

MODELO DE OPTIMIZACIÓN PARA LA PRODUCCIÓN DE GAS NATURAL RENOVABLE (GNR) A PARTIR DE BIOGÁS CRUDO DE DIFERENTES ORÍGENES Solís, María Antonella¹

¹INTEC - FIQ
Director/a: Morero, Betzabet
Codirector/a: Cafaro, Diego Carlos

Área: Energías renovables

Palabras claves: Energías renovables, optimización matemática

INTRODUCCIÓN

El gas natural renovable (GNR) es una alternativa ampliamente estudiada por su potencial para recuperar y agregar valor a los residuos domésticos y de diversas actividades económicas, además de ofrecer una solución sostenible al abastecimiento energético mediante fuentes renovables. En el presente trabajo se caracterizaron dos vías de generación de biogás: la recuperación de biogás crudo en rellenos sanitarios y la codigestión anaeróbica de residuos con distintas composiciones). Asimismo, se analizaron los procesos de *cleaning* (eliminación de componentes a nivel de trazas) y *upgrading* (remoción de dióxido de carbono) necesarios para obtener un biogás con la calidad de inyección a la red. La caracterización de cada nodo incluyó una evaluación económica de los costos de inversión y de operación, así como un análisis de indicadores ambientales, como la capacidad de conversión energética y las emisiones netas de dióxido de carbono equivalentes. Basándose en los parámetros económicos y tecnológicos recopilados, se desarrolló un modelo de programación matemática no lineal para optimizar la red y realizar evaluaciones multescenario.

OBJETIVOS

- Evaluar la viabilidad técnica, económica y ambiental de la generación de biogás a partir de residuos en rellenos sanitarios y codigestión anaeróbica de residuos con distintas composiciones y de diferentes orígenes.
- Desarrollar y aplicar un modelo de programación matemática no lineal para la optimización de la red de biogás, considerando objetivos económicos y ambientales.

Título del proyecto: Optimización de la interconexión de gas natural renovable (GNR) a la red de distribución de gas natural fósil.

Año convocatoria: 2022

Organismo financiador: UNL

Director/a: Morero, Betzabet



METODOLOGÍA

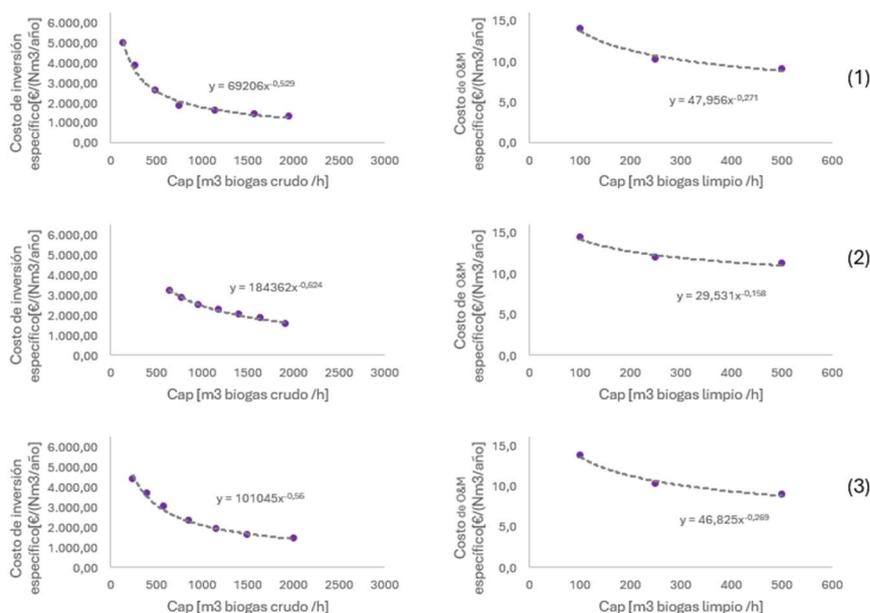
Caracterización de procesos de *Upgrading*

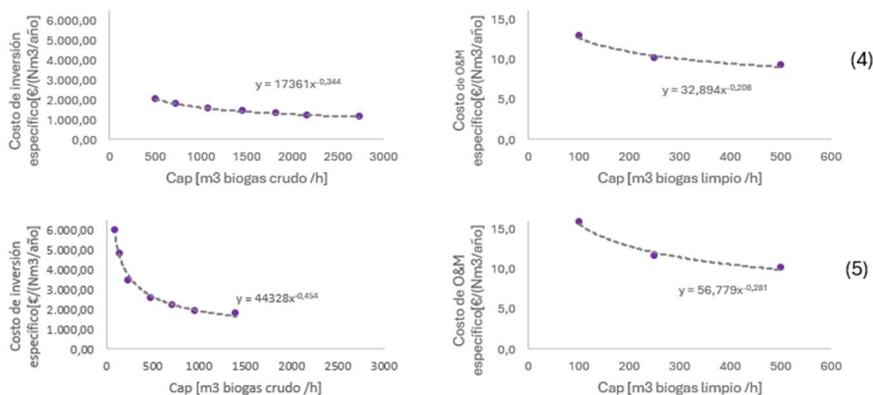
En una primera instancia se realizó una investigación del estado del arte de las tecnologías de purificación de biogás crudo. Las tecnologías de *upgrading* relevadas fueron: lavado con agua (*water scrubbing*), lavado con aminas (*amine scrubbing*), lavado físico (*physical scrubbing*), adsorción por oscilación de presión (*pressure swing adsorption*) y membranas. El objetivo de estas tecnologías es remover el dióxido de carbono presente en el biogás crudo, logrando que el biogás limpio obtenido tenga un poder calorífico comparable con el gas natural fósil. Las mismas se diferencian entre ellas por el fundamento en el que basan su capacidad de remover dióxido de carbono: las primeras 3 refieren a métodos de absorción en diferentes solventes (aguas, aminas, u otros solventes orgánicos) con diferente grado de selectividad, PSA se basa en la adsorción sobre componentes sólidos en ciclos de altas y bajas presiones, y el último método refiere al paso selectivo por membranas semipermeables.

Todas estas tecnologías fueron caracterizadas en función de sus parámetros operativos, económicos y de eficiencia. Se evaluaron aspectos como la capacidad de remoción de CO₂, el consumo energético, los costos de mantenimiento y los posibles impactos ambientales asociados. Además, se analizaron plantas de tratamiento de biogás de diferentes escalas y su adaptabilidad a variaciones en la composición del biogás crudo.

Como primer resultado de esta fase, se construyeron curvas de costos de inversión y operación para diferentes capacidades de planta, representadas en la Figura 1. Estas curvas proporcionan una visión de cómo varían los costos en función del tamaño de la planta y permiten identificar las economías de escala. Además, para cada una de las tecnologías se definieron los parámetros de eficiencia en la recuperación del metano y las posibles pérdidas de este compuesto durante el proceso de purificación, para estimar las emisiones netas del proceso en su conjunto.

Figura 1. Curvas de costos de inversión y de operación para las tecnologías de *upgrading* de biogás estudiadas, en miles de dólares.





Caracterización de procesos de *Cleaning*

A partir del análisis previo, se identificaron los procesos complementarios denominados *cleaning*, cuyo objetivo es eliminar aquellos componentes del biogás crudo que no deben estar presentes en el biogás limpio, ya sea por requerimientos de calidad final o porque interfieren negativamente en los procesos de upgrading antes mencionados. Estos componentes indeseados afectan la selectividad de los mismos o producen envenenamientos de los agentes que captan el dióxido de carbono. Algunos ejemplos de estos componentes, muchos de los cuales se encuentran a nivel de trazas son: compuestos sulfurados (como el sulfuro de hidrógeno), amoníaco, siloxanos, compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y agua.

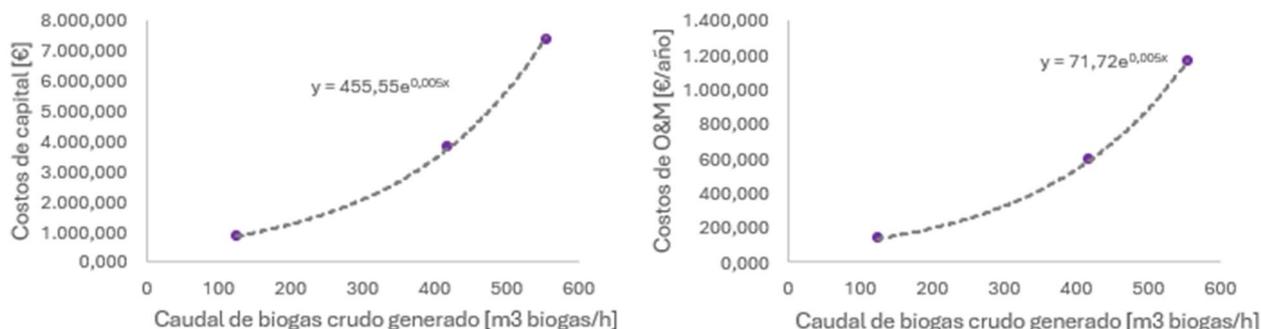
Se llevó a cabo un proceso para identificar cuáles de estos componentes deben eliminarse obligatoriamente para cada tecnología, según la calidad final de biogás limpio requerida. Para evaluar el impacto económico de los procesos de *cleaning*, se incorporó una prima adicional en los costos de inversión y operación de cada tecnología. Esta prima fue calculada ponderando datos de aplicaciones reales y estudios de caso, lo que permitió estimar los costos asociados a la remoción de estos componentes y su impacto en la viabilidad económica.

Caracterización de procesos de *generación de biogás crudo*

A continuación, se procedió a la identificación de dos posibles vías de generación de biogás crudo. La primera vía consistió en la recuperación de biogás a partir de rellenos sanitarios. Este proceso incluyó la caracterización de la composición de biogás de entrada proveniente de estos sitios. En la evaluación económica, se consideraron los costos asociados con la adaptación del relleno sanitario para permitir la extracción de biogás crudo, tales como el número de perforaciones verticales, los sistemas de bombeo y toda infraestructura adicional necesaria para el sistema de captura. Se construyeron curvas de costos de inversión y operación en función de la capacidad anual de recepción de residuos del relleno sanitario. Además, se evaluaron las potenciales pérdidas de metano en estos sistemas para incluirlas en el cálculo de las emisiones netas.

La segunda vía estudiada fue la codigestión de residuos provenientes de diferentes actividades económicas agroindustriales. Se caracterizaron las posibles corrientes de salida de biogás crudo según las diferentes composiciones de la alimentación de los biodigestores. Se determinaron curvas de costo de inversión y operación en función del volumen de residuos tratado y el correspondiente potencial de generación de biogás. Nuevamente se incluyeron los factores de pérdidas de metano en este análisis.

Figura 2. Curvas de costos de inversión y de operación para la codigestión de residuos agroindustriales, en miles de dólares.



Construcción del modelo matemático

En base a los parámetros económicos y ambientales recopilados, se desarrolló un modelo matemático mixto no lineal para la optimización integral de la cadena de generación y purificación del biogás. En primer lugar, se modelaron los nodos de generación de biogás crudo, que se describen con características composicionales específicas y un caudal volumétrico determinado, reflejando la variabilidad en la calidad y cantidad del biogás crudo disponible.

El modelo matemático considera la calidad del biogás crudo y la calidad final esperada del biogás limpio para definir los procesos de *cleaning* y de *upgrading* necesarios. La selección de estas tecnologías se incorpora como una variable de decisión en el modelo.

El objetivo es optimizar la cadena completa, abarcando desde la generación de biogás crudo hasta la obtención del biogás limpio listo para su inyección en la red. Esto incluye la integración de los costos operativos y de inversión de cada nodo del proceso, así como los impactos ambientales asociados en cuanto a emisiones en toneladas de dióxido de carbono equivalentes. El modelo además incorpora el balance energético contrastando la energía eléctrica y térmica consumida en cada etapa del proceso con la energía finalmente generada. El modelo permite evaluar diferentes configuraciones y escenarios para encontrar la solución óptima que maximice la eficiencia económica y ambiental de la cadena de tratamiento del biogás.

CONCLUSIONES

El modelo de programación matemática no lineal desarrollado para la optimización integral de la cadena de generación y purificación de biogás renovable permite identificar configuraciones óptimas que maximizan como criterio económico el valor presente neto de la red. Simultáneamente se calculan las emisiones netas de dióxido de carbono equivalentes asociadas, permitiendo la comparación y ponderación de soluciones mediante un criterio medioambiental.

El modelo está diseñado para evaluar diferentes configuraciones de la red, considerando diversas fuentes de biogás crudo (rellenos sanitarios y biodigestores anaeróbicos), que producen diferentes caudales de biogás crudo y con variadas composiciones químicas según los residuos de alimentación. Estas variabilidades de caudal y composición, derivan en la consideración de plantas de upgrading de diferentes tamaños para su purificación, aprovechando las economías de escala.

Al incorporar el modelo múltiples variables operativas, económicas y ambientales que permiten configurar distintos escenarios, da soporte ampliamente a la búsqueda de soluciones sostenibles y económicamente viables para el aprovechamiento de residuos en la producción de GNR. Esto no solo contribuye a la diversificación de fuentes de energía, sino que también promueve la valorización de residuos y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

Dennehy, C. et al., 2017. Stochastic modelling of the economic viability of on-farm co-digestion of pig manure and food waste in Ireland, *Applied Energy*, 205, pp. 1528–1537.

Edgar Martín-Hernández, Mariano Martín, 2022. Chapter 6 - Anaerobic digestion and nutrient recovery, Editor(s): Mariano Martín, *Sustainable Design for Renewable Processes*, Elsevier, Pages 239-281, ISBN 9780128243244.

Bauer, Fredric & Hulteberg, Christian & Persson, Tobias & Tamm, Daniel, 2013. Biogas upgrading – Review of commercial technologies.

Khan et al., 2021. Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, 2021, 111343, ISSN 1364-0321.

Golmakani et al., 2022. Advances, challenges, and perspectives of biogas cleaning, upgrading, and utilisation, *Fuel*, Volume 317, 2022, 123085, ISSN 0016-2361.

Sun et al., 2015. Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 51, 2015, Pages 521-532, ISSN 1364-0321.

Karne et al., 2022. A review on biogas upgradation systems, *Materials Today: Proceedings*, Volume 72, Part 3, 2023, Pages 775-786, ISSN 2214-7853.

O'Shea, R., Wall, D., Kilgallon, I., & Murphy, J. D., 2016. Assessment of the impact of incentives and of scale on the build order and location of biomethane facilities and the feedstock they utilise. *Applied Energy*, 182, 394–408.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 2013. Engineer Manual: Landfill Gas Collection and Treatment Systems (EM 200-1-22).