unt.edu.ar
fmele@herrera.unt.edu.ar
paraujo@herrera.unt.edu.ar

Abstract. This work investigates a process for converting residual carbon dioxide (CO₂), from the sugar-alcohol industry, into syngas, a gaseous fuel composed of carbon monoxide (CO) and hydrogen (H₂). Syngas is used for the generation of electrical and thermal energy, as well as in the production of fuels and chemical products. The design and modeling were performed using the commercial process simulator UniSim® Design v500. The methodology employed allows for the definition of the process flow diagram, identification of optimal operating conditions, and evaluation of technical performance indicators. As a result, 0,75 metric tons of synthesis gas are obtained per ton of CO₂ captured. The results demonstrate the technical feasibility of the proposed approach. The use of residual CO₂ and renewable H₂ as alternative feedstocks for synthesis gas production could drive the energy transition by reducing dependence on fossil fuels. This work is part of a broader project aimed at transforming biogenic CO₂ generated in biomass combustion and fermentation processes into monocarbonate products, as a strategy to reduce carbon footprint and mitigate environmental impact in the chemical sector. Future research will include energy integration, cost analysis, and environmental impact assessment.

Keywords: *Carbon Capture and Utilization; Carbon Footprint; Biorefinery.*

1 Introducción

En las últimas décadas, el aumento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero, en particular de dióxido de carbono (CO_2), ha intensificado el calentamiento global y acelerado el cambio climático (Hassan et al., 2024). A pesar de los avances en investigación y en la implementación de tecnologías de captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS) (Shangli-Shi et al., 2025), las emisiones globales de CO_2 asociadas al uso de combustibles fósiles y a la actividad industrial alcanzaron en 2024 un valor récord de 37,8 Gt, lo que contribuyó a registrar concentraciones atmosféricas alarmantes de CO_2 de 422,5 ppm, un 50% superiores a los niveles preindustriales (Global Energy Review, 2025).

En la Argentina, el sector energético mantiene una fuerte dependencia de fuentes no renovables, en particular de gas natural y petróleo, que representan aproximadamente el 53% y el 31% de la matriz energética nacional, respectivamente (BBVA Research, 2025). Esta composición refleja la estrecha relación entre la actividad industrial y el uso intensivo de combustibles fósiles, lo que contribuye significativamente a las emisiones de CO_2 de origen fósil. Frente a este panorama, resulta fundamental promover el desarrollo de fuentes de energía renovables y adoptar tecnologías complementarias que permitan reducir el impacto ambiental del sistema energético.

Los ingenios del Noroeste Argentino operan con sistemas de cogeneración que les permiten generar vapor y electricidad, utilizando como fuente de energía residuos lignocelulósicos, principalmente bagazo y residuos de cosecha. Este proceso genera un volumen significativo de CO_2 biogénico. La autonomía energética del sector permite cubrir su demanda interna y, en muchos casos, disponer de excedentes que pueden ser aprovechados en tecnologías complementarias. En este contexto, la captura del CO_2 emitido y su utilización como materia prima para la síntesis de productos químicos representa una alternativa tecnológica con alto potencial para contribuir a la descarbonización del sector. Además, posiciona a la industria sucroalcoholera como un actor clave en la transición hacia un modelo económico más limpio, eficiente y circular.

Entre los productos de interés, destaca el gas de síntesis, un combustible gaseoso compuesto principalmente por monóxido de carbono (CO) e H_2 en distintas proporciones, que también puede contener trazas de CO_2 , agua y metano. Su composición ajustable lo convierte en un combustible versátil, empleado comúnmente como insumo en múltiples procesos industriales. Sus aplicaciones incluyen la generación de H_2 , metanol y amoníaco, así como la elaboración de combustibles líquidos mediante el proceso Fischer Tropsch y la generación de energía eléctrica de manera eficiente (Detz et al., 2024). Por lo general, se requiere una relación molar H_2/CO de entre 1 y 2 para estos procesos (Åberg, 2014).

Según Detz et al. (2024), el gas de síntesis se produce tradicionalmente mediante reformado, gasificación o pirólisis de recursos fósiles como gas natural, residuos de petróleo y carbón. No obstante, en respuesta a los desafíos medioambientales actuales, se están desarrollando rutas alternativas más sostenibles, tales como la reducción de CO_2 con H_2 , gasificación de biomasa y conversión electroquímica de CO_2 . Este gas de síntesis renovable, derivado de fuentes biogénicas, representa una excelente alternativa al gas de síntesis de origen fósil, ya que puede integrarse

fácilmente en los sistemas existentes de generación, transporte y distribución sin requerir modificaciones significativas (El-Nagar et al., 2024). Su uso fomenta un modelo energético más limpio y respetuoso con el medio ambiente, contribuyendo activamente a la descarbonización de la matriz energética y favoreciendo el cumplimiento de los objetivos globales de sostenibilidad.

El objetivo de este trabajo es evaluar la viabilidad técnica de la producción de gas de síntesis a partir de la hidrogenación de CO_2 biogénico, con el soporte de un simulador comercial de procesos químicos. Se simula el proceso con el fin de analizar su desempeño bajo diversas condiciones operativas y verificar la factibilidad de esta tecnología para el aprovechamiento de emisiones industriales de CO_2 . Los resultados servirán como base para futuros estudios de integración energética, análisis de costos e impactos ambientales.

2 Metodología

La Fig. 1 representa el esquema general del proceso propuesto integrado a una biorrefinería de caña de azúcar. Este consta de cuatro unidades principales: (i) unidad de producción de H_2 ; (ii) unidad de captura de CO_2 de los gases de combustión; (iii) unidad de producción de gas de síntesis; y (iv) unidad de separación y purificación del gas de síntesis. Los insumos del proceso son agua destilada, gases de combustión y electricidad, mientras que el producto es el gas de síntesis.

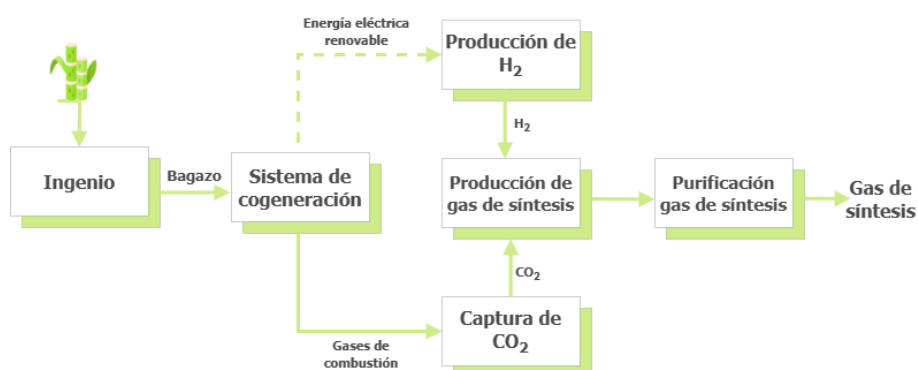


Fig. 1. Esquema conceptual del proceso propuesto de producción de gas de síntesis.

Para el modelado y la simulación del proceso se utiliza el *software* UniSim Design® v500 (Honeywell, 2024). Esta herramienta incorpora numerosos modelos matemáticos de fenómenos físicos y químicos, así como de operaciones unitarias, además de una amplia base de datos de propiedades fisicoquímicas de componentes puros y mezclas. La combinación de estos recursos permite recrear el comportamiento de un proceso en un entorno computacional. Al seleccionar adecuadamente los paquetes termodinámicos y aplicar criterios de diseño conceptual, se obtienen resultados que representan de manera precisa el comportamiento real del sistema.

Se definen indicadores técnicos que representan diferentes aspectos del proceso, relevantes para la evaluación de la producción de gas de síntesis. Dichos indicadores

son calculados a partir de los balances de materia y energía resultantes de la simulación del proceso.

(1) CO_2 recuperado, rec_{CO_2} . Porcentaje de CO_2 recuperado en la unidad de captura en relación con la cantidad total de CO_2 que ingresa en la corriente de gases de combustión, se define como:

$$rec_{CO_2} = \frac{CO_{2, Salida-SC}}{CO_{2, Entrada-SC}} \cdot 100$$

donde,

$CO_{2, Entrada-SC}$: caudal molar de CO_2 que ingresa a la sección de captura en la corriente de gases de combustión.

$CO_{2, Salida-SC}$: caudal molar de CO_2 capturado en esta sección.

(2) *Consumo específico de hidrógeno*. Es la cantidad de H_2 requerida como materia prima por mol de CO_2 consumido en el proceso (mol_{H_2}/mol_{CO_2}).

(3) *Consumo específico de energía*. Es el aporte de energía al proceso, expresado en kW por masa de gas de síntesis producido. Comprende los consumos térmicos en los servicios de calefacción y refrigeración, y el consumo de potencia eléctrica en bombas y compresores, (kJ/kg_{GS}). Este indicador se informa en referencia al proceso de producción de gas de síntesis, incluyendo las unidades de captura, conversión de CO_2 y purificación del producto.

(4) *Rendimiento específico del producto*. Es la masa de gas de síntesis obtenido por masa de CO_2 capturado (kg_{GS}/kg_{CO_2}).

3 Resultados y discusión

3.1 Unidad de producción de H_2

Se propone producir H_2 verde mediante electrólisis alcalina, aprovechando el excedente de energía renovable del ingenio, en lugar de usar fuentes fósiles, para asegurar la sostenibilidad del proceso.

3.2 Unidad de captura de CO_2

Existen diversas tecnologías para la captura de CO_2 . Entre las más comunes se encuentran la absorción química y la separación física, aunque también se emplean otras alternativas como las membranas y los ciclos de *looping* (químico o con calcio) (IEA, 2020). En el presente trabajo, la captura de CO_2 se realiza mediante un proceso de absorción-regeneración química tal como en Cuezze et al. (2021). Se toma como referencia un ingenio tipo de capacidad media que procesa 1,25 millones de toneladas de caña de azúcar bruta por zafra (IPAAT, 2024). Este complejo genera vapor y energía eléctrica a partir de la combustión del bagazo, actividad que se estima que libera alrededor de 90 toneladas de CO_2 por hora. Los gases de combustión

provenientes de las calderas bagaceras contienen CO_2 impurificado con otras sustancias. Según Golato et al. (2008), la composición másica de los gases de combustión es la siguiente: 14,10% de CO_2 , 7,77% de O_2 , 0,0204% de CO , 63,10% de N_2 y 15,00% de H_2O . Se opta por purificar esta corriente gaseosa, ya que las impurezas están presentes en concentraciones elevadas y su introducción al sistema implica el manejo de caudales muy grandes, lo cual complica el diseño y la operación del proceso.

En la simulación de la sección de captura se utiliza el paquete termodinámico *Amine Package* con el modelo semiempírico de Kent-Eisenberg (Kent & Eisenberg, 1976). Los gases de combustión se acondicionan pasando por filtros húmedos llamados *scrubbers*, donde se obtienen los gases de chimenea a 30°C libres de material particulado (cenizas), y luego se comprimen y enfrían para ingresar a la columna de absorción, para cumplir con sus condiciones operativas. Dicha columna utiliza una solución acuosa de monoetanolamina (MEA) 30% m/m como absorbente, que circula en contracorriente con la corriente de gases de combustión. Se analiza cómo varía la recuperación de CO_2 en función de la temperatura del solvente al ingresar en dicha columna. La recuperación de CO_2 en la columna de absorción se ha definido como:

$$\text{Recuperación de } \text{CO}_2^{C.Abs} = \frac{\text{moles de } \text{CO}_2 \text{ en la corriente de disolvente enriquecido}}{\text{moles de } \text{CO}_2 \text{ en la corriente de gases de combustión}}$$

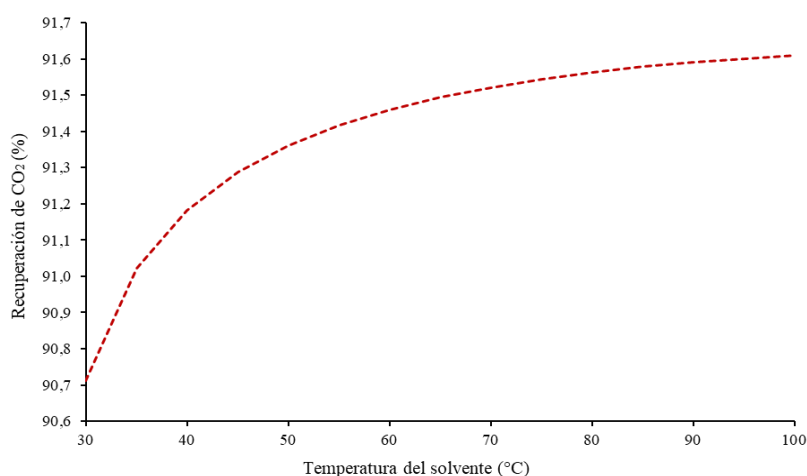


Fig. 2. Evaluación de CO_2 por efecto térmico.

En la Fig. 2 se observa que la recuperación de CO_2 mejora al aumentar la temperatura del solvente, es decir, un aumento en la temperatura facilita la absorción de CO_2 , mejorando la eficiencia del proceso. Así, se decide trabajar a una temperatura de 90°C , logrando una recuperación que ronda el 92%.

La selección del caudal de solvente y de la presión de operación se realiza observando la eficiencia de recuperación de CO_2 en la columna de absorción. La Fig. 3 presenta resultados para cuatro condiciones de presión: 1,1; 3; 5 y 6 bar. Se evidencia cómo el aumento de la presión de operación y del caudal de solvente

permiten alcanzar una mayor recuperación de CO_2 . Se decide trabajar a una presión de 5 bar y un caudal de solvente de 400 t/h, alcanzando una recuperación del 99%.

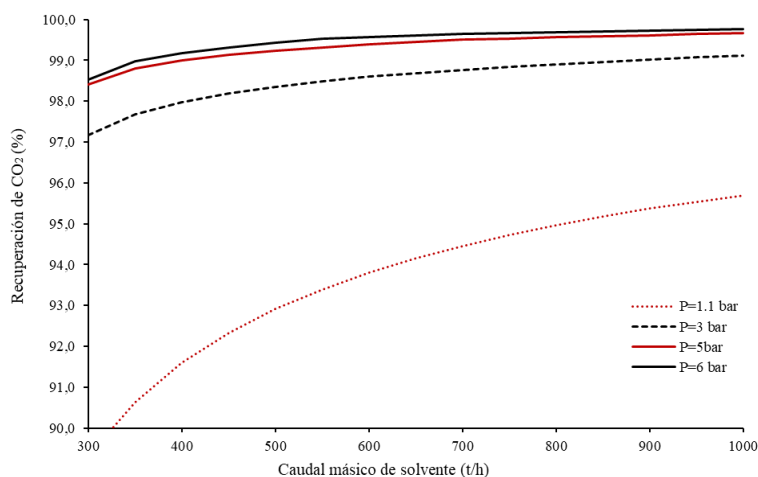


Fig. 3. Recuperación de CO_2 en la columna de absorción en función del solvente alimentado a la columna de absorción.

En una segunda etapa, el solvente rico en CO_2 se introduce en una columna de regeneración, donde el gas es liberado mediante desorción. El solvente regenerado se extrae por la base de la columna, se acondiciona y, tras pasar por un *splitter* para remover el CO_2 residual, se recircula hacia la columna de absorción. La corriente rica en CO_2 se somete a un proceso de separación en un equipo denominado *flash*, donde se elimina el exceso de agua mediante una vaporización instantánea (Fig. 4).

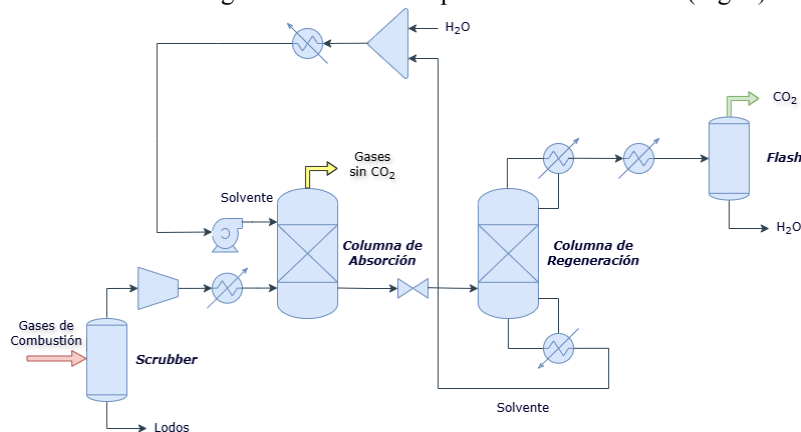


Fig. 4. Diagrama de flujo de la unidad de captura de CO_2 .

Como resultado, se obtiene una corriente gaseosa de 474 kmol/h con una composición molar de 96% de CO_2 , lista para ser alimentada a la unidad de reacción.

Los principales resultados de la unidad de captura se resumen en la Tabla 1, que describe las condiciones de las corrientes involucradas, y en la Tabla 2, que presenta las variables operativas de los equipos principales.

Tabla 1. Condiciones de las corrientes “Gases sin CO₂” y “CO₂ capturado”.

Nombre	Gases sin CO ₂	CO ₂ capturado	Unidades
T	100,9	40	°C
P	5	2	bar
Flujo	5127	473,7	kmol/h
<i>Fracciones molares</i>			
N ₂	71,56	0,18	%molar
H ₂ O	20,43	3,74	%molar
O ₂	7,71	0,03	%molar
CO	0,02	-	%molar
MEA	-	-	%molar
CO ₂	0,21	96,06	%molar

Tabla 2. Condiciones de operación de las columnas de absorción y regeneración.

	Columna de Absorción	Columna de Regeneración	Unidades
Número de platos	15	20	-
Temperatura de alimentación	90	92	°C
Temperatura del hervidor	-	120	°C
Temperatura del condensador	-	80	°C
Presión	5	2	bar
Relación solvente/alimentación	3,7	-	kmol/kmol
Relación de reflujo	-	15	kmol/kmol

3.3 Unidad de reacción

La molécula de CO₂ es termodinámicamente estable y representa el estado de mayor oxidación del carbono. En consecuencia, su reducción requiere un considerable aporte de energía y el uso de catalizadores altamente eficientes (Saravanan et al., 2021). El gas de síntesis puede obtenerse a partir de la hidrogenación del CO₂ mediante la reacción inversa de desplazamiento agua-gas (RWGS), representada en la ecuación (1). Sin embargo, por ser una reacción endotérmica y por la posible ocurrencia de reacciones secundarias como la reacción de Sabatier, (metanización del CO), la reacción de Bosh y la reacción de Boudouard, representadas en las ecuaciones (2) a (5), es necesario operar a altas temperaturas. Estas condiciones favorecen la selectividad hacia CO en la corriente de productos (Almajed et al., 2023).



El objetivo de esta sección es reproducir los sistemas de reacción propuestos por König et al. (2015), Barbera et al. (2019) y por Qiao et al. (2023), adaptando la corriente de alimentación de CO_2 a las condiciones obtenidas a la salida de la unidad de captura de CO_2 . En la Tabla 3 se resumen las principales diferencias en los parámetros de simulación utilizados por estos tres autores.

Tabla 3. Parámetros de simulación para la producción de gas de síntesis según König et al. (2015), Barbera et al. (2019) y Qiao et al. (2023).

	König et al. (2015)	Barbera et al. (2019)	Qiao et al. (2023)	Unidad
Modelo termodinámico	Peng-Robinson	NRTL y fase gaseosa ideal	Peng-Robinson	-
<i>Reactor</i>				
Tipo	Gibbs adiabático	Estequiométrico isotérmico	Estequiométrico isotérmico	-
P	25	1	1,01	bar
T	900	530	650	°C
Relación H_2/CO_2	3	3,3	3	kmol/kmol
Reacción	(1) y (2)	(1)	(1)	-

Los tres trabajos utilizan reactores no cinéticos para simular el proceso. Para modelar un reactor tipo estequiométrico, es necesario definir la estequiometría de las reacciones involucradas y establecer la conversión del reactivo limitante. En cambio, el reactor tipo Gibbs adiabático calcula la composición de equilibrio de la corriente de salida mediante la minimización de la energía libre de Gibbs de la corriente de entrada, requiriendo únicamente la especificación de la estequiometría.

König et al. (2015) emplea CO_2 e H_2 para producir gas de síntesis, que posteriormente se destina a la obtención de combustibles líquidos mediante síntesis Fischer-Tropsch. La materia prima se acondiciona a las condiciones de operación del reactor, el cual opera a una presión de 25 bar. Esta presión se selecciona con el fin de obtener el gas de síntesis a la presión requerida en la etapa siguiente del proceso. La temperatura de operación, de 900 °C, se justifica por el carácter endotérmico de la reacción RWGS, la cual se ve favorecida a altas temperaturas. Dado que las reacciones secundarias (3), (4) y (5) no son favorecidas en estas condiciones, se adiciona vapor de agua a la alimentación del reactor para evitar la formación de coque.

Para la adaptación de los sistemas de Barbera et al. (2019) y Qiao et al. (2023) (ver Fig. 5), se optó por trabajar una presión de 2 bar, para así mantener la continuidad con la unidad de captura, cuya corriente de CO_2 se encuentra a tal presión. Esto permite minimizar fluctuaciones a lo largo del proceso global. La corriente de CO_2 e H_2 se calienta a 650°C para ingresar al reactor.

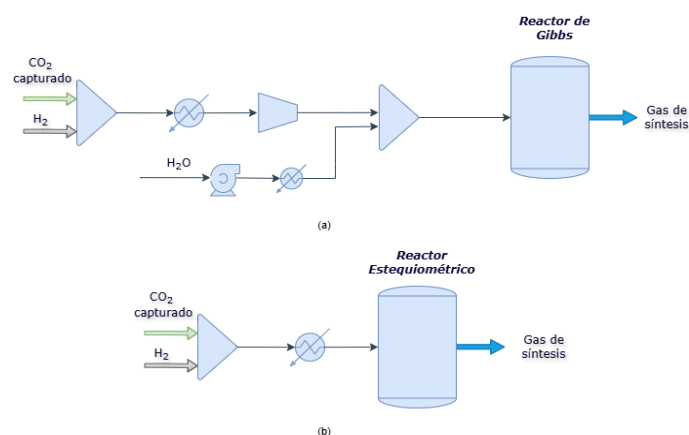


Fig. 5. Diagrama de flujo de la unidad de reacción de CO_2 . (a) König. et al (2015), (b) Qiao et al. (2023).

Tabla 4. Condiciones de la corriente “Gas de síntesis”.

Nombre	König et al. (2015)	Barbera et al. (2019)	Qiao et al. (2023)	Unidades
<i>Gas de síntesis</i>				
T	909	530	650	$^\circ\text{C}$
P	25	2	2	bar
Flujo	1910	3166	1871	kmol/h
Relación H_2/CO	3,3	1,4	4,6	kmol/kmol
<i>Fracciones molares</i>				
CO	14,85	33,28	13,37	%molar
H_2	49,02	46,42	61,31	%molar
CO_2	6,2	5,91	10,94	%molar
CH_4	2,76	-	-	%molar
H_2O	27,11	14,35	14,32	%molar
N_2	0,04	0,03	0,04	%molar
O_2	0,01	0,01	-	%molar

Según los resultados obtenidos (Tabla 4), se concluye que las tres alternativas generan una corriente de producto con proporciones satisfactorias de H_2 y CO. No

obstante, se decide avanzar en el desarrollo del trabajo adaptando el esquema propuesto por Barbera et al. (2019), cuyas condiciones de presión y temperatura presentan mayores ventajas desde el punto de vista operativo.

3.4 Unidad de separación y purificación del gas de síntesis

El objetivo de esta sección de la planta es purificar el gas de síntesis para obtener un producto compuesto principalmente por CO y H₂. Se propone un sistema de purificación basado en absorción química, utilizando agua como solvente. El proceso incluye una columna de absorción, en la cual se recupera el CO₂ no reaccionado, y una columna de regeneración, que permite liberar los gases absorbidos y recircular el solvente. La Fig. 6 presenta el diagrama de flujo correspondiente a esta unidad.

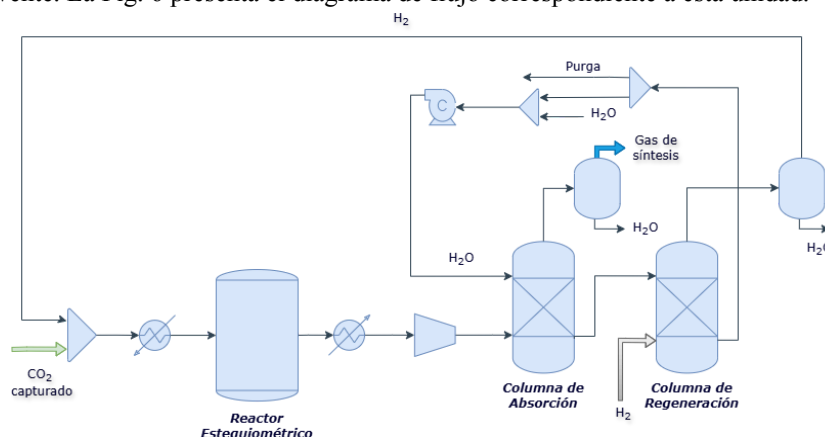


Fig. 6. Diagrama de flujo de la unidad de reacción y purificación de gas de síntesis propuestas.

La Tabla 5 presenta las variables operativas de los equipos principales, las cuales son consistentes con las condiciones operativas reportadas por Barbera et al. (2019).

Tabla 5. Condiciones de operación de las columnas de absorción y regeneración.

	Columna de Absorción	Columna de Regeneración	Unidades
Número de platos	30	2	-
Temperatura de alimentación	40	40	°C
Presión	7	2	bar
Relación solvente/alimentación	290		kmol/kmol
Relación H ₂ /alimentación	-	0,002	kmol/kmol

Se obtiene un gas de síntesis con una relación H₂/CO cercana a 3. La Tabla 6 muestra la composición del producto final, cuyos valores son muy similares a los reportados en la literatura (Barbera et al., 2019).

Tabla 6. Condiciones de la corriente de producto “Gas de síntesis”.

Nombre	Gas de síntesis	Unidades
T	40	°C
P	7	bar
Flujo	1905	kmol/h
Relación H ₂ /CO	3,3	kmol/kmol
<i>Fracciones molares</i>		
CO	23,08	%molar
H ₂	75,91	%molar
CO ₂	0,96	%molar
H ₂ O	-	%molar
O ₂	0,01	%molar
N ₂	0,04	%molar

La Tabla 7 presenta los indicadores técnicos del proceso de producción de gas de síntesis. En la unidad de captura se logra recuperar el 87% del CO₂ proveniente de la corriente “gases de chimenea”, lo cual constituye un desempeño altamente favorable. Este resultado permite obtener una corriente de CO₂ con una pureza del 96%, adecuada para ser utilizada como materia prima en la producción de gas de síntesis.

El proceso permite obtener 0,75 mol de gas de síntesis por mol de CO₂ alimentado, lo cual es un rendimiento técnico destacado. Aunque no todo el CO₂ se convierte en gas de síntesis, una fracción significativa es transformada de manera eficiente, lo cual permite aprovechar este residuo industrial, en concordancia con los objetivos del proceso de convertir las emisiones de CO₂ residual en sustancias de mayor valor.

En cuanto a los requerimientos energéticos, los valores de calefacción y refrigeración reflejan la alta demanda térmica asociada al carácter fuertemente endotérmico de la reacción RWGS, así como a las necesidades de acondicionamiento térmico de las corrientes gaseosas. Este aspecto representa un punto crítico de mejora, que podrá ser abordado en futuras etapas mediante estrategias de integración energética, con el fin de minimizar el consumo de servicios auxiliares y aumentar la eficiencia global del sistema.

Por su parte, el consumo eléctrico ha sido calculado sin incluir la energía específica necesaria para la producción de H₂ por electrólisis del agua. Si bien esta unidad no fue modelada en el presente estudio, se espera que represente un aporte considerable al consumo eléctrico total del proceso. Sin embargo, es importante destacar que esta demanda podría ser atenuada por los excedentes de electricidad generados en la planta sucroalcohólica, lo que favorecería la sostenibilidad energética y ambiental del esquema propuesto.

Tabla 7. Indicadores técnicos del proceso estudiado

Indicadores técnicos		Unidad
CO ₂ recuperado	rec_{CO_2}	87 %

H ₂ consumido	H ₂ /CO ₂	4,14	mol/mol
Gas de síntesis producido	Syngas/CO ₂	0,75	mol/mol
Consumo de energía térmica			
Calefacción	energía	4,13 10 ⁴	kJ/kg _{GS}
Refrigeración	energía	3,55 10 ⁴	kJ/kg _{GS}
Consumo de energía eléctrica	energía	1,77 10 ³	kJ/kg _{GS}

4 Conclusiones

En este trabajo se analiza la viabilidad técnica de capturar y transformar el CO₂ liberado por la industria sucroalcoholera en gas de síntesis, mediante hidrogenación. Esta investigación representa una primera aproximación al estudio del proceso en base a la su simulación, utilizando el *software* UniSim Design v500, con el fin de definir condiciones de operación, cuantificar flujos y composiciones que permitan calcular indicadores técnicos. La experiencia demuestra, además, el valor de los simuladores computacionales como herramientas clave para el diseño y análisis de sistemas complejos con múltiples operaciones unitarias.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el proceso es técnicamente viable. Sin embargo, es importante destacar que se trata de un estudio basado en modelos de conversión, sin incorporar aún mecanismos cinéticos detallados. Por lo tanto, se propone avanzar con investigaciones que profundicen en este aspecto. Asimismo, se ampliará el alcance del estudio para incorporar en el *software* de simulación la unidad de producción de hidrógeno verde vía electrólisis del agua mediante un módulo simplificado. La evaluación técnica será la base para realizar un análisis de ciclo de vida para garantizar la sostenibilidad del proceso, así como un estudio económico orientado a determinar los costos asociados a la producción del gas de síntesis.

La valorización del CO₂ residual para obtener gas de síntesis, según la estrategia propuesta, se perfila como una alternativa innovadora y prometedora. No solo contribuye a la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también favorece una simbiosis industrial entre ingenios sucroalcoholeros y plantas de captura y utilización de carbono, al transformar un residuo en un compuesto C1 de alto valor.

Referencias

- Åberg, K. (2014). Syngas production by integrating thermal conversion processes in an existing biorefinery (Tesis de licenciatura, Universidad de Umeå). DiVA Portal.
- Almajed, H. M., Guerra, O. J., Smith, W. A., Hodge, B., & Somoza-Tornos, A. (2023). Evaluating the techno-economic potential of defossilized air-to-syngas pathways. *Energy & Environmental Science*, 16(12), 6127–6146.
- BBVA Research. (2025). Argentina | Situación Energía 2025: Petróleo y Gas <https://bit.ly/4kH8qKc>
- Barbera, E., Mantoan, F., Bertucco, A., & Bezzo, F. (2020). Hydrogenation to convert CO₂ to C1 chemicals: Technical comparison of different alternatives by process simulation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 98(9), 1893-1906.

- Cuezso, A. M., Araujo, P. Z., & Mele, F. D. (2021). Simulación de un proceso de fabricación de metanol a partir de fuentes renovables. In IV Simposio Argentino de Informática Industrial e Investigación Operativa (SIIO 2021) - JAIIO 50.
- Detz, R., Beerse, M., Meulendijks, N., Buskens, P., & van der Zwaan, B. (2024). Towards the use of renewable syngas for the decarbonization of industry. *ChemSusChem*.
- El-Nagar, R. A., & Ghanem, A. A. (2024). Syngas production, properties, and its importance. In *Syngas for Industry Applications*, 25-45.
- International Energy Agency. (2025). Global energy review 2025. IEA.
- Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Aso, G., Correa, C. A., & Paz, D. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 85(2), 17-31.
- Hassan, Q., Viktor, P., Al-Musawi, T. J., Ali, B. M., Algburi, S., Alzoubi, H. M., ... Jaszczur, M. (2024). The renewable energy role in the global energy transformations. *Renewable Energy Focus*, 48, 100545.
- Unisim Design Suite®. Honeywell International Inc.
- International Energy Agency. (2020). Energy Technology Perspectives 2020 - Special Report on Carbon Capture Utilisation and Storage: CCUS in clean energy transitions. OECD Publishing.
- Instituto de Procesos Agroindustriales y Ambientales Tucumán. (2024). Totales hasta 2da quincena diciembre 2024: Datos productivos – Zafra 2024/2025. IPAAT.
- Kent, R. L., & Eisenberg, B. (1976). Better data for amine treating. *Hydrocarbon Processing*, 55, 87-90.
- König, D. H., Baucks, N., Dietrich, R.-U., & Wörner, A. (2015). Simulation and evaluation of a process concept for the generation of synthetic fuel from CO₂ and H₂. Elsevier.
- Saravanan, A., Vo, D. V. N., Jeevanantham, S., Bhuvaneswari, V., Narayanan, V. A., Yaashikaa, P. R., ... & Reshma, B. (2021). A comprehensive review on different approaches for CO₂ utilization and conversion pathways. *Chemical Engineering Science*, 236, 116515.
- Shi, S., & Hu, Y. H. (2024). A landmark year for climate change and global carbon capture, utilization, and storage: Annual progress review. *Energy Science & Engineering*.
- Qiao, Y., Liu, W., Guo, R., Sun, S., Zhang, S., Bailey, J. J., & Wu, C. (2023). Techno-economic analysis of integrated carbon capture and utilization compared with carbon capture and utilization with syngas production. *Fuel*, 332, 125972.