

Evaluación del ciclo de vida del proceso de trigeneración por medio de simulación
computacional

Daniel Felipe Rincón Flórez y Sebastian Petro Araque

Trabajo de grado para Optar el Título de Ingeniero Químico

Director

Giovanni Morales Medina

Dr. Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Principalmente a Dios que me permitió culminar esta etapa de mi vida, llena de obstáculos y retos que poco a poco con el tiempo pude superar y aprender de cada uno de ellos.

A mi abuelo, desde el cielo me cuidó y me guio en todas las decisiones que tomé.

A mi padrino que fue la persona que, sin la más mínima obligación, me apoyó durante toda la carrera y con quien seguiré estando agradecido toda la vida.

A mi papá que siempre me estuvo apoyando incluso cuando nadie más lo podía hacer, haciendo hasta lo imposible por que no me faltara nada.

A mi mamá que me mostró que todo en la vida se consigue con mucho esfuerzo, que muchas personas nos podrían lastimar pero que tocaba seguir mirando hacia la meta porque nadie dijo que era fácil, pero con mucha dedicación podría incluso, superar mis propios límites.

A mi hermano que es ese bastión que todos en la vida necesitamos para poder visualizar la vida de otra manera, que cada proceso que llevamos en la vida requiere de mucha constancia y que, si sufre o no, siempre debemos ver las cosas por el lado bueno porque en algún momento todo se tornará como se planifica desde el comienzo.

A toda mi familia que de una manera u otra siempre quisieron, quieren y querrán lo mejor para mí, esto apenas es el comienzo, pero feliz de poder vivirlo con cada uno de ustedes a mi lado.

A el Dr Giovanni Morales por toda la comprensión y paciencia que tuvo durante el proceso.

Gracias totales...

Daniel Felipe Rincón Flórez

Dedicatoria

Quiero empezar agradeciendo a mis padres Horacio y Cecilia por brindarme valores, apoyo, confianza y la oportunidad de tener una educación a pesar de todas las dificultades por las que han padecido.

A mis hermanos Horacio, Elizabeth y Elkin por todas las ayudas y el acompañamiento que he sentido en todas las etapas de mi vida

A mi novia MSc Karen por acompañarme y guiarme durante estos momentos.

A mi director de tesis Dr Giovanni por la colaboración en la elaboración de este proyecto.

Y a todas las demás personas que siempre me han apoyado y han confiado en que puedo lograr las metas que me propongo.

A todos, gracias.

Sebastian Petro Araque

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos.....	13
1.1 Objetivo General.....	13
1.2 Objetivos Específicos.....	13
2. Marco conceptual.....	14
2.1 Análisis del ciclo de vida (LCA)	14
2.1.1 Fases del análisis ciclo de vida	15
2.2 Eco-indicador-99.....	16
2.3 Trigeneración	17
3. Estado del arte.....	19
4. Metodología.....	21
4.1 Fase 1. Validación de la simulación	21
4.1.1 Actividad 1. Ejecución de una simulación.....	21
4.1.2 Actividad 2. Comparación de los valores obtenidos por la simulación con reportes de literatura.	22
4.1.3 Actividad 3. Definición de escenarios operativos.....	22
4.2 Fase 2. Implementación del LCA	22
4.2.1 Actividad 1. Definición de objetivos y alcance.	22
4.2.2 Actividad 2. Análisis de Inventario.	22
4.2.3 Actividad 3. Evaluación de impacto con el Eco-indicador 99.....	23
4.2.4 Actividad 4. Interpretación de resultados.	23

4.3 Fase 3. Comparación de impactos.	23
4.3.1 Actividad 1. Comparación de los impactos ambientales de los escenarios operativos.	23
4.3.2 Actividad 2. Alternativas de disminución del impacto ambiental.	23
5. Resultados.....	24
5.1 Descripción de la simulación.....	24
5.2 Comparación con reportes de literatura.....	29
5.3 Identificación de los escenarios operativos.....	33
5.4 Implementación del LCA.....	43
5.4.1 definición del objetivo y el alcance.....	43
5.4.2 Análisis de los inventarios.....	43
5.4.3 Evaluación de impacto.....	44
5.4.4 Interpretación de resultados.....	45
6. Conclusiones.....	49
7. Recomendaciones.....	50
Referencias bibliográficas.....	52
Apéndices.....	57

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Variables independientes y dependientes de la simulación.....	34
Tabla 2. Rango de las variables independientes de la simulación.....	34
Tabla 3. Valor-P para las variables dependientes.....	35
Tabla 4. Valor de entrada para los escenarios 1 y 2.....	38
Tabla 5. Resumen de entrada y salida de los inventarios para los escenarios 1 y 2.....	44
Tabla 6. Valores de impacto ambiental obtenidos para el escenario operativo 1.....	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Etapas de un análisis de ciclo de vida de ISO 14040 (2007).....	14
Figura 2. Esquema para un sistema de trigeneración general.....	18
Figura 3. Metodología empleada en el cumplimiento de los objetivos	24
Figura 4. Diagrama de flujo de la simulación del proceso de trigeneración en Aspen HYSYS V10.0.....	25
Figura 5. Diagrama de flujo de la primera etapa: Unidad de separación de aire en Aspen HYSYS V10.0.....	27
Figura 6. Diagrama de flujo de la segunda etapa: Separación de Nitrógeno en Aspen Hysys V10.0.....	28
Figura 7. Diagrama de flujo de la tercera etapa: (Unidad generadora de gas (GG) y la unidad de ciclo de gas/vapor HRSG en Aspen Hysys V10.0.....	29
Figura 8. Comparación de valores entre la literatura y simulación del proceso de trigeneración	31
Figura 9. Gráfico de energía total para cada caso posible	37
Figura 10. Comparación de configuración de las variables de entrada de los escenarios operativos 1 y 2.....	39
Figura 11. Comparación del flujo de calor en los escenarios 1 y 2.	40
Figura 12. Comparación de los flujos máxicos de salida en los escenarios operativos 1 y 2.	40
Figura 13.. Producción de energía en el oxicombustor vs el flujo de CO ₂ de reciclo.	41
Figura 14. Impacto ambiental en Pt/kWh en las categorías del EI-99 para el escenario operativo 1, 2, Marques et al. (2021) y Carvalho et al. (2011).	47

Listado de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Tablas ANOVAS multifactorial	57
Apéndice B. Tabla factores de impacto	67
Apéndice C. Figura porcentaje de contribución de los LCI	68
Apéndice D. Tabla valores de impacto para el escenario operativo 2	69
Apéndice E. Figura esquema de un proceso de trigeneración general	70
Apéndice F. Tabla de propiedades de temperatura y composición para T-101 y T-102	71
Apéndice G. Figuras de temperatura y composición para T-101 y T-102	78
Apéndice H. Tabla de información de las corrientes de la simulación	80
Apéndice I. Tabla de comparación de reportes literario y simulación	82
Apéndice J. Calculo para la obtención de los Pt/kWh de los escenarios operativos	83
Apéndice K Trayectoria e impulsores en el desarrollo de la metodología LCA.	84

Resumen

Título: Evaluación del ciclo de vida del proceso de trigeneración por medio de simulación computacional*

Autores: Daniel Felipe Rincón Flórez, Sebastian Petro Araque**

Palabras Clave: Trigeneración, Oxicombustión, Eco-indicador 99, análisis de ciclo de vida (LCA)

Descripción:

Con la llegada de la revolución industrial, el mundo ha conseguido no sólo avances en términos de desarrollo tecnológico y de productos novedosos que impactan positivamente la calidad de vida, sino que también ha generado desechos y productos secundarios no deseados que perjudican el medio ambiente. Actualmente las industrias se interesan en cuantificar el impacto negativo medioambiental que genera su producto en todas las etapas del proceso de manufactura. Una de las herramientas más utilizadas para evaluar este impacto es el análisis de ciclo de vida (LCA), el cual considera todas las variables que intervienen desde la extracción de la materia prima hasta su eliminación o reciclaje.

La demanda de la energía mundial ha venido en aumento con el paso de los años, es por eso que uno de los principales intereses de las industrias es el aprovechamiento al máximo de la energía utilizada para la elaboración de su producto o servicio. En este sentido, nuevas tecnologías están surgiendo para cubrir la alta demanda energética como lo es la trigeneración, la cual aprovecha la refrigeración, calefacción y energía mecánica a partir de una única fuente de calor. Además de ayudar a cubrir la demanda mundial energética, el proceso de trigeneración ayuda a disminuir el impacto negativo medioambiental.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Dr. Ingeniería Química.

Abstract

Title: Life cycle assessment of the trigeneration process by means of computational simulation*

Authors: Daniel Felipe Rincón Flórez, Sebastian Petro Araque**

Key Words: Trigeneration, Oxyfuel, Eco-indicator 99, life cycle assessment (LCA)

Description:

With the arrival of the industrial revolution, the world has achieved not only advances in terms of technological development and innovative products that positively impact the quality of life. However, development has also generated waste and unwanted secondary products that harm the environment. Currently industries are interested in quantifying the environmental negative impact generated by its product at all stages of the process of manufacture. One of the most used tools to evaluate this impact is the analysis of Life cycle (stroke), which considers all the variables involved from the extraction of raw material until its elimination or recycling.

The demand for world energy has been increasing over the years, which is why One of the main interests of industries is the maximum use of energy used for the elaboration of your product or service. In this sense, new technologies are arising to meet high energy demand such as trigeneration, which takes advantage of the cooling, heating and mechanical energy from a single heat source. In addition to help meet world energy demand, the trigeneration process helps to reduce the Environmental negative impact.

* Degree Wor

** Facultad de ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Dr. Ingeniería Química.

Introducción

El cambio climático es una de las mayores amenazas ambientales, sociales y económicas al que se enfrenta el planeta para los distintos sectores de las actividades humanas. A medida que aumenta la conciencia medioambiental, las industrias y las empresas evalúan cómo sus actividades afectan al medio ambiente (Carvalho *et al.*, 2011). El impacto ambiental de los productos y procesos se ha convertido en una cuestión clave, analizados mediante estrategias de prevención a la contaminación y sistemas de gestión medioambiental para mejorar su rendimiento (EPA, 2006).

El análisis del ciclo de vida (LCA) es una herramienta que permite estimar los impactos ambientales acumulados resultantes de todas las etapas del ciclo de vida del producto (Carvalho *et al.*, 2011). Así mismo, el Eco-indicador 99 amplía las consideraciones ambientales en la evaluación de impacto de la herramienta LCA, ya que, incorpora cargas ambientales en diferentes categorías de impacto que permiten la evaluación de los daños a la salud humana, la calidad de los ecosistemas y los recursos (Carvalho *et al.*, 2012).

En un escenario donde se busca satisfacer la demanda global reduciendo los costos asociados a la generación adicional y al impacto ambiental, se ha motivado la búsqueda de nuevas tecnologías y configuraciones. En este sentido, la trigeneración resalta como una opción que contribuye a la mitigación del cambio climático (Kapteijn *et al.*, 2012). En principio, esta tecnología se sustenta en la producción simultánea de servicios energéticos, a partir de un único combustible, utilizando recursos no renovables, renovables o una combinación de estos (Kabalina *et al.*, 2018). Por lo anterior, Kapteijn *et al.* (2012) aplican su proceso patentado, TriGen®, en la obtención de agua, energía térmica, energía eléctrica y CO₂ para el soporte de la producción en pozos petroleros. En la *International Petroleum Exhibition & Conference* en Abu Dhabi, Emiratos

Árabes Unidos, se expuso respecto a la aplicación de TriGen® en los pozos petroleros, que implica un proceso de oxicomustión a altas presiones, que puede utilizar una extensa base de combustibles líquidos, sólidos y gaseosos para la generación de energía eléctrica, energía calórica, agua y CO₂. (Kapteijn *et al.*, 2012). La energía eléctrica puede abastecer lugares y regiones, mientras que el agua se utiliza para el consumo o en procesos de recobro mejorado para las industrias de hidrocarburos. Por otro lado, el CO₂ generado en el sistema TriGen es de una pureza elevada, con lo cual puede ser utilizado en la inyección de gases para el incremento de la producción. Asimismo, este CO₂ puede ser almacenado, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Kapteijn *et al.*, 2012). Con lo anterior, TriGen® se presenta como un proceso de bajo impacto ambiental. Sin embargo, el impacto ambiental considera ítems adicionales a la generación de gases de efecto invernadero, como los incluidos en la afectación a la salud humana y al daño al ecosistema.

A pesar de las demás afectaciones ambientales que puede presentar la trigeneración, no se encontraron reportes dirigidos a la evaluación del impacto ambiental del proceso de trigeneración, TriGen®. Con esto, el presente documento fue dedicado a la evaluación LCA para el análisis de los impactos ambientales que puede presentar un proceso TriGen®. Esta valuación utilizó una simulación previamente codificada del proceso TriGen®, considerando los requerimientos de un campo petrolero colombiano. La pregunta de investigación que dirigió el desarrollo del presente documento fue: ¿cuáles son los impactos ambientales derivados del proceso de trigeneración, TriGen®, según los resultados de una simulación computacional y la aplicación del Eco-indicador 99?

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el ciclo de vida del proceso de trigeneración TriGen® aplicado a la producción de energía en un pozo petrolero colombiano, utilizando resultados de simulación computacional y el Eco-indicador 99.

1.2 Objetivos Específicos

Validar una simulación computacional del proceso de trigeneración TriGen®, por comparación con reportes de literatura, definiendo las entradas y las salidas típicas de su implementación en un campo petrolero.

Evaluar el ciclo de vida del proceso TriGen®, considerando los valores reportados por la simulación y las categorías de impactos ambientales del Eco-indicador 99.

Comparar los impactos resultantes del proceso TriGen® con procesos convencionales de obtención de energía, reportados en literatura.

2. Marco conceptual

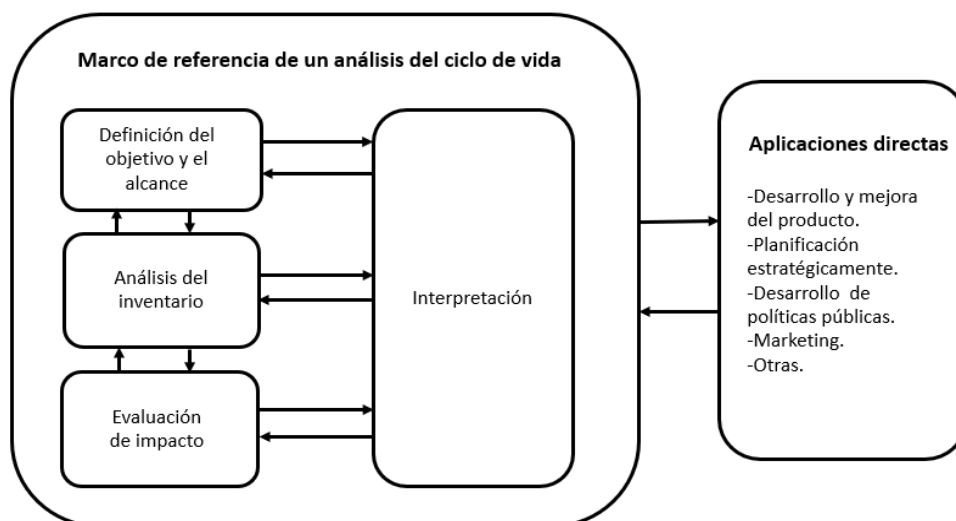
2.1 Análisis del ciclo de vida (LCA)

Esta metodología es comúnmente utilizada para evaluar los impactos de actividades productivas en el medio ambiente, desde la extracción de las materias primas hasta su eliminación y/o reciclaje. El LCA permite establecer las entradas y salidas de materia, y energía de un proceso, producto, servicio, persona y/o organización, a lo largo de su vida útil o dependiendo de la delimitación del objeto de estudio (Aristizábal *et al.*, 2020).

Para la implementación de la metodología LCA, la ISO desarrolló la norma ISO 14040:2006, la cual estandariza las etapas para la regulación de la metodología de evaluación ambiental bajo los siguientes estándares, como se muestra en la figura 1. (ISO 14040, 2007).

Figura 1.

Etapas de un análisis de ciclo de vida de ISO 14040 (2007)



2.1.1 Fases del análisis ciclo de vida

De acuerdo con la normativa ISO 14040:2006, las evaluaciones LCA se dividen en cuatro fases: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario, evaluación de impacto e interpretación.

1. Definición de objetivos y alcance: Descripción de aplicación y tipo de LCA y definición de sistemas de productos, alcance geográfico y temporal, indicándose qué se incluye dentro del estudio y qué queda fuera del mismo. Definición de la unidad funcional, que servirá de referencia en las siguientes fases. Definición de la unidad funcional, que servirá de referencia en las siguientes fases.

2. Análisis de inventario: Determinación de liberaciones ambientales para los sistemas de producto y la unidad funcional. Consiste en dejar claro datos relevantes como el tipo de emisiones, extracción de recursos necesarios y el uso del suelo donde se va a realizar el proceso.

3. Evaluación de impacto: Se establecen los impactos ambientales causados por las emisiones ambientales analizadas. Existen tres categorías de daños para el Eco-indicador 99: para la salud humana, calidad del ecosistema y los recursos naturales.

4. Interpretación: En esta etapa, se discuten los resultados de los pasos anteriores, se extraen conclusiones y se hacen recomendaciones (Nieuwlaar, 2004). Asimismo, en esta etapa se valora la importancia de los diversos daños para obtener un único número que será el eco-indicador. A la hora de comparar productos o procesos mediante eco-indicadores hay ciertos aspectos que conviene tener en cuenta: Determinar qué fases del proceso son las que más afectan al resultado final del eco-indicador; determinar la similitud existente entre dichos procesos (Nieuwlaar, 2004).

2.2 Eco-indicador-99

Los llamados eco-indicadores son ecuaciones que se utilizan para hacer diferentes análisis al momento de evaluar el ciclo de vida de un proceso, especialmente, destinado al diseño de productos (Goedkoop *et al.*, 1999). La ecuación considera tres categorías de daño, relacionadas directamente con el resultado del inventario.

- Salud humana: El daño en esta categoría influye en la cantidad y la duración de enfermedades y las vidas perdidas debido a causas en sus ítems, como lo son el cambio climático, disminución de la capa de ozono, efectos carcinogénicos, efectos respiratorios y radiación ionizante (IHOBE, 2000).

- Calidad del ecosistema: El daño en esta categoría influye en daños al medio ambiente, así como sobre la diversidad de especies. Sus ítems son ecotoxicidad, acidificación y eutroficación y el uso del suelo.

- Recursos naturales: Para esta categoría se influye el daño en las futuras generaciones, debido a la extracción de recursos de fácil acceso, esto implica que con el paso del tiempo cada vez serán más difícil acceder a estos recursos. Sus ítems son combustibles fósiles y extracción minera (Rodríguez *et al.*, 2000).

Las ecuaciones que consideran el impacto en las distintas categorías de daño mediante el consumo de servicios industriales y las poluciones del proceso son (Berbesi, 2021):

$$EI = \left(\sum_u DAM_u \right) t \quad (\text{Ec. 1})$$

De donde EI corresponde al daño o impacto ambiental total del proceso evaluado expresado en unidades de ecopuntos por año (Pt/año). Para Frischknecht *et al.* (2007) un Pt es equivalente a

la milésima parte de la carga ambiental anual emitida por un habitante promedio en Europa. Igualmente, DAM son los daños hacia las categorías del ecosistema, la salud humana y los recursos naturales. El t equivale a las horas de operación anuales (h/año). (Berbesi, 2021)

$$DAM_u = \sum_j IMP_{j,u} \quad (\text{Ec. 2})$$

El parámetro IMP hace referencia al impacto en cada una de las categorías y se expresan en unidades de ecopuntos por hora (Pt/h). (Berbesi, 2021)

$$IMP_{j,u} = \sum_i m_u LCI_{i,u} \quad (\text{Ec. 3})$$

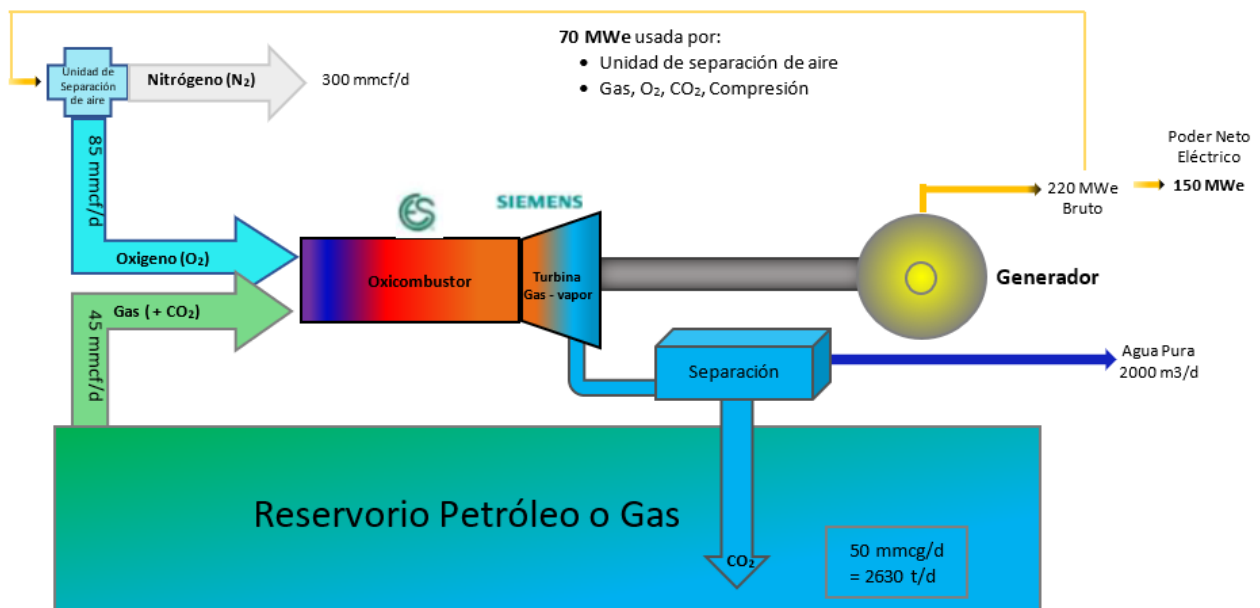
El parámetro m hace referencia a los consumos por parte de los servicios industriales o producción de polución y se expresan en kg/h o kW-h/h. Para el parámetro LCI hace referencia al factor según la base de datos arrojado por el Eco-indicador 99 (Berbesi, 2021).

2.3 Trigeneración

La trigeneración es la producción simultánea de energía mecánica o electricidad, de calor y de refrigeración a partir de una sola fuente de calor, como un combustible fósil o la energía solar térmica. (Carvalho *et al.*, 2011). Para Kavvadias *et al.* (2010) cuando se combinan los sistemas de refrigeración, calefacción y energía, también se conoce como el proceso de trigeneración. El proceso de trigeneración está integrada de cinco grandes secciones; una unidad de separación de aire (ASU), una cámara de oxicomustión, una turbina, un generador y un separador de CO₂ y agua como se muestra en la figura 2.

Figura 2.

Esquema para un sistema de trigeneración general



El CO₂ que se genera en el proceso de TriGen® es de alta pureza y por tal razón se requiere de una tecnología para la captura y el almacenamiento de carbono con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ en la industria (Kapteijn *et al.*, 2011). Dentro del desarrollo de estas tecnologías, la oxidación se considera como un método eficiente para la retención y el almacenamiento de emisiones de CO₂ en las centrales eléctricas de carbón (Gopan *et al.*, 2015). El efluente de la oxidación es una salida de gases con una concentración muy alta de dióxido de carbono, de forma que su separación resulta sencilla (condensación del agua) (Chem & Yang, 2021). Posteriormente, tras la separación del agua, la corriente de CO₂ se comprime y se purifica en la Unidad de Compresión y Purificación (CPU) antes de su almacenamiento o uso (Portillo *et al.*, 2015).

3. Estado del arte

La evaluación del ciclo de vida (LCA) se ha impuesto en la investigación, la industria y la política desde sus orígenes en el análisis de la energía en la década de los años sesenta y setenta, siendo una herramienta para explorar el impacto potencial de una serie de parámetros medioambientales. Su uso ha aumentado rápidamente desde su concepción, y en su transformación hasta la actualidad, el LCA ha pasado por tres etapas de desarrollo y adopción, como se muestra en el apéndice K, caracterizadas por los impulsores de la adopción (McManus & Taylor, 2015).

En los años sesenta, Harry Teasley y la empresa Coca-Cola Co, crearon el primer estudio de la metodología LCA (Duda & Shaw, 1996). Interesados en evaluar procesos de producción y abastecimiento e implementar estrategias de reciclaje, encontraron que las botellas de plástico utilizan menos recursos de hidrocarburos que las de vidrio, siendo este un resultado inesperado que le dio a la empresa la confianza para seguir adelante con el desarrollo de las actuales botellas de plástico de uso generalizado (Saleh, 2016). Luego, en la década de los setenta durante la crisis del petróleo continuaron los estudios de energía, sobre la recogida y elaboración de inventarios de cargas ambientales para analizar así los consumos energéticos industriales desde el punto de vista ambiental, calculando el gasto energético y reducción de los residuos sólidos (Ruiz, 2007). Sobre la década de los noventa, los problemas medioambientales globales se expandieron, la disminución de la capa de ozono y el cambio climático (Mazur & Lee, 1993), surgiendo el código de prácticas para LCA de la Sociedad de Toxicología Ambiental y Química (SETAC) (SETAC, 1993).

En los años dos mil diferentes programas se unieron y lanzaron una asociación internacional sobre el ciclo de vida, conocida como la Iniciativa del Ciclo de Vida con el objetivo

de la puesta en práctica del concepto de ciclo de vida y la mejora de las herramientas de apoyo mediante mejores datos e indicadores, igualmente este concepto cobraba importancia en la política europea (UNEP, 2022). El incesante desarrollo de esta temática, por ejemplo, continuó estableciendo varias normas sobre la huella de carbono basadas en el ciclo de vida (ACLCA, 2022). Aun así, la falta de estandarización por parte de la ISO y el desacuerdo en su interpretación, ha desarrollado enfoques divergentes con respecto a los límites del sistema y los métodos de asignación (Finnveden *et al.*, 2009).

En un esfuerzo continuo de las industrias por un manejo energético eficaz, diferentes investigadores durante la última década han desarrollado estudios que involucran la evaluación del ciclo de vida en sistemas de trigeneración. Tal es el caso de las investigaciones realizadas por Marques *et al.* (2021), donde se analizó el ciclo de vida de un sistema de micro trigeneración alimentado con gas natural, contribuyendo a mejorar la comprensión de que procesos aportar más a la destrucción de exergía y en el impacto ambiental generado.

Estudios realizados por Carvalho *et al.* (2012) consideró la evaluación de las cargas ambientales asociada a la producción de equipos y uso de recursos al optimizar el sistema de suministro de energía, teniendo en cuenta las emisiones de CO₂, el precio de los recursos energéticos y de equipos. La configuración óptima se logró variando las fuentes de electricidad entre gas natural/electricidad de países alternativos, encontrando que las emisiones de gas natural podrían tener mayor influencia al decidir la configuración óptima en un sistema que minimice la carga ambiental. En este mismo sentido de investigación, autores como Martins *et al.* (2012) desarrollaron estudios de simulación donde se evaluó el desempeño termodinámico de un sistema de trigeneración a partir del análisis de diversas variables operativas identificando que las más importantes para la eficiencia del ciclo del proceso en estudio, eran la relación de compresión en

el compresor y la relación de expansión en la turbina. Siendo el objetivo una vez más el de mejorar los rendimientos en los sistemas energéticos con soluciones más económicas y ecológicas.

El impacto de sistemas energéticos eficientes también es evaluado por autores donde se analizan diferentes estrategias operativas. Ebrahimi & Ziabasharhagh. (2017) realizaron estudios donde integraron la unidad de separación de aire con el objetivo de mejorar el rendimiento del ciclo viéndose reflejado en la reducción del costo capital con un impacto positivo en el período de retorno del sistema en mayores precios de energía eléctrica y también en menores precios de oxígeno en el mercado.

4. Metodología

La metodología de este trabajo se divide en 3 fases, tal como se muestra en la figura 3.

4.1 Fase 1. Validación de la simulación

4.1.1 Actividad 1. Ejecución de una simulación.

La simulación fue ejecutada con los datos de operación y producción establecidos en un campo petrolero colombiano.

4.1.2 Actividad 2. Comparación de los valores obtenidos por la simulación con reportes de literatura.

4.1.3 Actividad 3. Definición de escenarios operativos.

La simulación fue evaluada con diferentes valores mínimos y máximos para las variables de entrada. La herramienta *Case Study* de Aspen Hysys V10.0 fue aplicada en esta evaluación. Los escenarios fueron definidos considerando el aporte del flujo de calor total del proceso.

4.2 Fase 2. Implementación del LCA

4.2.1 Actividad 1. Definición de objetivos y alcance.

El objetivo de este estudio es evaluar el proceso de trigeneración en función del sistema de producción de energía a partir de un gas.

4.2.2 Actividad 2. Análisis de Inventario.

Los inventarios fueron definidos de los servicios industriales y la generación de CO₂ reportada en cada escenario operativo identificado.

4.2.3 Actividad 3. Evaluación de impacto con el Eco-indicador 99.

Los impactos ambientales, según el Eco-indicador 99, fueron calculados para cada escenario operativo, considerando sus respectivos inventarios.

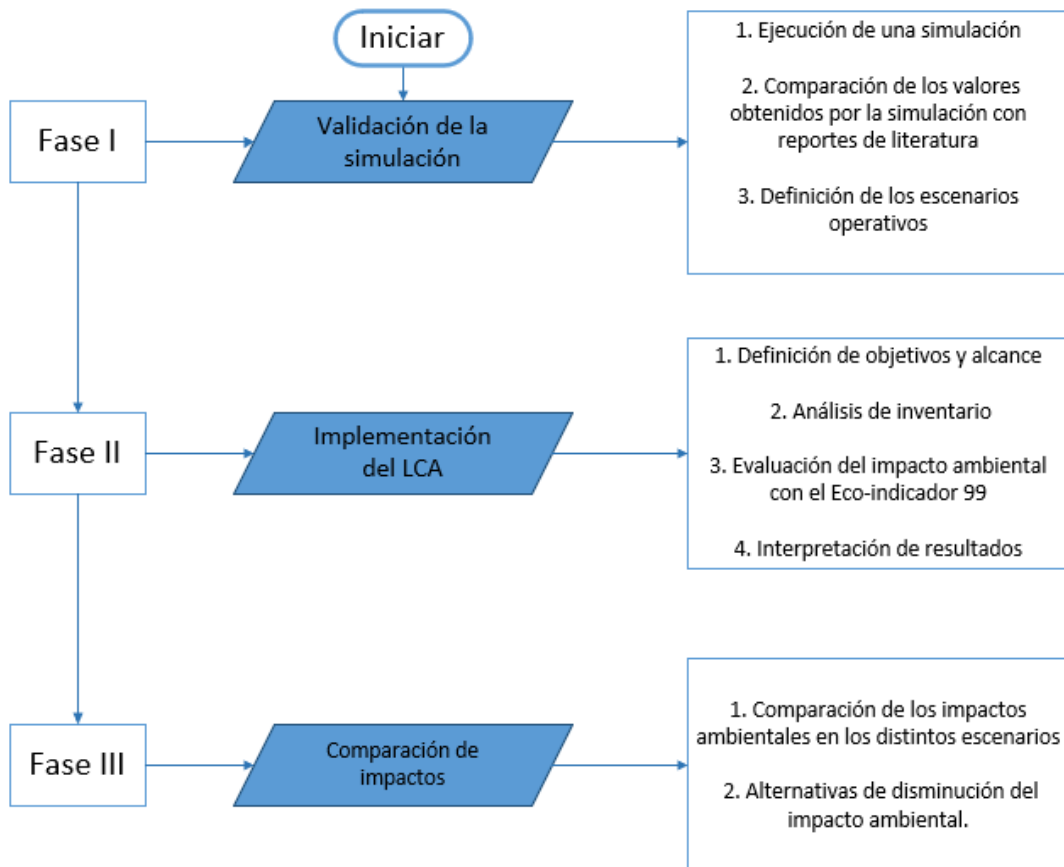
4.2.4 Actividad 4. Interpretación de resultados.

Análisis de los impactos ambientales causados por el proceso, en cada escenario operativo.

4.3 Fase 3. Comparación de impactos.***4.3.1 Actividad 1. Comparación de los impactos ambientales de los escenarios operativos.******4.3.2 Actividad 2. Alternativas de disminución del impacto ambiental.***

Figura 3.

Metodología empleada en el cumplimiento de los objetivos



5. Resultados

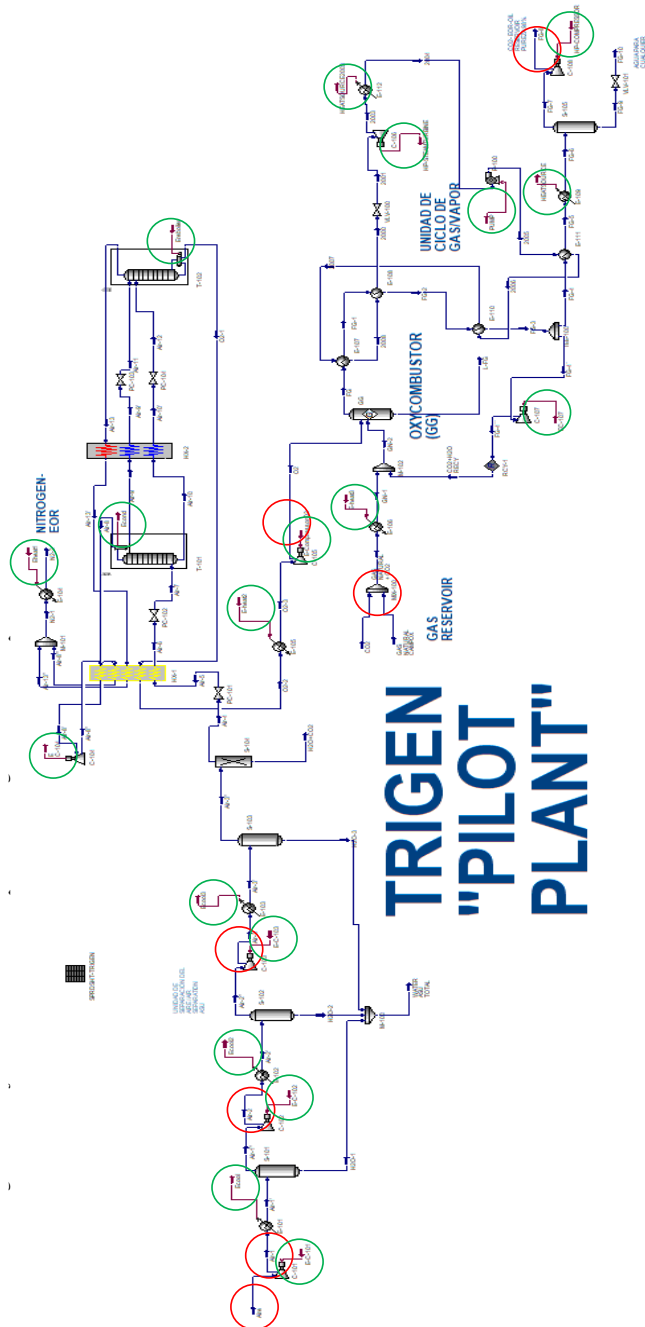
5.1 Descripción de la simulación

Linares y Rojas (2022) desarrollaron una simulación de la unidad TriGen® (ver figura 4) para el análisis del suministro de energía a un pozo petrolero colombiano. La simulación fue

desarrollada en la herramienta ASPEN HYSYS V8.8.; los datos de flujos de gas asociado y su composición fueron suministrados por Ecopetrol S.A.

Figura 4.

Diagrama de flujo de la simulación del proceso de trigeneración en Aspen HYSYS V10.0.



En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo para el proceso de trigeneración en Aspen Hysys, el cual consta de tres etapas principales; la primera etapa tiene como fin ajustar de que el aire cumpla con las características necesarias para el proceso de separación; la segunda etapa consiste en el retiro del Nitrógeno presente en la corriente de aire que viene de proceso anterior. La tercera etapa considera la aplicación de la oxicomustión, por lo cual es la etapa central del proceso.

La simulación codificada considera la alimentación de 0,4 kg/s de gas natural con una composición de CH₄ de 0,5294, un flujo de aire de 7,050 kg/s, produciendo 0,7222 kg/s de H₂O, de energía térmica, 4,1979 kg/s de CO₂ y 6,3 MW de electricidad (Linares & Rojas). A continuación, las etapas consideradas en la simulación son descritas de manera sucinta.

Primera etapa (Unidad de separación del aire).

En esta etapa el aire a condiciones normales ingresa a un compresor para posteriormente entrar a una serie de separadores de humedad. En la última corriente se hace uso de un separador para retirar todas las impurezas (H₂O y CO₂) presentes en la corriente para que se pueda realizar la segunda etapa con la mayor eficiencia posible. El diagrama de flujo para la ASU se presenta en la figura 5 y las variables operacionales se observan en el apéndice H.

-Segunda Etapa (Separación del Nitrógeno)

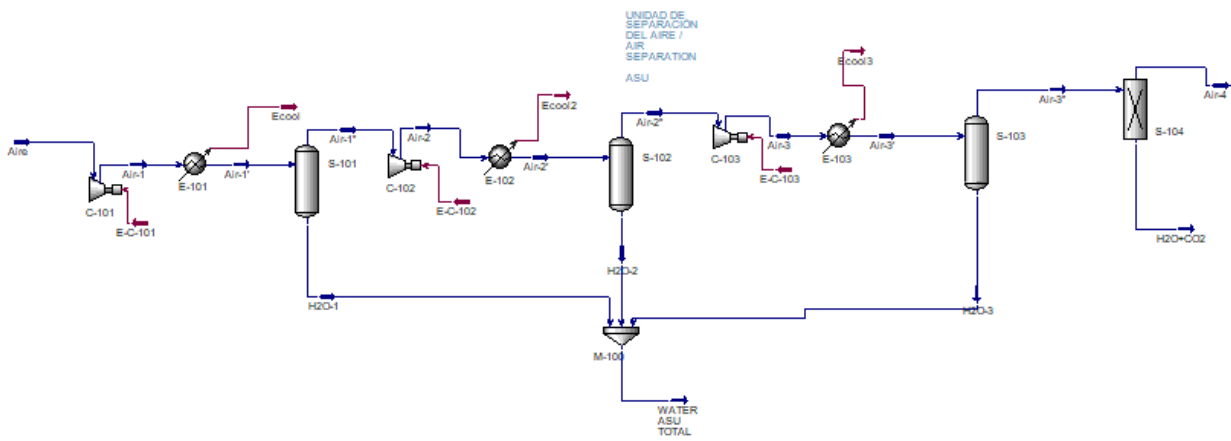
La continuación de la etapa anterior se centra en retirar todo el nitrógeno presente en el aire que proviene de la ASU y que entra a participar en el proceso. En esta etapa solo participan tres componentes que son Nitrógeno, Oxígeno y Argón.

Esta corriente (Air-5) entra a un primer intercambiador de calor (HX-1) que primero disminuye la temperatura de la corriente para pasar por una columna de destilación (T-101), esta columna es la encargada de separar Nitrógeno al máximo de pureza y que se recircula al primer

intercambiador, desde este retiran tres corrientes; la primera es líquida (Air-10), que es completamente líquido, la segunda (Air-9) es parcialmente líquido y la tercera (Air-8) si es totalmente vapor y tiene una mayor concentración de Nitrógeno.

Figura 5.

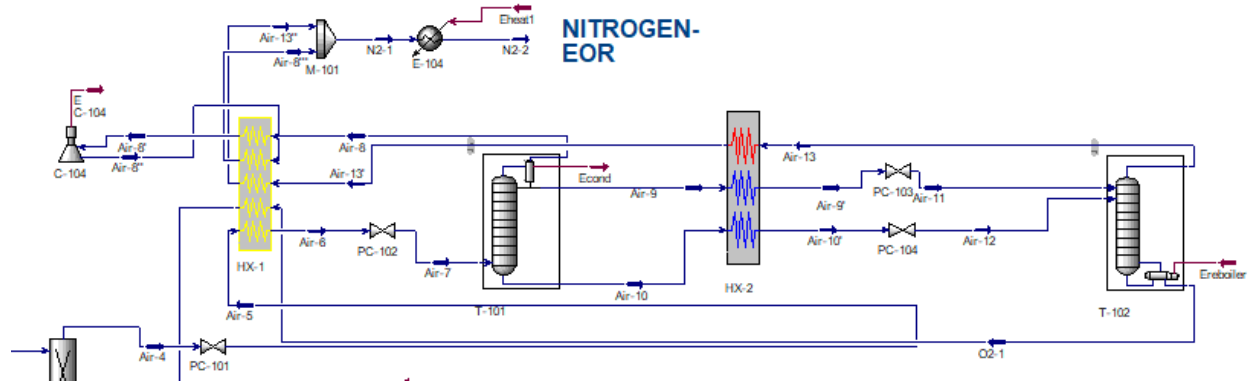
Diagrama de flujo de la primera etapa: Unidad de separación de aire en Aspen HYSYS V10.0



La corriente (Air-10) y (Air-9) se someten a un intercambiador de calor (HX-2) donde la temperatura disminuye para llegar a una nueva torre de destilación (T-102) donde se produce Oxígeno con alta pureza y el Nitrógeno se reutilizar para el enfriamiento es los intercambiadores de calor (HX-1 Y HX-2). Continuando con la separación del Nitrógeno, las corrientes (Air-13 y Air-8) que son corrientes en fase vapor y con alta presencia de Nitrógeno pasan a un intercambiador de calor que aumenta la temperatura de ambas corrientes para que puedan ser mezcladas y ventiladas a la atmosfera en condiciones óptimas para ser utilizar en otros procesos. El diagrama de flujo para esta sección se presenta en la figura 6 y las variables operacionales se observan en el apéndice H.

Figura 6.

Diagrama de flujo de la segunda etapa: Separación de Nitrógeno en Aspen Hysys V10.0



-Tercera Etapa (Unidad generadora de gas (GG) y la unidad de ciclo de gas/vapor HRSG)

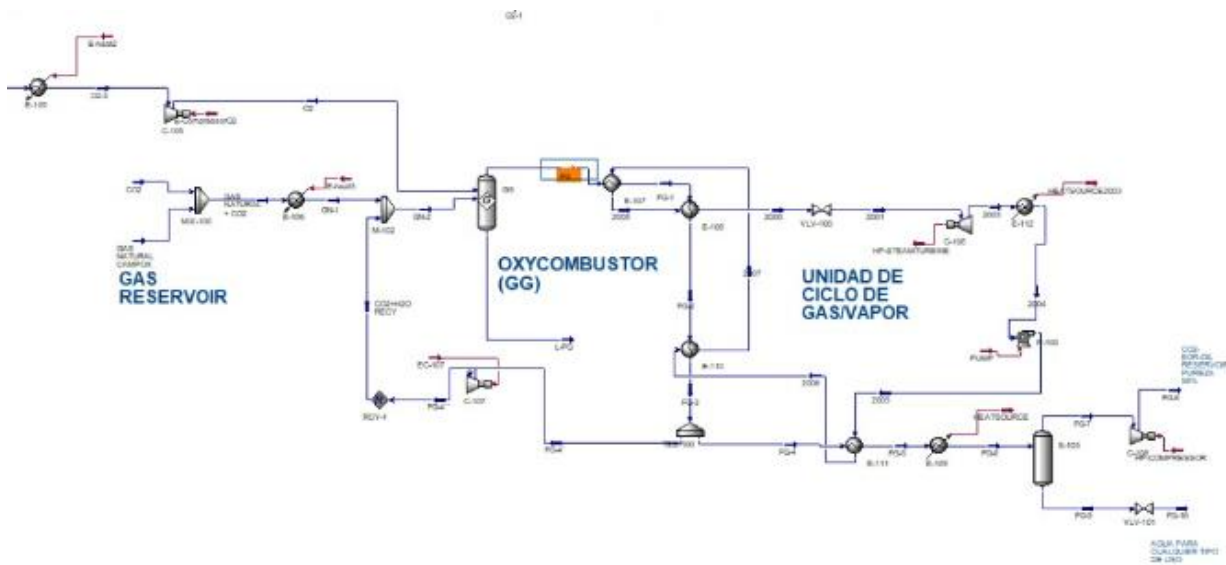
En esta última etapa del proceso es donde se utiliza el Oxígeno y el Argón proveniente de la etapa de separación del Nitrógeno y pasa a interactuar con el gas natural y el dióxido de Carbono recirculado de la salida de esta misma etapa con el fin de comprobar la factibilidad del análisis de vida en un proceso de trigeneración por oxicombustión. La corriente que contiene en su mayoría Oxígeno y un poco de Argón (O2-2). Por otro lado, también entra a un mezclador (MIX-100) 3,3 kg/s CO₂ que es recirculado de la corriente de salida (FG-8) y gas natural donde al final solo aumenta la cantidad de flujo que va a entrar a un calentador (E-106) y posteriormente a un nuevo mezclador (M-102).

Para la oxicombustión se utiliza un reactor de Gibbs, el cual determina las composiciones de corriente de salida (FG y L-FG), por medio de una reacción de combustión completa. Los productos generados, CO₂ y agua, son enviados a una serie de intercambiadores de temperatura con el fin de disminuir la temperatura del flujo de gases desde 1125°C hasta 30°C; con esto, se

efectúa la separación de Agua final (FG-10). Es importante aclarar que de todo el flujo de gas que sale del (FG-8) se recircula nuevamente al mezclador (M-102) para realizar nuevamente el proceso en la unidad ciclo de gas/vapor. El diagrama de flujo para esta sección se presenta en la figura 7 y las variables operacionales se observan en el apéndice H.

Figura 7.

Diagrama de flujo de la tercera etapa: (Unidad generadora de gas (GG) y la unidad de ciclo de gas/vapor HRSG en Aspen Hysys V10.0



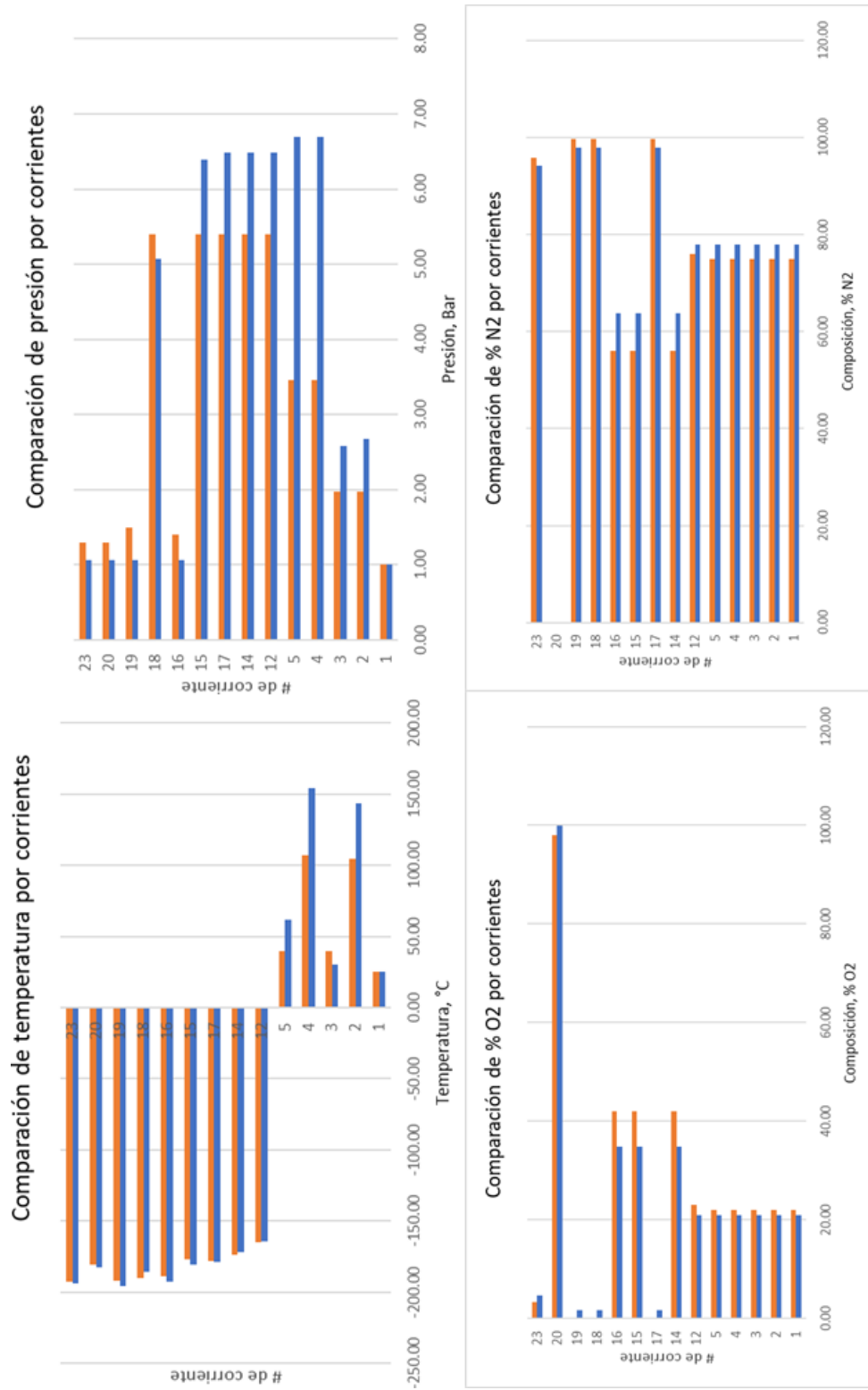
5.2 Comparación con reportes de literatura

El desarrollo de la simulación realizada en el presente estudio fue realizado con los trabajos de Ebrahimi & Ziabasharhagh. (2017) y Martins *et al.* (2012). La validación de la unidad ASU fue realizada por comparación con el trabajo de Ebrahimi & Ziabasharhagh. (2017) los cuales diseñaron y optimizaron una unidad criogénica de separación de aire. Los valores del flujo másico,

temperatura, presión, composición molar del oxígeno y del nitrógeno de las corrientes son comparadas en el apéndice I. La Figura 8 presenta una comparación de manera gráfica entre los resultados de Ebrahimi & Ziabasharhagh. (2017) y los del presente documento para las temperaturas las presiones y las composiciones; en esta figura los ejes verticales hacen referencia al número de la corriente comparada y los ejes horizontales al parámetro que se compara.

Figura 8.

Comparación de valores entre la literatura y simulación del proceso de trigeneración



Según la Figura 8, las tendencias en temperatura, presión y composición reportadas por la simulación, utilizada en el presente documento, exhiben un comportamiento similar al reportado por Ebrahimi & Ziabasharhagh. (2017); como es el caso de la salida por fondos de la T-101 (número de corriente 14 para el reporte literario), en donde las temperaturas confrontadas tienen una diferencia de 3,6 °C, la diferencia de las presiones es de 0,99 bar y la diferencia de la composición molar del O₂ y N₂ corresponde a 7,23% y 7,84% respectivamente.

Para las propiedades del flujo másico, la diferencia entre los dos estudios obedece a la capacidad de producción de la planta. Ebrahimi *et al.* (2015) utiliza una capacidad de tratamiento de la destilación criogénica del aire con valores mayores a 30 kg/s de O₂ y total de aire a tratar de 100 kg/s, valor superior al total de aire definido en la simulación del presente documento que es de 5,98 kg/s.

Respecto al oxicombustor, el trabajo de Martins *et al.* (2012) fue utilizado en la comparación de variables de flujo másico, temperatura y presión. La corriente de salida del oxicombustor de Martins *et al.* (2012) presenta una temperatura de 1124 °C, una presión de 9,02 bar y un flujo másico de 462,5 kg/s. Estos datos muestran concordancia con los valores registrados a la salida del oxicombustor en la simulación utilizada en el presente trabajo; la temperatura de la simulación es de 1125 °C, una presión de 24 bar y 13,87 kg/s de flujo másico. La mayor presión en la simulación, del presente documento, se debe a las condiciones de entrada del gas natural, mientras que el menor flujo se debe a capacidad de producción de la planta.

5.3 Identificación de los escenarios operativos

La simulación descrita anteriormente fue utilizada en la identificación de escenarios de operación representativos de la unidad TriGen®. Los escenarios fueron definidos, a partir de un análisis con la herramienta *Case Study* en el software Aspen Hysys V10.0; en el *Case Study*, un diseño factorial con ocho variables de entrada (temperatura, flujos y presiones de las corrientes) fue definido, reportando un total de 13122 simulaciones.

Las variables de entrada son ilustradas con círculo rojo en la figura 4 y descritas en la Tabla 1; siete de estas ocho variables independientes tomaron tres puntos equidistantes dentro del rango seleccionado y para la octava variable, flujo de CO₂ que entra al M-100, seis valores equidistantes fueron definidos dentro del rango de operación. Los rangos de los factores fueron establecidos a prueba y error, buscando convergencia en los valores extremos definidos. El resumen de los rangos de entrada se presenta en la Tabla 2.

Como variables de respuesta en el *Case Study*, un total de diecinueve flujos de energía (intercambiadores de calor, compresores, bombas y columnas de destilación) fueron establecidos para los respectivos valores de salida. Estos flujos de energía están ilustrados en la figura 4 con círculos de color verde y son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1.*Variables independientes y dependientes de la simulación.*

Variable independiente	Unidad	Variable dependiente	Unidad
Temperatura entrada C-101	°C	Flujo de calor E-101, E-102, E-103, E-104-105, E-106, E-109 y E-112	kW
Presión salida C-101, C-102, C-103, C-105 y C-108	kmol/h	Flujo de calor C-101, C-102, C-103, C-104, C-105, C-106, C-107 y C-108	kW
Flujo C02 entrada mix-100	kg/s	Flujo de calor T-101 y T-102	kW
Flujo entrada C-101	bar	Flujo de calor P-100	kW

Tabla 2.*Rango de las variables independientes de la simulación*

Nombre Variable	Valor de simulación	Limite Inferior	Limite superior	Unidad
Temperatura entrada C101	25	20	30	°C
Flujo entrada C101	747,1	709,745	896,52	kmol/h
Flujo C02 entrada mix100	3,3	3,21	3,36	kg/s
Presión salida C101	1,98	1,584	2,376	bar
Presión salida C102	3,46	2,768	4,152	bar
Presión salida C103	5,6	4,48	6,72	bar
Presión salida C105	25	20	30	bar
Presión salida C108	96	76,8	115,2	bar

El tratamiento de datos con el análisis de la varianza del *Case Study* fue aplicado con el software Statgraphics; un anova multifactorial fue aplicado para determinar relaciones entre las variables de respuesta y los factores definidos (ver apéndice A). Los resultados de este análisis de varianza son presentados en el apéndice A y el resumen de los valores-P para las variables de respuesta se muestra en la Tabla 3. Según esta Tabla, la significancia estadística está relacionada con la ubicación dentro del proceso. Para el caso de la presión a la salida del C-108, se muestra

que su comportamiento únicamente se relaciona con el flujo de calor C-108 (dato en color rojo), dado que la ubicación de esta variable de entrada se encuentra en una corriente de producto. En cambio, el valor de la presión a la salida del C-101 afecta más allá de las corrientes cercanas al compresor C-101, entre las cuales se encontraron las variables de flujo de calor para el E-101, E-102, C-101, C-102, C-104, E-104, E-105, T-101 y T-102.

Asimismo, del anova se infiere que las variables independientes flujo de entrada al C-101 y flujo de entrada de CO₂ al MIX-100 tiene relación estadística con otras variables dependientes e incluye a diecisiete y once variables de respuesta, respectivamente. Por lo anterior, estas dos variables son las más influyentes en los desempeños de la simulación del proceso de trigeneración.

Tabla 3.

Valor-P para las variables dependientes

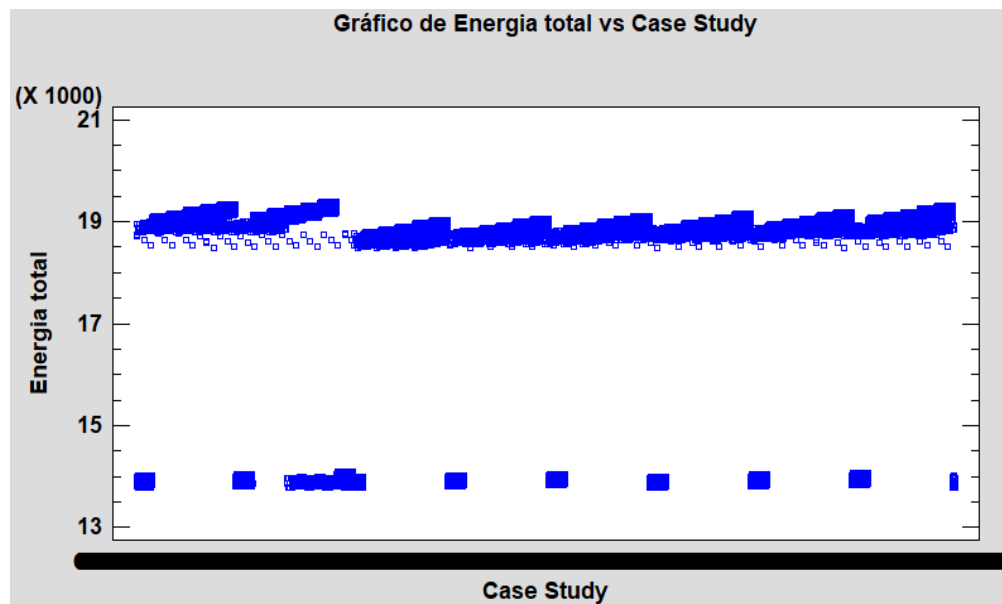
Nombre Variable/ valores-P	Temperatura entrada C101	Flujo entrada C101	Flujo CO2 entrada mix100	Presión salida C101	Presión salida C102	Presión salida C103	Presión salida C105	Presión salida C108
Flujo de calor E-101	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor E-102	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor E-103	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-101	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-102	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-103	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-104	0.0493	0.0000	0.0102	0.0493	0.0493	0.0493	1.0000	1.0000
Flujo de calor T-101	0.0491	0.0000	0.0101	0.0491	0.0491	0.0491	1.0000	1.0000
Flujo de calor E-104	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor T-102	0.3688	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1158	1.0000	1.0000
Flujo de calor E-105	0.0493	0.0000	0.0102	0.0493	0.0493	0.0493	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-105	0.7142	0.0000	0.8910	0.7142	0.7142	0.7142	0.0000	1.0000
Flujo de calor E-106	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-106	0.9999	0.0000	0.0000	0.9998	0.9998	0.9930	0.0000	1.0000
Flujo de calor C-107	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Flujo de calor C-108	0.9953	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9999	0.0000
Flujo de calor E-109	0.7742	0.0000	0.0000	0.9997	0.9997	0.9997	1.0000	1.0000
Flujo de calor E-112	1.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	1.0000

Los resultados del *Case Study* condujeron a definir dos escenarios operativos para la trigeneración. El escenario operativo 1 fue tomado como la configuración en donde la simulación reporta la menor energía generada en el proceso (producción menos consumos), mientras que el escenario operativo 2, fue definido en la condición de generación de máxima de energía (producción menos consumos). La producción de energía total fue dividido en tres: la unidad de separación del aire (ASU), la cual es la sección en donde se comprime el aire y se lleva a las condiciones deseadas; la sección de destilación criogénica, en donde se separa el nitrógeno de las demás corrientes y finalmente la unidad generadora de gas (GG) y la unidad de ciclo de gas/vapor HRSG en donde se produce la mayor cantidad de flujo másico de agua y dióxido de carbono, además de los mayores flujos de calor.

En la ASU, la energía total para la sección de separación del aire fue determinada como la suma de los flujos de calor generados por E-101, E-102 y E-103, menos el total de las sumas de los flujos de calor consumidos por C-101, C-102 y C-103. De igual manera, para la sección de destilación criogénica, la energía total fue calculada por la suma de los calores generados por C-104 y T-101, menos la resta de los flujos de energía en E-104 y T-102. Por último, en la unidad generadora de gas (GG) y la unidad de ciclo de gas/vapor HRSG las energías generadas fueron determinadas por los equipos E-105, E-106, C-105, C-107, C-108, P-100, E-109, E-112 y C-106. La suma del flujo total de calor de las tres sesiones anteriores totaliza la energía que genera o consume el proceso de trigeneración. La figura 9 presenta un gráfico derivado del programa Statgraphics para el flujo total de calor de las 13122 simulaciones del *Case Study*.

Figura 9.

Gráfico de energía total para cada caso posible



La figura 9 muestra una clara separación de los resultados del *Case Study* en los dos escenarios; La primera sección en donde el valor de la energía total se encuentra alrededor de 19000 kW y el segundo sector cuya energía total se encuentra alrededor de 14000 kW. Esta figura soporta la identificación de los dos escenarios operativos en la trigeneración. Considerando todos los posibles escenarios del *Case Study*, los valores de mínima energía y de máxima energía correspondieron a 13773,4 kW y 19382,76 kW.

La Tabla 4 presenta el valor de los parámetros de entrada para cada uno de los escenarios, siendo el escenario operativo 1 la configuración adecuada para el flujo de calor total mínimo del *Case Study*; en cambio, el escenario 2 es definido por variables conducentes al flujo de calor total máximo del proceso de trigeneración. El escenario operativo 1 resultó caracterizado por valores mínimos en los parámetros de temperatura y flujo de entrada al C-101, presión de salida del C-103 y C-105, y por valores máximos en: los parámetros de flujo de entrada de CO₂ al MIX-100, presión

de salida del C-102 y C-108. El escenario operativo 2 resultó caracterizado por los valores mínimos en: la presión de salida del C-102, C-105 y C-108, y por los valores máximos en los parámetros de: temperatura y flujo de entrada al C-101 y la presión de salida del C-101 y C-103.

Tabla 4.

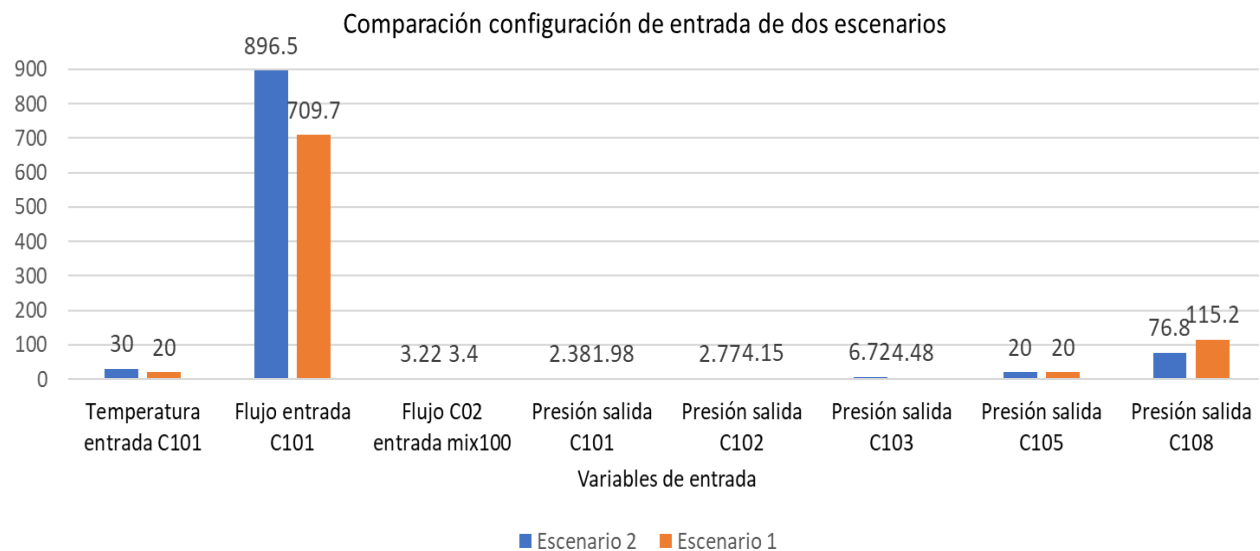
Valor de entrada para los escenarios 1 y 2

Parametro	Escenario 1	Escenario 2	Unidad
Temperatura entrada C101	20	30	°C
Flujo entrada C101	709.7	896.5	kmol/h
Flujo C02 entrada mix100	3.4	3.22	kg/s
Presión salida C101	1.98	2.376	bar
Presión salida C102	4.152	2.768	bar
Presión salida C103	4.48	6.72	bar
Presión salida C105	20	20	bar
Presión salida C108	115.2	76.8	bar

Según la Tabla 4, es posible mencionar que tanto la temperatura y el flujo de entrada al C-101 y la presión de salida del C-103 influyen de manera directa con la generación del flujo de calor total durante el proceso. La figura 10 presenta la comparación de la configuración de las variables de entrada para los dos escenarios operativos.

Figura 10.

Comparación de configuración de las variables de entrada de los escenarios operativos 1 y 2.



Las figuras 11 y 12 resumen para cada escenario operativo los flujos de calor total y por secciones y los flujos másicos respectivamente. Los flujos de calor producidos por las secciones de la unidad de separación del aire, unidad de separación del nitrógeno y la unidad generadora de gas (GG) con la unidad de ciclo de gas/vapor HRSG se presenta en la figura 11. Según esta figura, el flujo de calor total del proceso para cada escenario operativo muestra que las unidades de separación del aire y del nitrógeno presentan una generación de flujo de calor mínima, mientras que el oxicom bustor es el encargado de la producción de energía del proceso. Paralelamente, la figura 12 representa los flujos másicos totales de salida de N₂, CO₂ y H₂O para los escenarios operativos 1 y 2. El primer escenario operativo presenta los menores valores para los flujos de salida totales de masa, lo cual se suponía ya que el valor de entrada de aire al C-101 se encuentra en el rango mínimo.

Figura 11.

Comparación del flujo de calor en los escenarios 1 y 2.

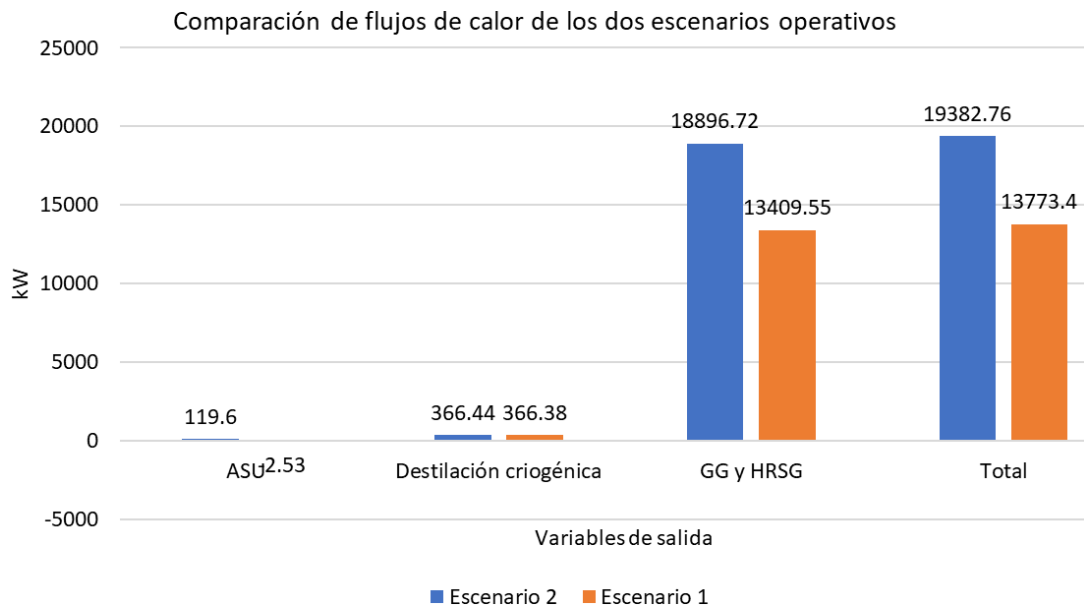
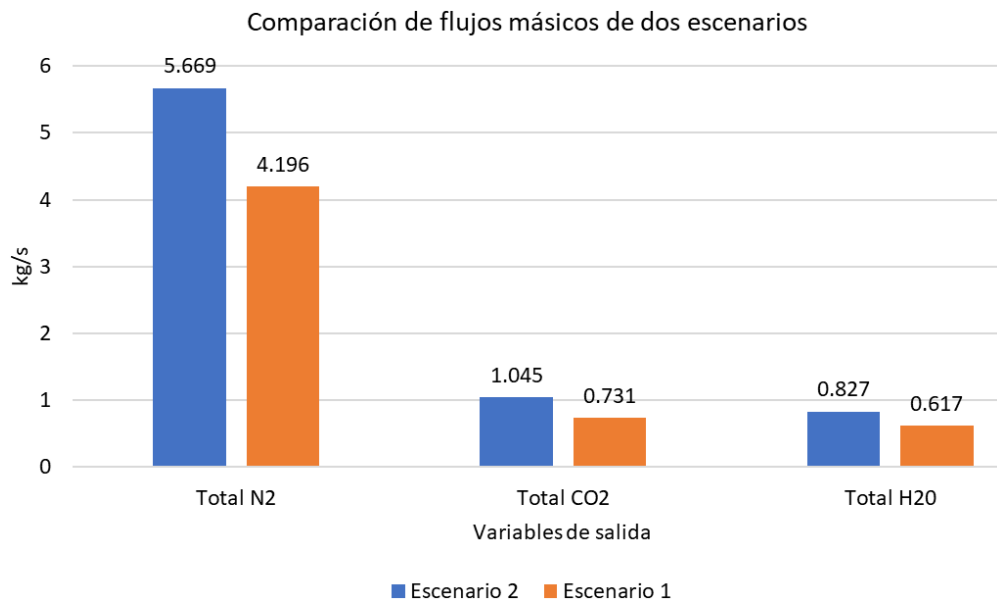


Figura 12.

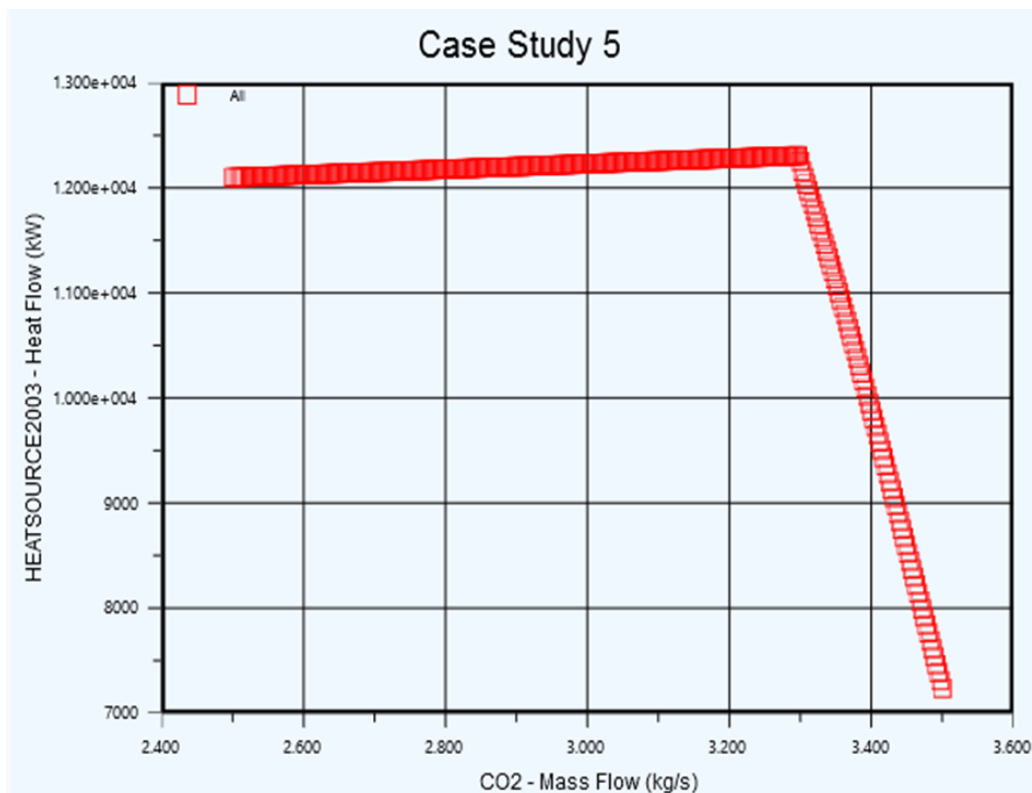
Comparación de los flujos másicos de salida en los escenarios operativos 1 y 2.



Las tendencias presentadas en las figuras 11 y 12 obedecen principalmente a la variable de entrada más sensible para la generación de energía total, es decir, el reflujó de entrada de CO₂ al MIX-100 y su posterior ingreso al oxicombustor. La influencia de esta variable en el flujo de calor generado en el oxicombustor es presentada en la figura 13. Según esta figura, el flujo de calor generado se incrementa con el aumento de CO₂. Este comportamiento se sostiene hasta un flujo de CO₂ de 3,291 kg/s, cuando el flujo de calor es máximo con 12430 kW; a partir de ese punto, el valor del flujo de calor comienza a disminuir drásticamente con el incremento en el reciclo de CO₂. Este comportamiento concuerda con los valores óptimos y típicos de las corrientes de entrada a un oxicombustor (ver Bolland, 2012).

Figura 13..

Producción de energía en el oxicombustor vs el flujo de CO₂ de reciclo.



En el *Case Study*, seis puntos equidistantes dentro del rango de 2,5-3,4 kg/s fueron definidos para el flujo de CO₂ a la entrada del MIX-100 (los puntos totales fueron 2,5 2,68, 2,86, 3,04, 3,20 y 3,40 kg/s de CO₂). De estos seis puntos, cinco fueron establecidos en la región creciente de calor del oxicombustor, mientras el último punto (3,4) se encontró en la tendencia negativa. Lo anterior explica la separación de los dos escenarios operativos identificados.

Otros factores que afectan los flujos de calor en cada escenario operativo corresponden a la temperatura y composición con la que llega el oxígeno al oxicombustor, proveniente de la sección de destilación criogénica (T-101 y T-102). El aire enriquecido con oxígeno, incrementa la eficiencia de los procesos de combustión y transferencia de calor, conduciendo a un ahorro de combustibles, una reducción en la emisión de CO₂ e incrementos en la eficiencia energética (Li & Fan, 2012).

En el apéndice F se encuentra la información de los factores anteriores de temperatura y composición de O₂, en donde se describe plato a plato para las torres T-101 y T-102 en cada uno de los escenarios operativos. Las gráficas del apéndice G evidencian que a la salida de la T-102, la corriente que sigue con el proceso hacia el oxicombustor tiene una composición de O₂ para el escenario operativo 1 de 0,973% y de 0,988% en fracción másica para el escenario operativo 2, mostrando que el escenario operativo 2 es más eficiente energéticamente. Por otro lado, para las temperaturas de la corriente de salida de la T-102 en el escenario operativo 1 y 2 son la misma con un valor de -180,8 °C, por lo que al oxicombustor solo lo está afectando la composición de O₂.

5.4 Implementación del LCA

Las cuatro etapas para la implementación de la metodología LCA (ISO, 2007) se desarrollaron para cada escenario operativo seleccionado del máximo y mínimo de energía generada. Estas fases del LCA corresponden a la definición del objetivo y el alcance, análisis del inventario, evaluación de impacto y la interpretación de resultados.

5.4.1 definición del objetivo y el alcance

El objetivo y el alcance de este estudio corresponde a la cuantificación del impacto ambiental en la simulación del proceso de trigeneración con oxidación, en términos del consumo de servicios industriales y la generación de poluciones de CO₂. Para esto, el Eco-Indicador 99 fue utilizado por medio de las ecuaciones 1,2 y 3 considerando el impacto del consumo de servicios industriales y las poluciones del proceso en cada categoría de este Eco-Indicador.

5.4.2 Análisis de los inventarios

En esta etapa de la implementación del LCA, las entradas consideradas fueron el flujo de aire, de gas natural, dióxido de carbono y los servicios industriales. Para las salidas se tienen los flujos de los productos (agua y nitrógeno) y los flujos de polución (CO₂). Para los dos escenarios operativos del proceso de trigeneración se presentó las entradas y salidas del análisis de los inventarios en la Tabla 5.

Tabla 5.*Resumen de entrada y salida de los inventarios para los escenarios 1 y 2*

	Bombeo, kW-h/h	Compresión, kW-h/h	Energía Calórica, kg/h	CO ₂ , kg/h
Escenario 1	138	6296.14	13919.78	2632.22
Escenario 2	138	8878.46	18492.34	3761.07

5.4.3 Evaluación de impacto

Para la evaluación del impacto, es necesario tener los valores de los factores de impacto LCA de los servicios industriales y de los flujos de polución para las categorías de salud humana, calidad del ecosistema y recursos humanos. Para la obtención de los datos, se recurre a la base de datos del Eco-indicador 99 incluidos en Frischknecht *et al.* (2007). El valor de los factores LCI se presentan en el apéndice B y el porcentaje de contribución de los LCI para los servicios industriales y los flujos de polución para cada una de las categorías se observa en el apéndice C.

Según el apéndice C, los factores de impacto para el bombeo, compresión y energía calórica presentan una mayor influencia en la categoría salud humana, en especial al ítem de los efectos respiratorios y cambio climático. Las categorías de calidad del ecosistema y recursos naturales se comportan de manera similar para el bombeo y compresión, pero no para la energía calórica. Por su parte en el CO₂, la categoría que más afecta es la de los recursos naturales en especial al ítem combustibles fósiles el cual tiene hasta 21,29 de los 22,4 puntos totales.

5.4.4 Interpretación de resultados

La Tabla 6 y el apéndice D muestran los impactos calculados en cada categoría para los escenarios 1 y 2 respectivamente y la figura 14 ilustra el impacto ambiental en unidades de Pt/kWh del proceso de trigeneración con oxidación en las categorías del Eco-indicador 99 para los escenarios operativos 1 y 2. Asimismo, en la Tabla 6 se reportan los valores obtenidos en los trabajos de Marques *et al.* (2021) y Carvalho *et al.* (2011). De la Tabla 6 y el apéndice D se sigue que los daños que presentan mayor impacto ambiental en la categoría de salud humana corresponden a la energía calórica con 6,99 MPt/año para el escenario 2 y 5,262 MPt/año para el escenario 1. Además, Esta categoría es frecuentemente la categoría con mayor contribución total al Eco-indicador 99, seguida por la categoría de recursos naturales (Carvalho *et al.*, 2011).

La figura 14 presenta una comparación de los daños por categorías y totales del proceso de trigeneración usando oxidación para cada uno de los escenarios y se compara con el reporte literario de Marques *et al.* (2021) para un sistema de micro-trigeneración. Así mismo, se presenta los daños de una planta de carbón en España (Carvalho *et al.*, 2011). Según esta figura, los impactos ambientales tanto por categorías como totales son mayores en el escenario 2 sobre demás plantas de energía. El EI para el escenario 1, 2, micro-trigeneración y la planta de carbón corresponde a 0,059, 0,079, 0,020 y 0,041 Pt/kWh por cada kWh de gas natural consumido respectivamente.

Marques *et al.* (2021) realizaron una evaluación de ciclo de vida a un sistema de micro-trigeneración localizado en el laboratorio de energía sostenible en la Universidad Federal de Paraíba (LABES). Este sistema se forma de un motor de recuperación de calor, una refrigeración de absorción de efecto simple (NH₃-H₂O) y una bomba de recirculación para el agua caliente

direccionada a la planta de biodiesel. El gas natural se alimenta al motor de combustión interna, el cual es el encargado de proporcionar la electricidad al laboratorio y los gases de chimenea provenientes del motor entran al sistema de refrigeración de absorción. El esquema del proceso anterior se observa en el apéndice E.

Tabla 6.

Valores de impacto ambiental obtenidos para el escenario operativo 1.

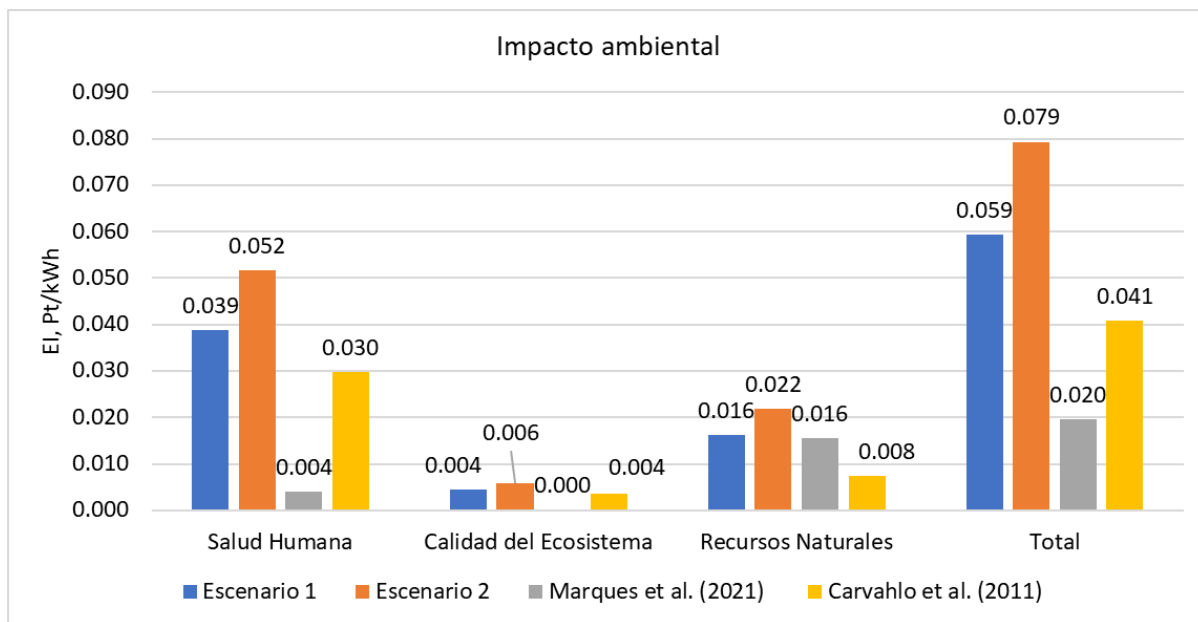
Categoría	Ítem	Bombeo, Pt/h	Compresión, Pt/h	Energía Calórica, Pt/h	CO ₂ , Pt/h
Salud Humana	Cambio Climático	1.036	4.462	258.602	11.075
	Disminución Capa de Ozono	0.008	0.091	0.180	0.003
	Efectos Carcinogénicos	1.154	4.338	18.934	16.508
	Efectos Respiratorios	5.554	15.255	379.509	17.922
	Radiación Ionizante	0.000	0.013	0.494	0.283
	SUMA, Pt/h	7.752	24.160	657.718	45.792
	EI, MPt/a	0.062	0.193	5.262	0.366
Calidad del Ecosistema	Ecotoxicidad	0.128	0.752	1.405	5.176
	Acidificación y eutroficación	0.390	1.217	32.529	1.252
	Uso del suelo	0.156	0.431	39.323	1.187
	SUMA, Pt/h	0.674	2.400	73.257	7.614
	EI, MPt/a	0.005	0.019	0.586	0.061
Recursos Naturales	Combustibles Fósiles	0.527	3.146	243.025	56.027
	Extracción Minera	0.006	0.020	1.379	2.876
	SUMA, Pt/h	0.533	3.166	244.405	58.903
	EI, MPt/a	0.004	0.025	1.955	0.471

Igualmente, de la figura 14 se observa que el escenario 2 del TriGen® exhibe un mayor impacto ambiental que el reportado en Marques *et al.* (2021) y Carvahlo *et al.*, (2011). Este mayor

impacto es derivado de los valores de compresión y energía calórica. Lo anterior implica que, a nivel de la salud humana, la calidad del Ecosistema y los recursos naturales los EI, Pt/kWh sean mayores que en los casos del escenario operativo 1 y de los estudios de Marques y Carvalho.

Figura 14.

Impacto ambiental en Pt/kWh en las categorías del EI-99 para el escenario operativo 1, 2, Marques et al. (2021) y Carvalho et al. (2011).



Profundizando en el trabajo de Marques *et al.* (2021), para el caso de la micro-trigeneración se empleó un gas de bajos niveles de sulfuros de hidrogeno, mecaptanos y azufre elemental, que es el incidente en los impactos ambientales, aun así, no son tan marcados como para superar los niveles de los dos escenarios anteriores. El Eco- indicador 99 considera en este caso a los recursos naturales como la categoría que más se ve perjudicado por el consumo de gas natural debido a que los recursos se vuelven más difíciles de extraer; es decir, se requiere de mayor energía en el futuro

para extraer energía de menor calidad (Marques *et al.*, 2021). En las categorías de salud humana y calidad del ecosistema para esta situación no representa mayor daño.

Por su parte, para el caso de la planta de carbón en España y el gas natural, el Eco-indicador 99 en la categoría de recursos naturales, el gas natural presenta valores mayores comparándolo directamente con la aplicación del gas natural, aunque la combustión del gas natural tenga emisiones de calentamiento global y gases de efecto invernadero mucho menores que el carbón o el petróleo. La diferencia de factores de caracterización LCI entre el gas natural y el carbón equilibra la categoría de impacto del ítem combustibles fósiles, lo que da como resultado puntuaciones finales similares para ambos (Carvalho *et al.*, 2011).

Por otra parte, la equivalencia de habitantes europeos promedio (H) que contaminan los ecopuntos del Eco indicador 99, según los escenarios, corresponden a:

$$\text{Daño Escenario 1} \rightarrow 9 \frac{MPt}{\text{año}} * \frac{1000 H}{1MPt} = 9011 \frac{H}{\text{año}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{Daño Escenario 2} \rightarrow 12 \frac{MPt}{\text{año}} * \frac{1000 H}{1MPt} = 12057 \frac{H}{\text{año}} \quad (\text{Ec. 5})$$

El número de habitantes permite visualizar los impactos en términos de poblaciones que pertenecen al contexto europeo. Sin embargo, el contexto colombiano es diferente al contexto europeo, lo cual puede implicar un diferente número de personas equivalentes para el impacto de los escenarios de operación del TriGen®. Una actualización de los impactos del Eco-Indicador 99 al contexto colombiano y latinoamericano es recomendado para futuros trabajos en el tema.

Como parte de las estrategias que las industrias pueden valorar para reducir dicho impacto ambiental se recomienda periódicamente diseñar procesos evaluativos operacionales y misionales que permitan reconocer oportunidades de mejora a partir del desempeño operacional de cada área. Para este proceso de mejora se puede optimizar las siguientes ideas: Analizar distintos tipos de gas

natural o combustibles, ya que este afecta principalmente la formación de contaminantes. Además, las plantas de trigeneración también se pueden alimentar con energía eólica, solar entre otras energías renovables como lo hace Ishaq *et al.* (2018) con el fin de obtener valores más bajos de impacto ambiental. Igualmente, una integración energética de las corrientes como hace Ebrahimi & Ziabasharhagh. (2017) puede optimizar la energía entre las secciones del proceso con el objetivo de disminuir el impacto ambiental.

6. Conclusiones

La simulación desarrollada por lineares & rojas (2022) y utilizada en el presente documento, reportó valores congruentes con los datos de la literatura; la comparación de los datos de temperatura no excede un porcentaje de error promedio del 10%.

Con el análisis del *Case Study*, se observó que el reciclaje de CO₂ hacia el oxidante ocasiona dos escenarios operativos durante el proceso de generación de energía en el sistema TriGen®; altos valores de generación de energía antes del punto óptimo de 3,291 Kg/s de CO₂ de reciclaje y bajos valores después de este punto.

Según la evaluación del ciclo de vida con el Eco-indicador 99, el escenario de menor producción de energía (escenario operativo 1) presentó un menor impacto ambiental con 9 MPt/año o lo que es equivalente a 9011 ciudadanos europeos promedio. Respecto al escenario operativo 2 se presentó un impacto ambiental de 12 MPt/año que equivale a 12057 ciudadanos

Europeos. Como resultado, el rango del impacto ambiental para la simulación del proceso de trigeneración está entre 9 y 12 MPt/año.

Los resultados de los impactos ambientales obtenidos de los dos escenarios de operación del TriGen son concordantes con los trabajos reportados de la literatura. Estos trabajos permiten comparar los impactos resultantes del proceso TriGen® con procesos convencionales de obtención de energía como lo es el carbón. La categoría con el mayor impacto ambiental fue la salud humana con un valor correspondiente a 7.85 MPt/año en el escenario operativo 2, seguido por 5,88 MPt/año para el escenario operativo 1 y para el carbón es de 4.52 MPt/año.

7. Recomendaciones

Revisar reportes de investigación en la literatura sobre trigeneración a nivel de procesos industriales debido a que la comparación de Ecopuntos que se hace en la figura 14 son basados en una micro-trigeneración realizada a pequeña escala en un laboratorio universitario y una planta de poder de carbón en España.

Realizar una base de datos o un ajuste para el Eco-indicador 99 con valores referentes a factores de impacto LCA para los servicios industriales y flujos de polución en las categorías de salud humana, calidad del ecosistema y recursos humanos que sea equivalente con un ciudadano promedio de Colombia o Latinoamérica.

Realizar un análisis de sensibilidad para conocer los factores más influyentes en la estructura y configuración operacional del proceso.

Evaluar distintas estrategias, parámetros y configuraciones operativas que optimice el proceso de trigeneración, generando impactos positivos a nivel ambiental, productivo y económico.

Es importante nombrar los casos en que la trigeneración es aplicada a partir de energías renovables debido que no se emplean combustibles fósiles y teniendo en cuenta que no producen gases de efecto invernadero que afecten el calentamiento global. A medida que el tiempo avanza el mundo ha tomado conciencia ambiental y se han focalizado en la energía sostenible.

Una actualización de los impactos del Eco-Indicador 99 al contexto colombiano y latinoamericano es recomendado para futuros trabajos en el tema.

Referencias bibliográficas

- Aristizábal-Alzate, C. E., González-Manosalva, J. L., Gutiérrez-Cano, J. C. (2020). Análisis del ciclo de vida y cálculo de la huella de Carbono para un proceso de reciclaje de botellas PET en Medellín (ANT). *Producción + Limpia*, 15 (1), 7-24. Epub 16 de noviembre de 2020. <https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a1><https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a1>.
- Berbesi, E. (2021). *Aplicación de Datos de Proceso en el Análisis del Impacto Ambiental del Hidrotratamiento de Combustibles en la Gerencia Refinería Barrancabermeja, Mediante la Metodología del Ciclo de Vida*. [Tesis de maestría no publicada]. Universidad de Santander.
- Bolland, O. (2012). *Power Generation: CO₂ Capture and Storage*. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Carvalho, M., Serra, L. M., & Lozano, M. A. (2011). Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy*, 36(6), 3779–3790. doi: 10.1016/j.energy.2010.09.023
- Carvalho, M., Lozano, M. A., & Serra, L. M. (2012). Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy*, 91(1), 245–254. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.09.029
- Carvalho, M., Serra, L. M., & Lozano, M. A. (2011). Geographic evaluation of trigeneration systems in the tertiary sector. Effect of climatic and electricity supply conditions. *Energy*, 36(4) 1931–1939. doi:10.1016/j.energy.2010.02.036
- Chacón, J. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería ingeniería industrial*, 72, 37-70.

- Chem, C., Yang, S. (2021). The energy demand and environmental impacts of oxy-fuel combustion vs post-combustion capture in China. *Energy Strategy Reviews*, 38(1), 100701. doi.org/10.1016/j.esr.2021.100701
- Duda, M., Shaw, J. S. (1997). From cradle to grave: Measuring products' environmental impact—global warming—climate change. *USA Today. Society*, 35(1), 38–43. doi:10.1007/s12115-997-1054-x
- Ebrahimi, A., & Ziabasharhagh, M. (2017). Optimal design and integration of a cryogenic Air Separation Unit (ASU) with Liquefied Natural Gas (LNG) as heat sink, thermodynamic and economic analyses. *Energy*, 126, 868-885. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.145
- Ebrahimi, A., Meratizaman, M., Reyhani, H. A., Pourali, O., y Amidpour, M. (2015). Energetic, exergetic and economic assessment of oxygen production from two columns cryogenic air separation unit. *Energy*, 90, 1298-1316. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.083
- EPA - U.S. Environmental Protection Agency. (2006). *Life cycle assessment: principles and practice*. Scientific Applications International Corporation (SAIC). Cincinnati, Ohio, USA.
- Goedkoop, M. Effting, S. Collignon, M. (1999). *Anexo Eco-inidicador '99. Método para evaluar el impacto ambiental a lo largo del Ciclo de Vida*. Sociedad Pública de Gestión Ambiental.
- Ishaq, H., Dincer, I., & Naterer, G. F. (2018). Development and assessment of a solar, wind and hydrogen hybrid trigeneration system. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2018.10.172
- Finnveden, G.; Hauschild, M. Z.; Ekvall, T.; Guinée, J.; Heijungs, R.; Hellweg, S.; Koehler, A.; Pennington, D.; Suh, S. (2009). Recent developments in life cycle assessment. *J. Environ. Manage*, 91 (1) 1– 21. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.018

Frischknecht, R., Althaus, HJ, Bauer, C., Doka, G., Heck, T., Jungbluth, N., Nemecek, T. (2007).

La relevancia ambiental de los bienes de capital en las evaluaciones del ciclo de vida de productos y servicios. *Revista internacional de evaluación del ciclo de vida*, 12 (1), 1-11. <https://doi.org/10.1065/lca2007.02.309>.

Gopan, A., Kumfer, B. M., & Axelbaum, R. L. (2015). Effect of operating pressure and fuel moisture on net plant efficiency of a staged, pressurized oxy-combustion power plant. *Int. J. Greenh. Gas Control*, 39, 390–396. doi:10.1016/j.ijggc.2015.05.014

International Standardisation of Carbon Footprinting Website (ACLCA). (s.f.) *Página Principal* <http://www.lcacenter.org> (accedido en julio 4, 2022).

Kabalina, N., Costa, M., Yang, W., & Martin, A. (2018). Impact of a reduction in heating, cooling and electricity loads on the performance of a polygeneration district heating and cooling system based on waste gasification. *Energy*, 151, 594–604. doi:10.1016/j.energy.2018.03.078

Kapteijn, P., Kutscha, E., y Perron, J. (11-14 de noviembre de 2012). A breakthrough oxyfuel technology for cost-effective CO₂ enhanced oil recovery. Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition. *ADIPEC 2012*, Abu Dhabi, UAE. DOI: 10.2118/162541-ms.

Kapteijn, P; Biebuyck, C y Kutscha, E. (Octubre de 2011). Maersk Oil: TriGen, an innovative oxy-fuel technology to convert high CO₂ gas reserves into power. International Gas Research Conference-IGRC Conference, Seoul, S. Korea

Kavvadias, K. C., Tosios, A. P., & Maroulis, Z. B. (2010). Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis. *Energy Conversion and Management*, 51(4), 833–845. doi:10.1016/j.enconman.2009.11.01

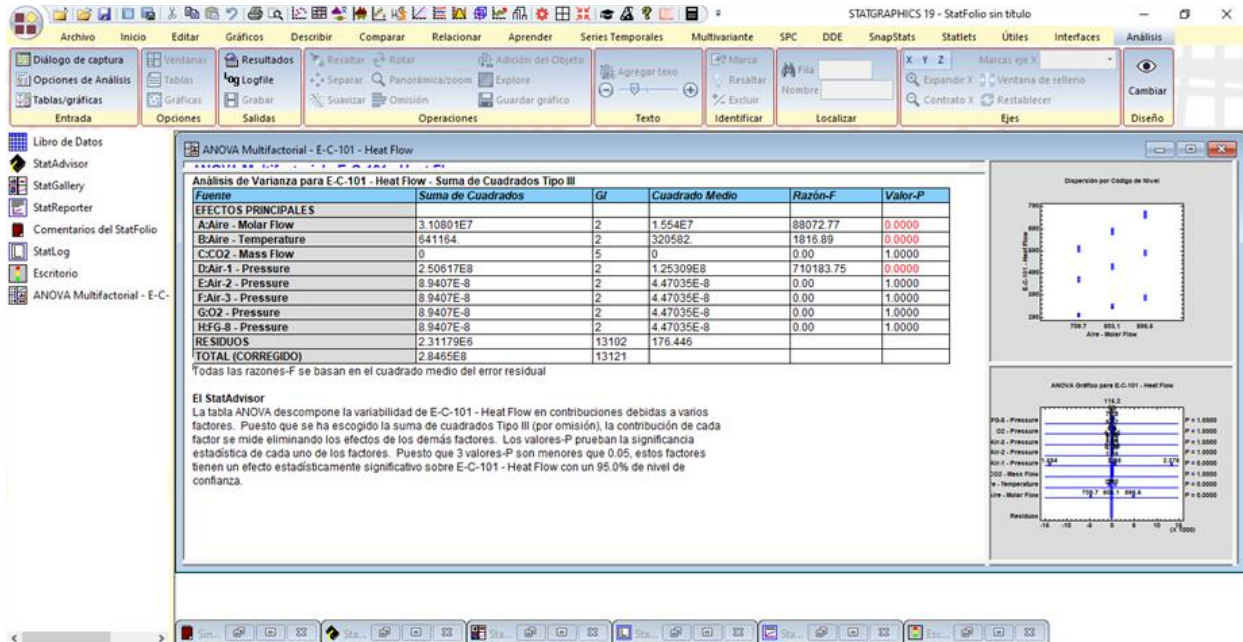
- Linares, O., Rojas, A. (2022). *Análisis técnico y económico de un sistema de trigeneración integrado aplicado en un campo petrolero colombiano*. [Tesis de pregrado]. Universidad industrial de Santander.
- Martins, L. N., Fábrega, F. M., & d' Angelo, J. V. H. (2012). Thermodynamic Performance Investigation of a Trigeneration Cycle Considering the Influence of Operational Variables. *Procedia Engineering*, 42, 1879–1888. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.584
- Marques, A. S., Carvalho, M., Ochoa, A. A. V., Abrahão, R., & Santos, C. A. C. (2021). Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system. *Energy*, 216, 119310. doi:10.1016/j.energy.2020.119310
- Mazur, A., & Lee, J. (1993). Sounding the Global Alarm: Environmental Issues in the US National News. *Social Studies of Science*, 23(4), 681–720. doi:10.1177/030631293023004003
- McManus, M. C., & Taylor, C. M. (2015). The changing nature of life cycle assessment. *Biomass and Bioenergy*, 82, 13–26. Doi: 10.1016/j.biombioe.2015.04.024.
- Nieuwlaar, E. (2004). Life Cycle Assessment and Energy Systems. *Encyclopedia of Energy*, 647–654.
- Organización Internacional de Normalización. (2007). *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>
- Portillo, E., Fernández, L. M. G., Vega, F., Alonso-Fariñas, B., & Navarrete, B. (2021). Oxygen transport membrane unit applied to oxy-combustion coal power plants: A thermodynamic assessment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4), 105266. doi:10.1016/j.jece.2021.105266

- Rodríguez, J., Cano, I., Elías, A., Barona, A. (IHOBE 2000). *Confección del eco-indicador de un proceso de biofiltración*
- Ruiz, N. (2007). *Aplicación del análisis del ciclo de vida en el estudio ambiental de diferentes procesos avanzados de oxidación*. [Tesis doctoral]. Universidad autónoma de Barcelona.
- Saleh, Y. (2016). Comparative life cycle assessment of beverages packages in Palestine. *Journal of Cleaner Production*, 131, 28–42. doi:10.1016/j.jclepro.2016.05.080
- Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). *Guidelines for Life-Cycle Assessment: A code of practice. Based on a workshop at Sesimbra, Portugal, March 31 e April 3 1993*. 1993. Brussels and Pensacola, Florida, (USA).
- UN Environment Programme Life Cycle Initiative website. <https://www.unep.org/explore-topics/resource-efficiency/what-we-do/life-cycle-initiative>. (accedido en julio 4. 2022).

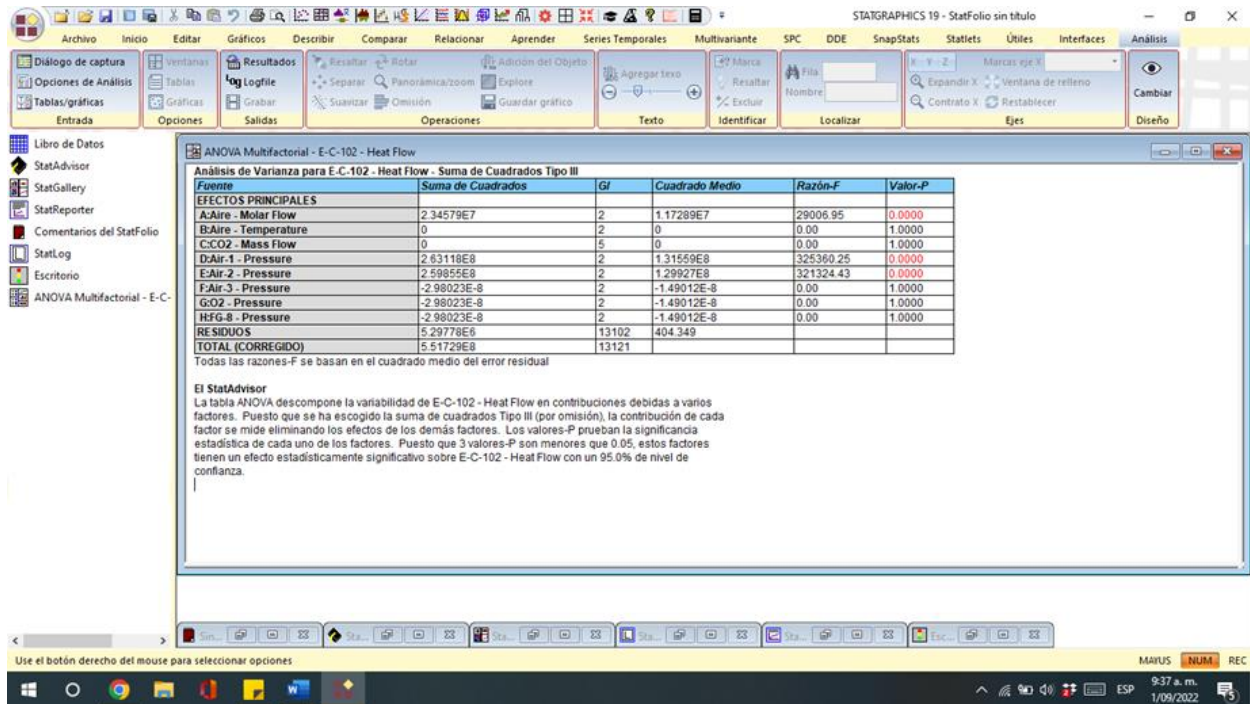
Apéndices

Apéndice A. Tablas ANOVAS multifactorial

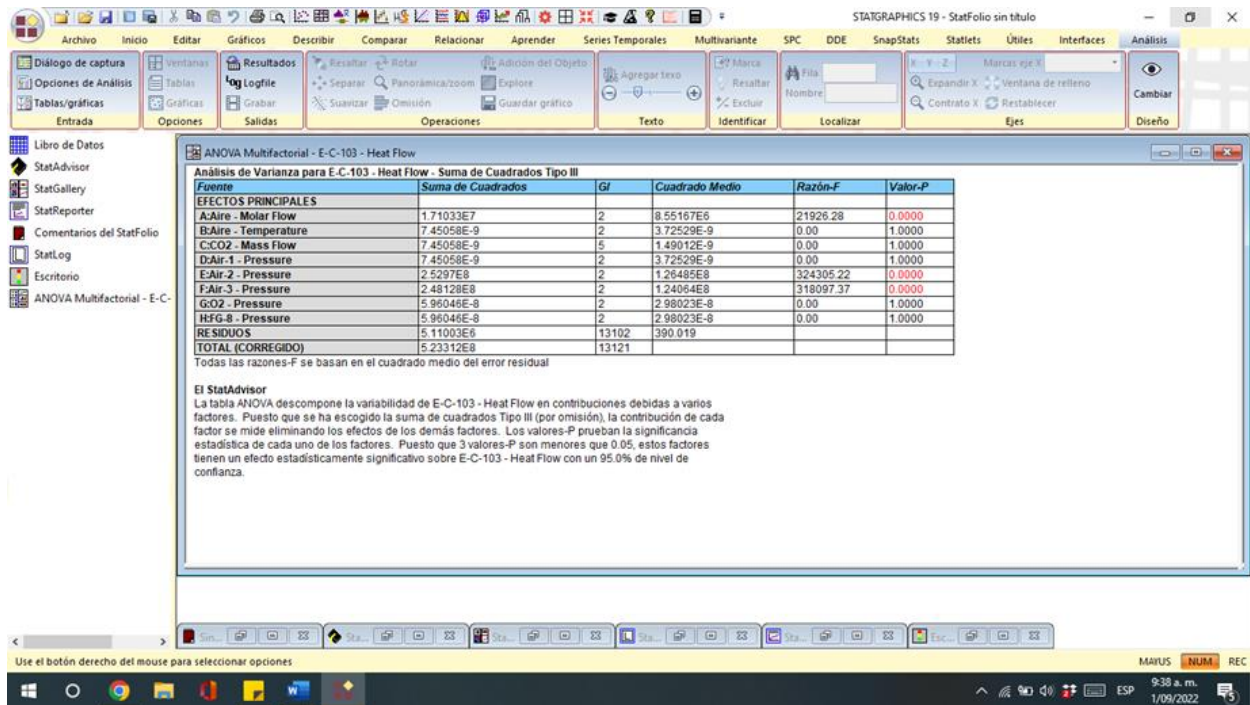
Análisis de varianza para Flujo de calor E-101



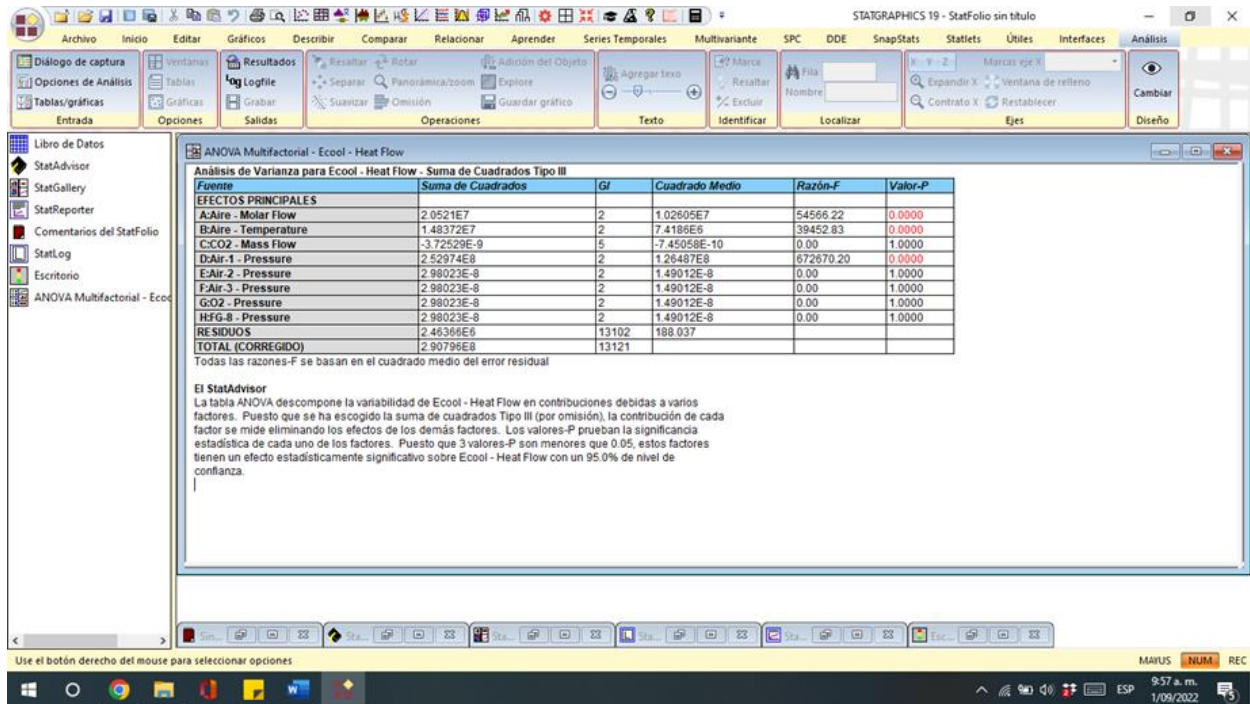
Análisis de varianza para Flujo de calor E-102



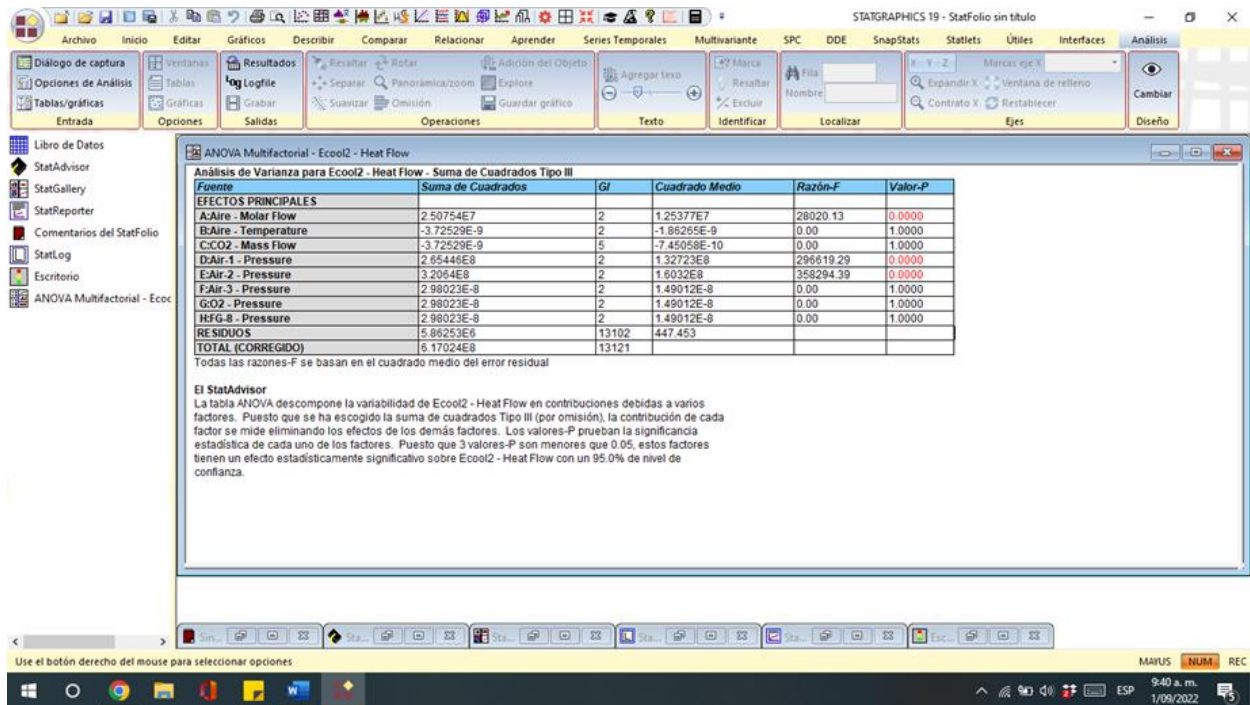
Análisis de varianza para Flujo de calor E-103



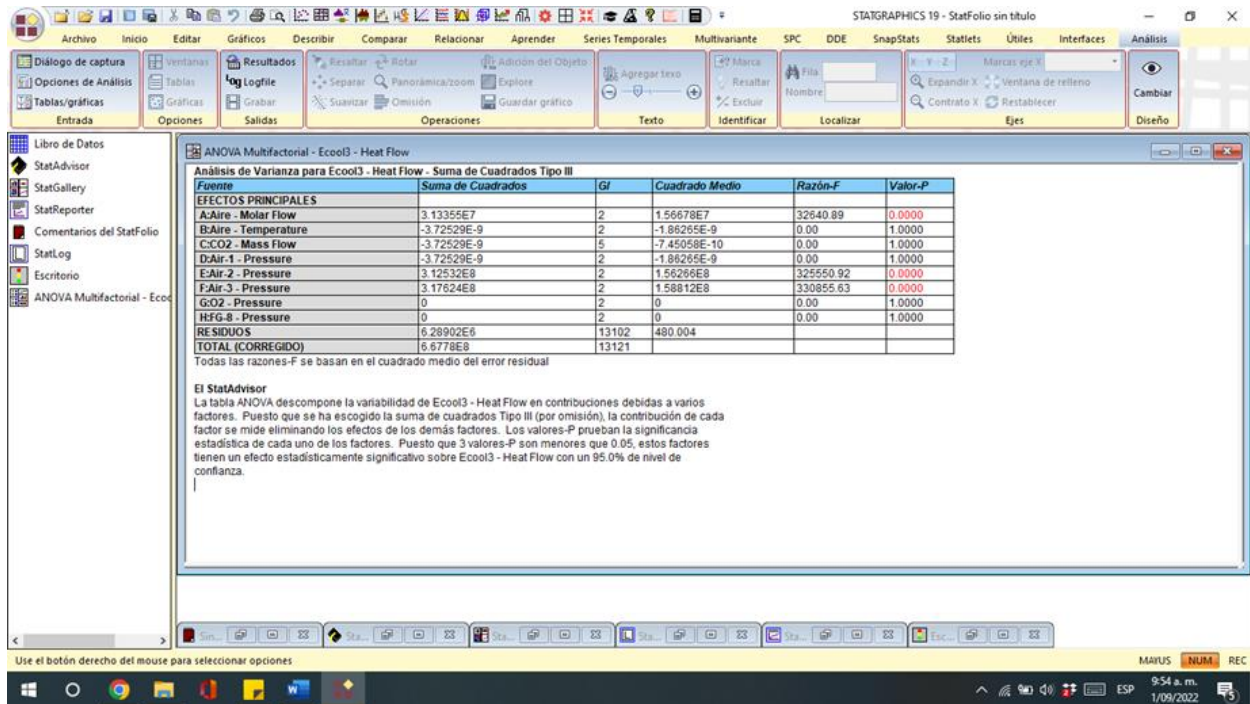
Análisis de varianza para Flujo de calor C-101



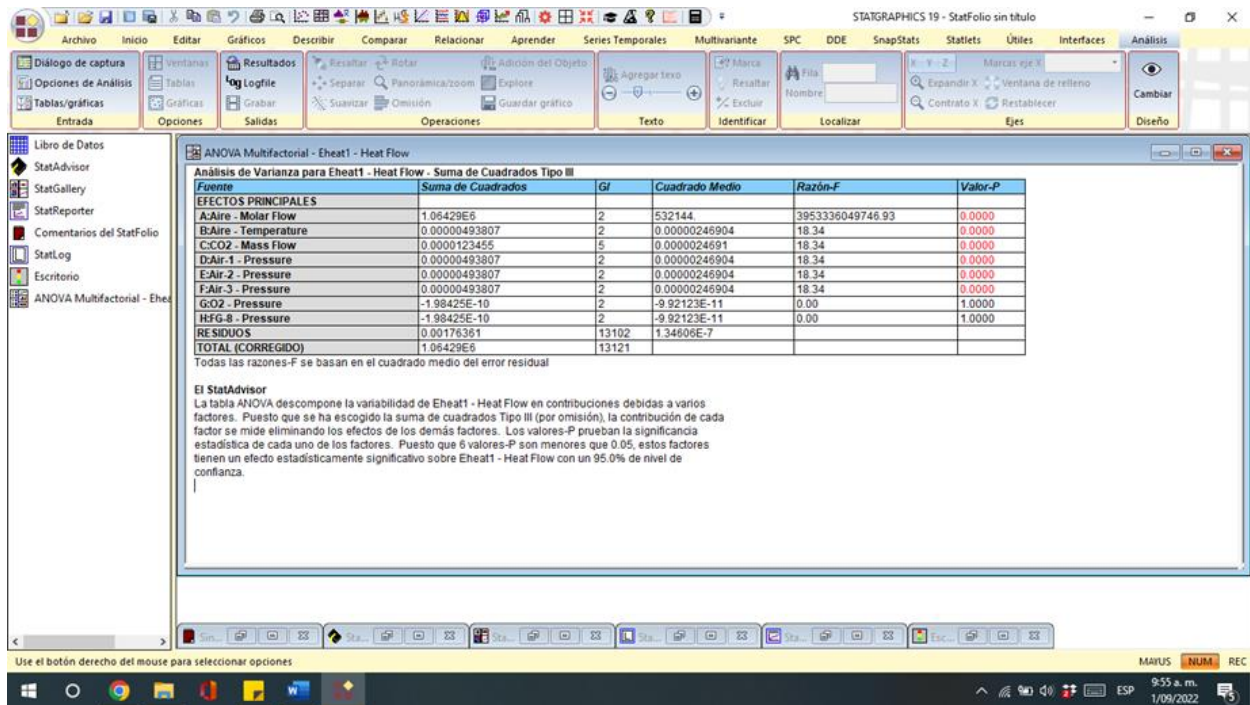
Análisis de varianza para Flujo de calor C-102



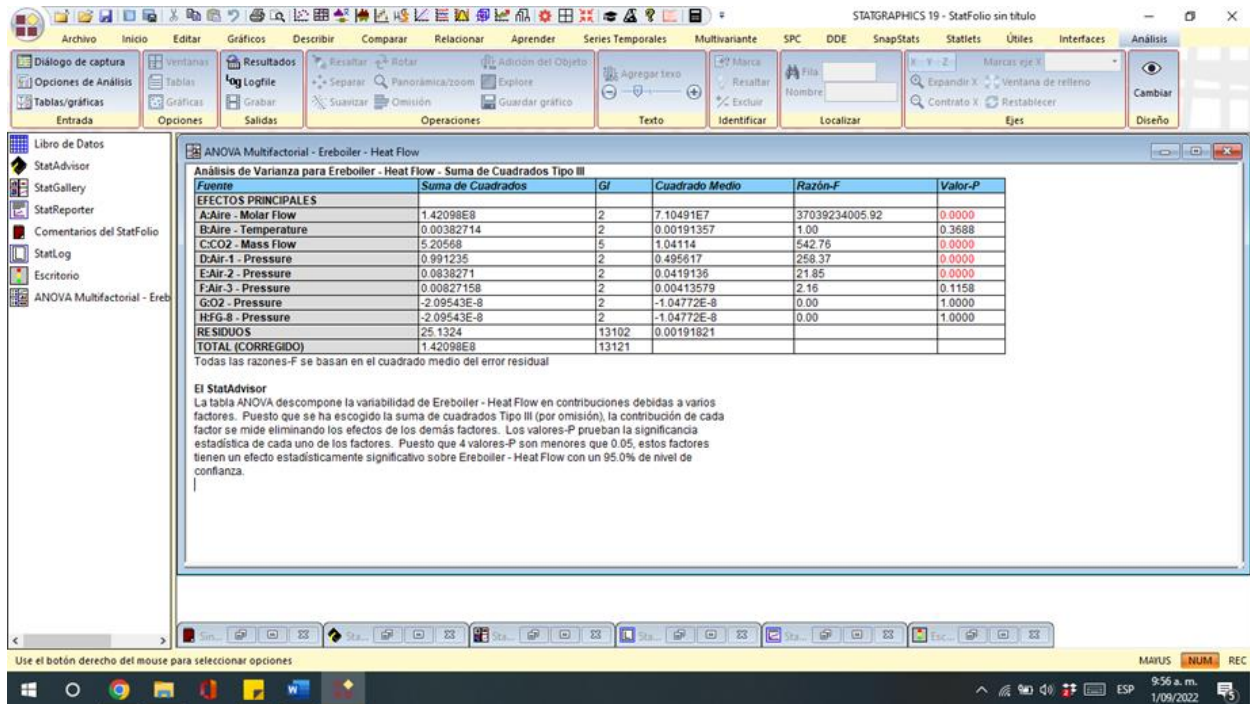
Análisis de varianza para Flujo de calor C-103



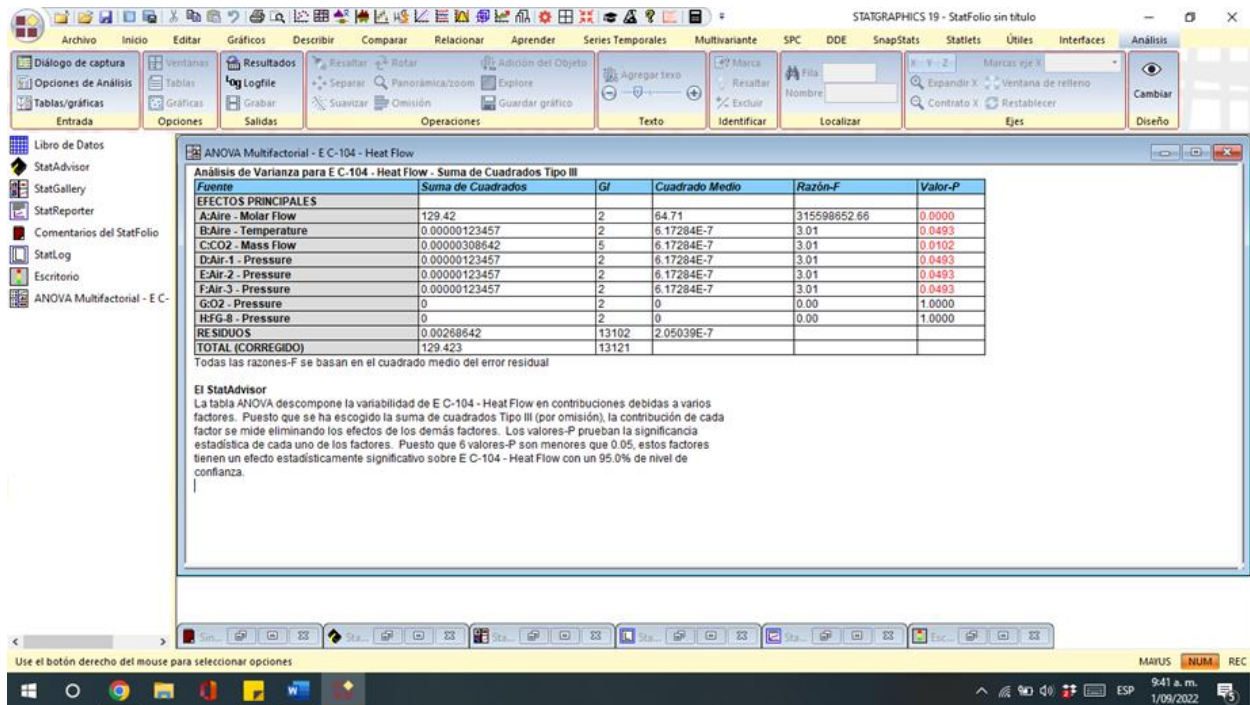
Análisis de varianza para Flujo de calor E-104



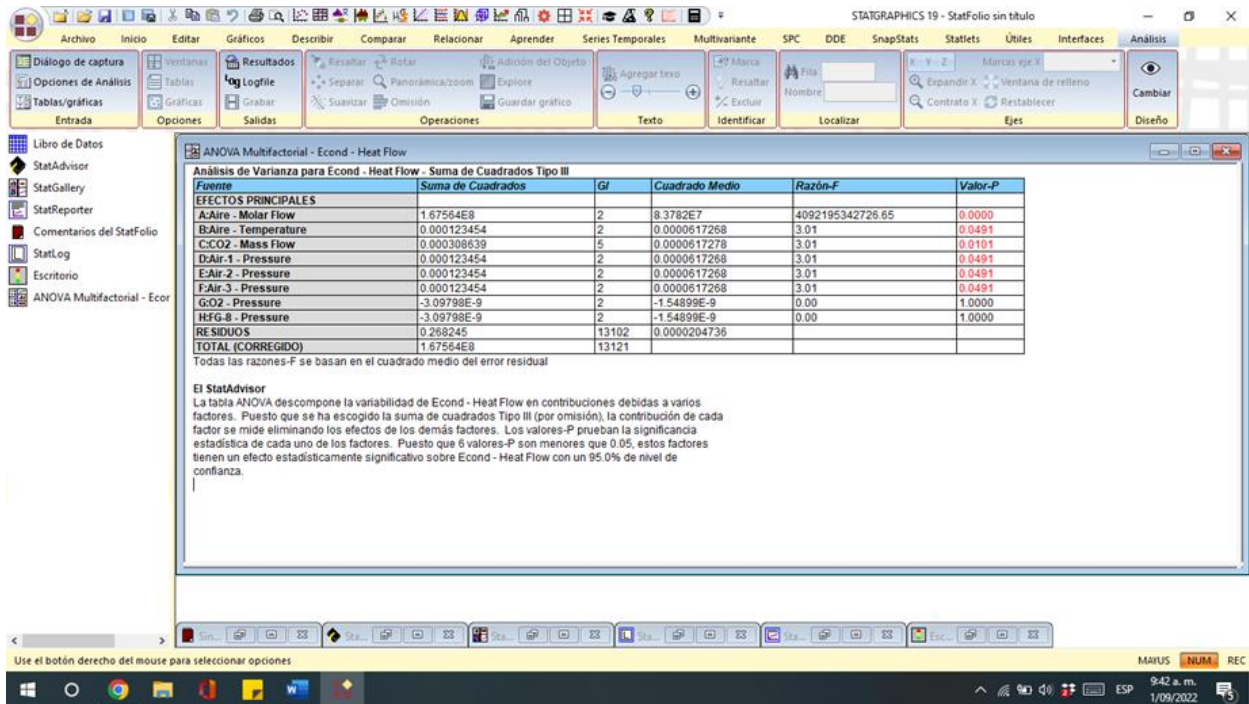
Análisis de varianza para Flujo de calor T-102



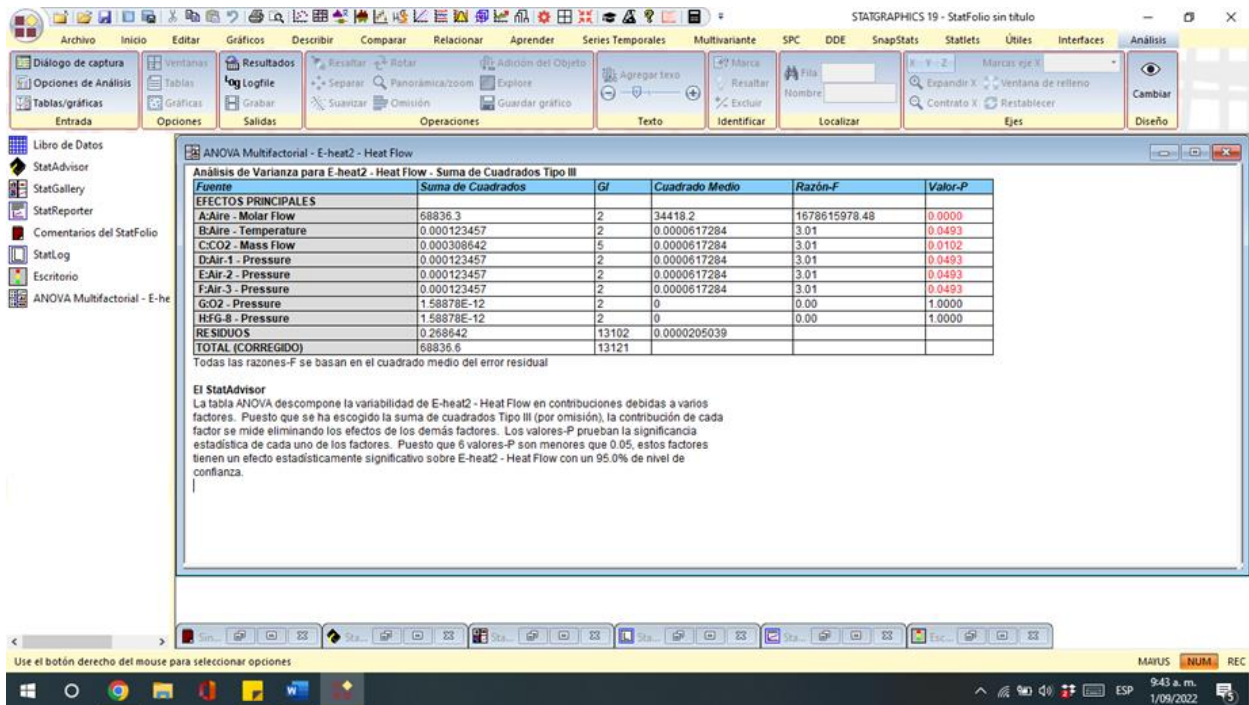
Análisis de varianza para Flujo de calor C-104



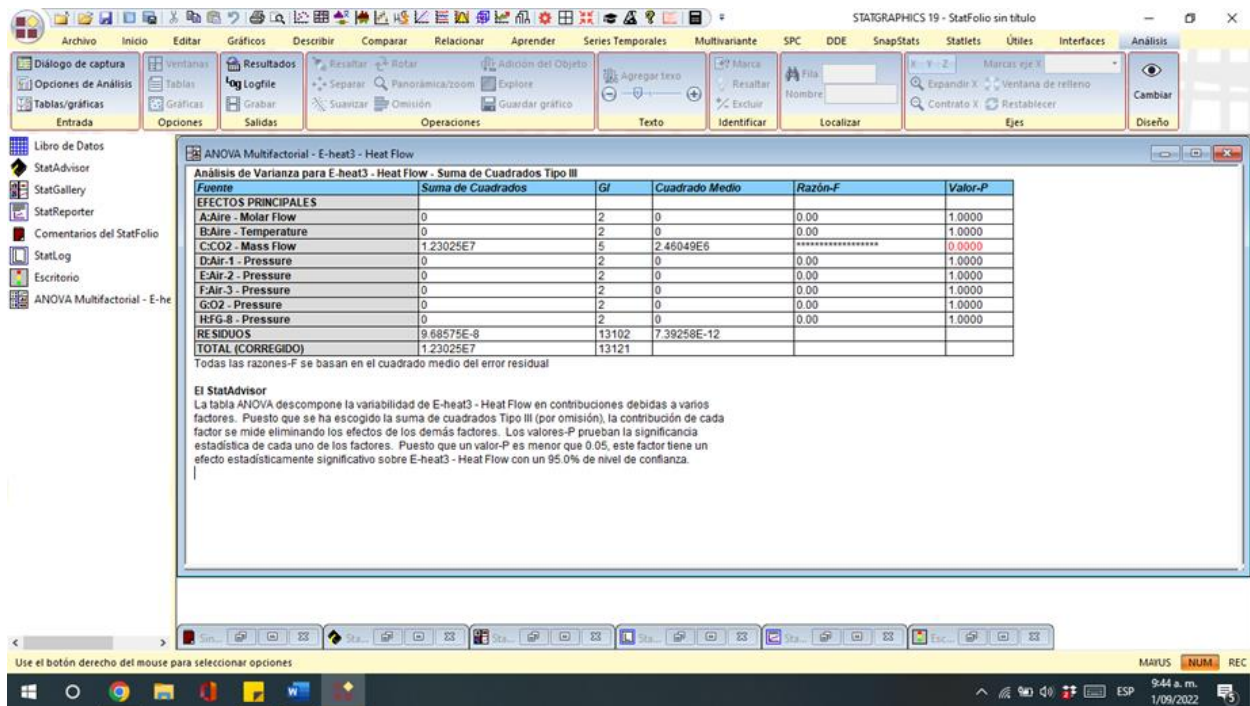
Análisis de varianza para Flujo de calor T-101



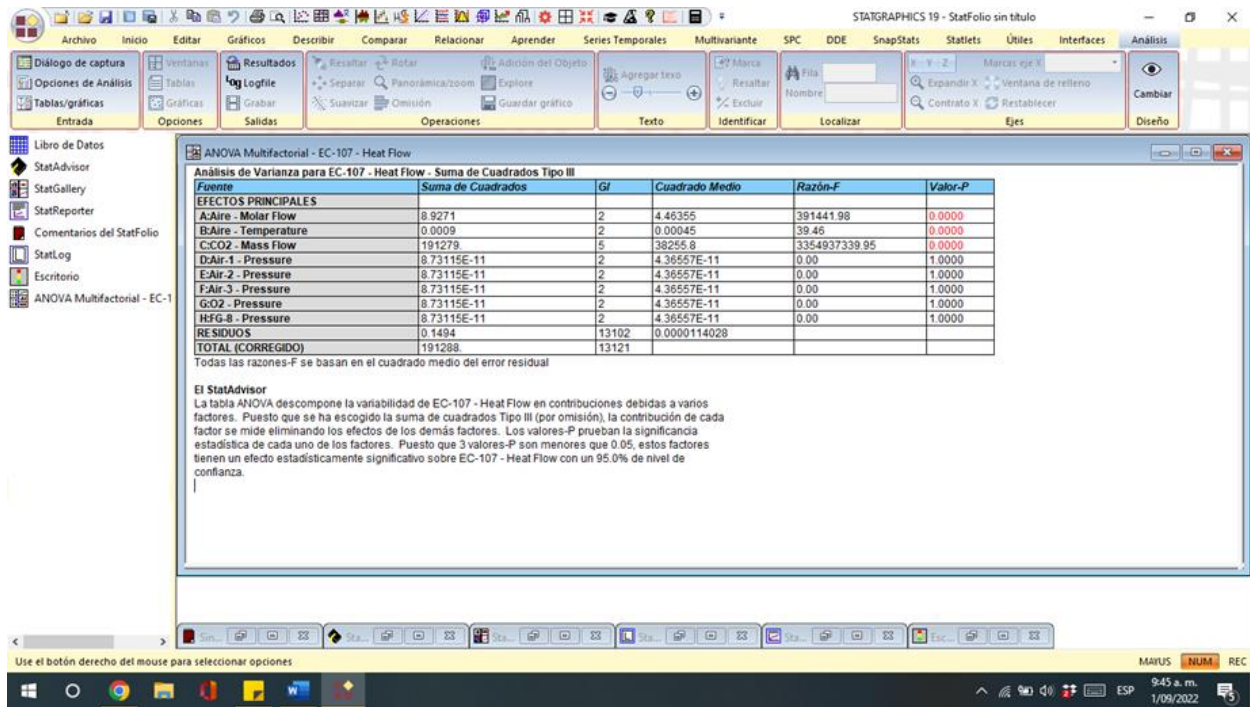
Análisis de varianza para Flujo de calor E-105



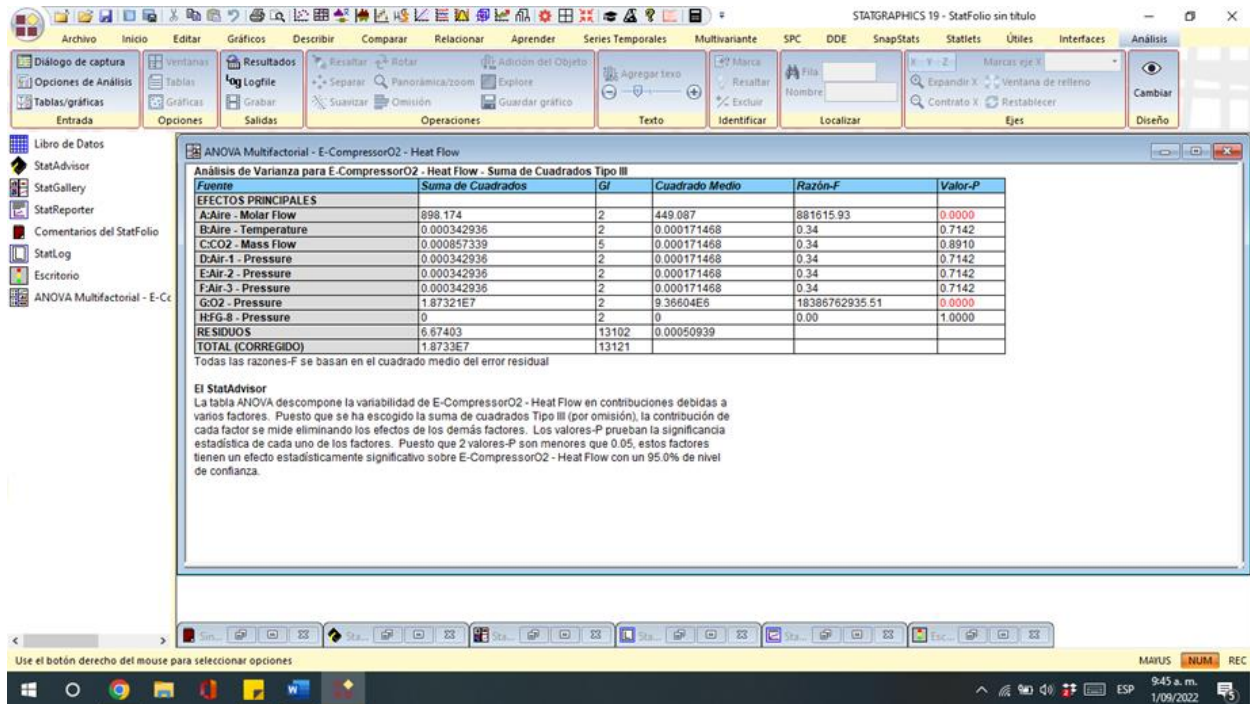
Análisis de varianza para Flujo de calor E-106



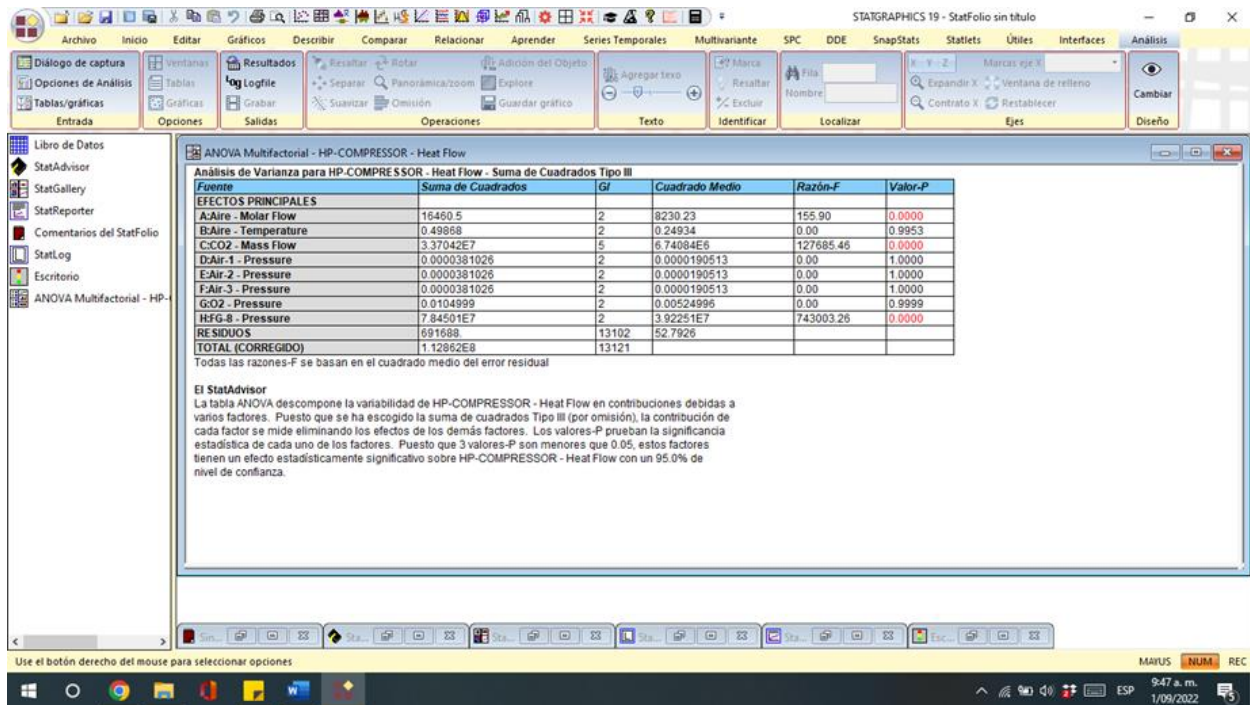
Análisis de varianza para Flujo de calor C-107



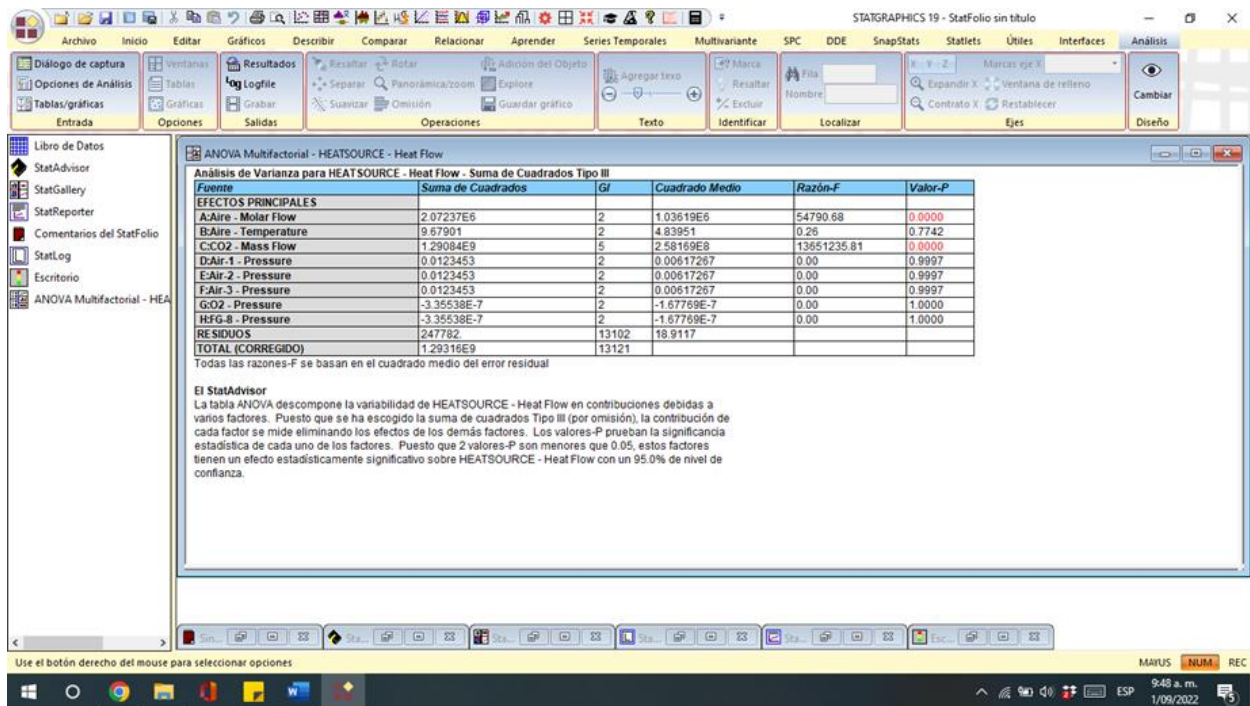
Análisis de varianza para Flujo de calor C-105



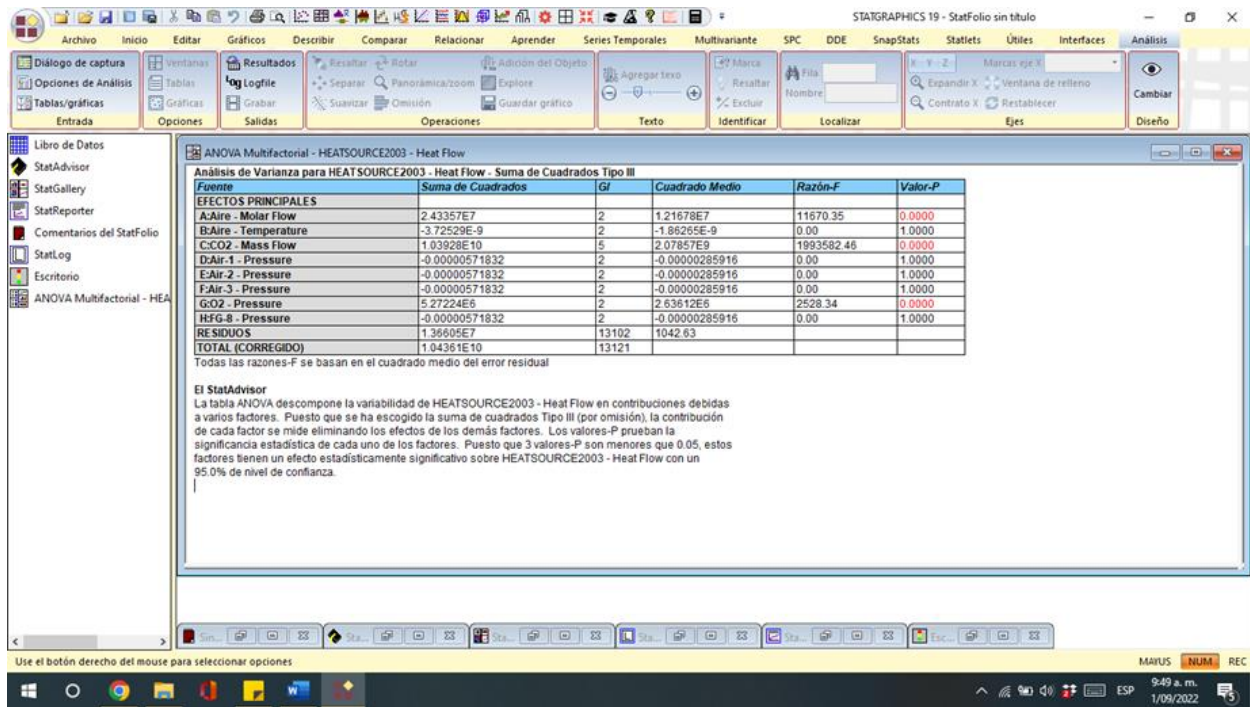
Análisis de varianza para Flujo de calor C-108



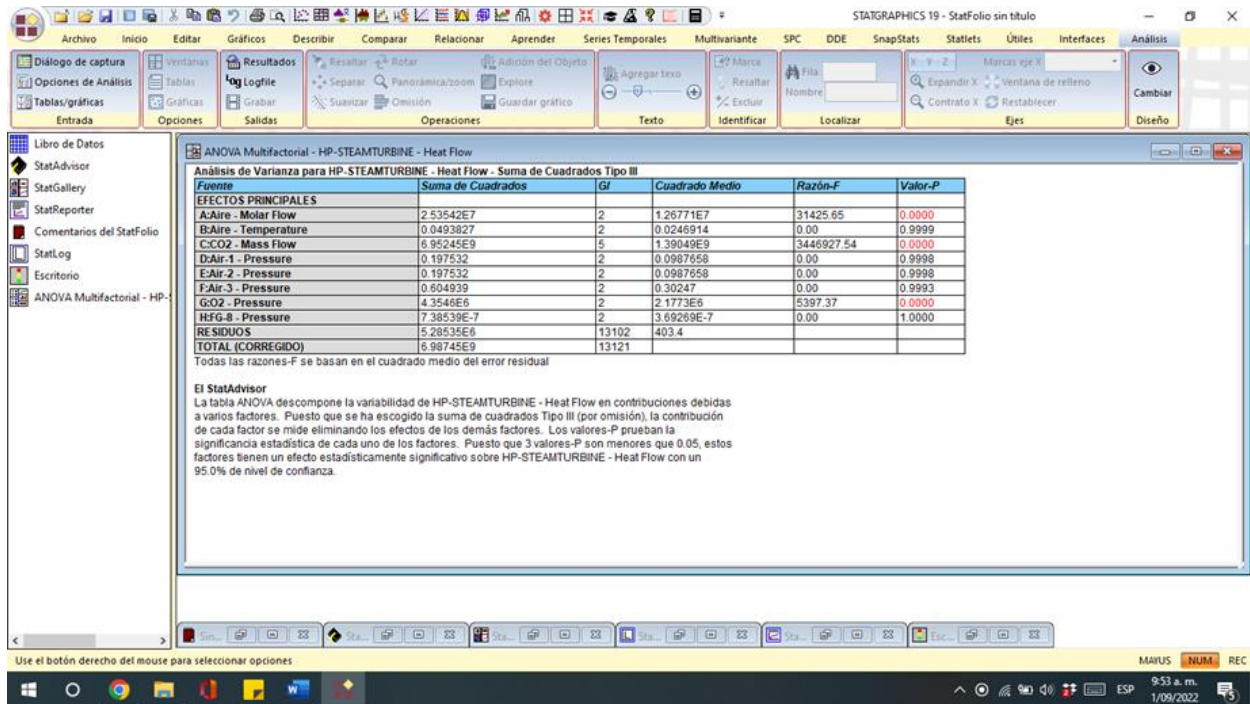
Análisis de varianza para Flujo de calor E-109



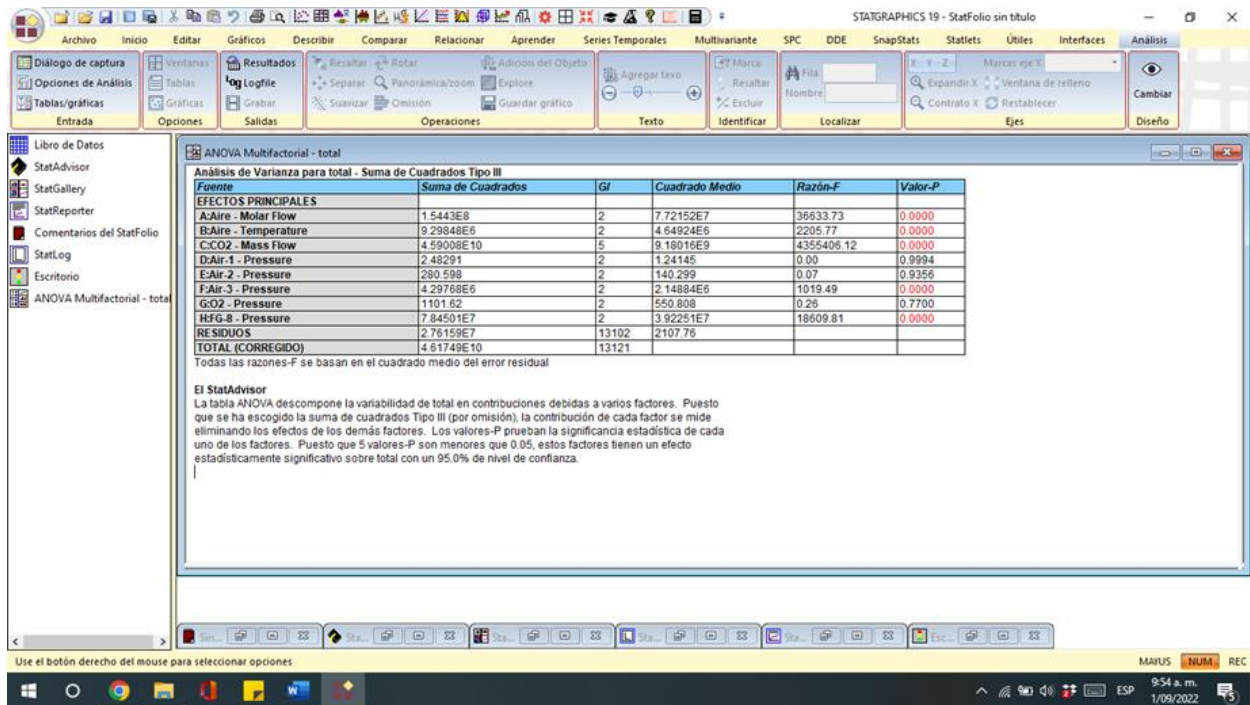
Análisis de varianza para Flujo de calor E-112



Análisis de varianza para Flujo de calor C-106



Análisis de varianza para Flujo de calor total



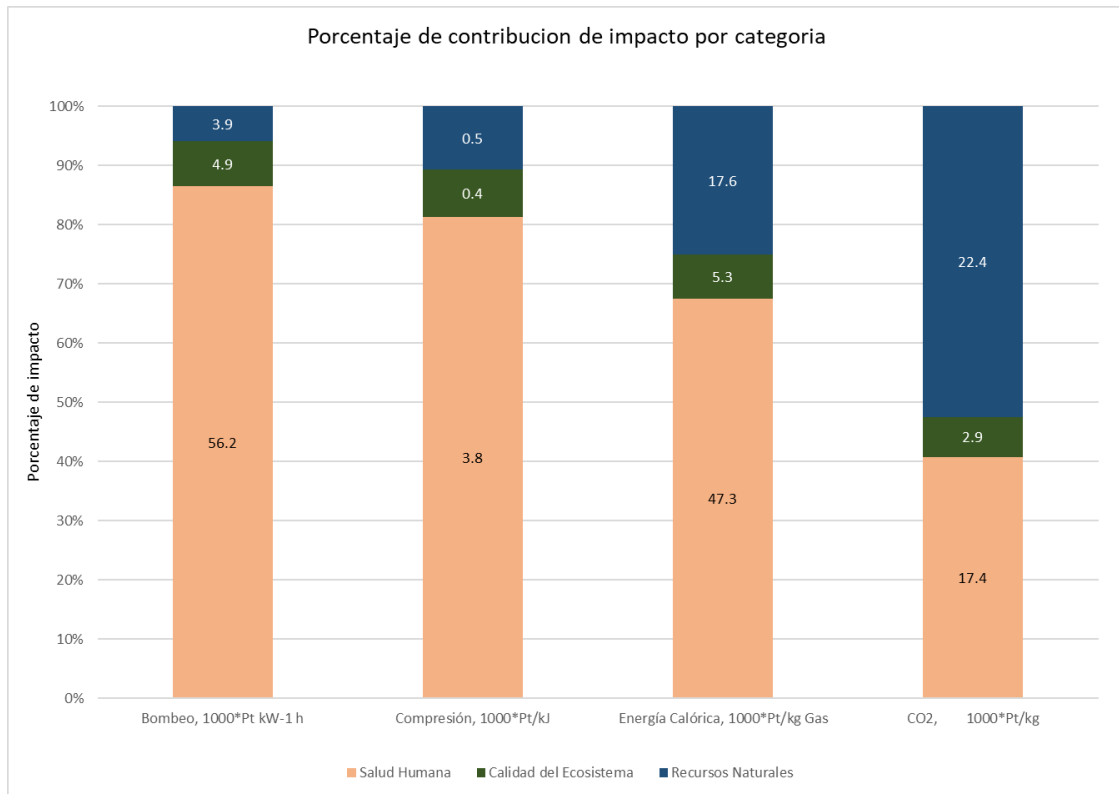
Apéndice B. Tabla factores de impacto

Factores de impacto de los servicios industriales y los flujos de polución en cada categoría del EI-99

Categoría	Ítem	Bombeo, 1000*Pt kW-1 h	Compresión, 1000*Pt/kJ	Energía Calórica, 1000*Pt/kg Gas	CO ₂ , 1000*Pt/kg	SO ₂ , 1000*Pt/kg	H ₂ , 1000*Pt/kg
Salud Humana	Cambio Climático	7.51	0.71	18.58	4.21	2.27	8.70
	Disminución Capa de Ozono	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
	Efectos Carcinogénicos	8.36	0.69	1.36	6.27	5.71	0.95
	Efectos Respiratorios	40.25	2.42	27.26	6.81	96.81	11.80
	Radiación Ionizante	0.00	0.00	0.04	0.11	0.09	0.02
Calidad del Ecosistema	Ecotoxicidad	0.93	0.12	0.10	1.97	1.79	0.24
	Acidificación y eutroficación	2.82	0.19	2.34	0.48	5.62	1.11
	Uso del suelo	1.13	0.07	2.83	0.45	0.47	0.04
Recursos Naturales	Combustibles Fósiles	3.82	0.50	17.46	21.29	13.05	214.37
	Extracción Minera	0.04	0.00	0.10	1.09	1.05	0.08

Apéndice C. Figura porcentaje de contribución de los LCI

Porcentaje de contribución de los LCI para los servicios industriales y flujos de polución del EI-99.

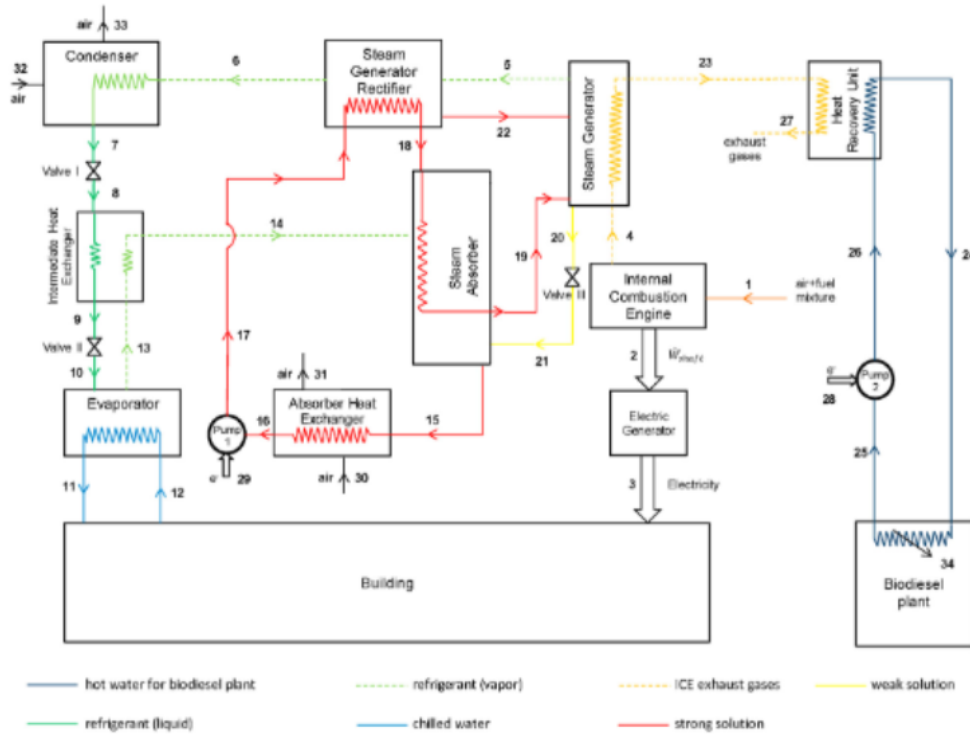


Apéndice D. Tabla valores de impacto para el escenario operativo 2*Valores de impacto ambiental obtenidos para el escenario operativo 2.*

Categoría	Ítem	Bombeo, Pt/h	Compresión, Pt/h	Energía Calórica, Pt/h	CO ₂ , Pt/h
Salud Humana	Cambio Climático	1.036	6.292	343.551	15.825
	Disminución Capa de Ozono	0.008	0.129	0.239	0.005
	Efectos Carcinogénicos	1.154	6.117	25.153	23.588
	Efectos Respiratorios	5.554	21.512	504.175	25.608
	Radiación Ionizante	0.000	0.019	0.656	0.404
	SUMA, Pt/h	7.752	34.069	873.774	65.430
	EI, MPt/a	0.062	0.273	6.990	0.523
Calidad del Ecosistema	Ecotoxicidad	0.128	1.060	1.866	7.395
	Acidificación y eutroficación	0.390	1.716	43.215	1.789
	Uso del suelo	0.156	0.608	52.241	1.695
	SUMA, Pt/h	0.674	3.384	97.321	10.880
	EI, MPt/a	0.005	0.027	0.779	0.087
Recursos Naturales	Combustibles Fósiles	0.527	4.436	322.858	80.054
	Extracción Minera	0.006	0.028	1.833	4.110
	SUMA, Pt/h	0.533	4.464	324.690	84.164
	EI, MPt/a	0.004	0.036	2.598	0.673

Apéndice E. Figura esquema de un proceso de trigeneración general

Esquema de un proceso de un proceso de trigeneración



Apéndice F. Tabla de propiedades de temperatura y composición para T-101 y T-102

Cambio de composición de T-101 en fase vapor para el escenario 1

Column: T-101 / COL1 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane	n-Pentane
Condenser	2.383e-003	0.0000	2.611e-003	0.9950	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1_Main To...	5.022e-003	0.0000	4.366e-003	0.9906	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2_Main To...	8.631e-003	0.0000	6.213e-003	0.9852	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3_Main To...	1.351e-002	0.0000	8.128e-003	0.9784	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4_Main To...	2.001e-002	0.0000	1.007e-002	0.9699	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5_Main To...	2.851e-002	0.0000	1.199e-002	0.9595	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6_Main To...	3.935e-002	0.0000	1.380e-002	0.9468	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7_Main To...	5.280e-002	0.0000	1.540e-002	0.9318	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8_Main To...	6.886e-002	0.0000	1.670e-002	0.9144	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9_Main To...	8.727e-002	0.0000	1.759e-002	0.8951	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10_Main T...	0.1073	0.0000	1.800e-002	0.8747	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11_Main T...	0.1281	0.0000	1.792e-002	0.8540	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12_Main T...	0.1485	0.0000	1.740e-002	0.8341	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13_Main T...	0.1674	0.0000	1.654e-002	0.8161	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14_Main T...	0.1841	0.0000	1.547e-002	0.8005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15_Main T...	0.1982	0.0000	1.431e-002	0.7875	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16_Main T...	0.2098	0.0000	1.316e-002	0.7771	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17_Main T...	0.2190	0.0000	1.210e-002	0.7689	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18_Main T...	0.2261	0.0000	1.116e-002	0.7628	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19_Main T...	0.2315	0.0000	1.035e-002	0.7581	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20_Main T...	0.2357	0.0000	9.674e-003	0.7547	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Buttons: Delete, Column Environment..., Run, Reset, Converged, Update Outlets, Ignored

Cambio de composición de T-101 en fase líquido para el escenario 1

Column: T-101 / COL1 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane	n-Pentane
Condenser	5.738e-003	0.0000	4.843e-003	0.9894	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1_Main To...	1.204e-002	0.0000	8.068e-003	0.9799	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2_Main To...	2.059e-002	0.0000	1.142e-002	0.9680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3_Main To...	3.201e-002	0.0000	1.484e-002	0.9531	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4_Main To...	4.700e-002	0.0000	1.824e-002	0.9348	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5_Main To...	6.625e-002	0.0000	2.147e-002	0.9123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6_Main To...	9.025e-002	0.0000	2.438e-002	0.8854	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7_Main To...	0.1192	0.0000	2.677e-002	0.8541	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8_Main To...	0.1526	0.0000	2.847e-002	0.8190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9_Main To...	0.1893	0.0000	2.933e-002	0.7813	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10_Main T...	0.2277	0.0000	2.932e-002	0.7429	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11_Main T...	0.2657	0.0000	2.851e-002	0.7058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12_Main T...	0.3013	0.0000	2.705e-002	0.6716	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13_Main T...	0.3330	0.0000	2.518e-002	0.6418	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14_Main T...	0.3600	0.0000	2.312e-002	0.6168	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15_Main T...	0.3822	0.0000	2.107e-002	0.5967	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16_Main T...	0.3999	0.0000	1.915e-002	0.5810	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17_Main T...	0.4137	0.0000	1.743e-002	0.5689	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18_Main T...	0.4242	0.0000	1.596e-002	0.5598	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19_Main T...	0.4322	0.0000	1.472e-002	0.5531	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20_Main T...	0.4382	0.0000	1.370e-002	0.5481	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Buttons: Delete, Column Environment..., Run, Reset, Converged, Update Outlets, Ignored

Cambio de composición de T-102 en fase vapor para el escenario 1

Column: T-102 / COL2 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Parameters

Composition Estimates

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane
21_Main T...	0.2625	0.0000	1.826e-002	0.7192	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22_Main T...	0.3419	0.0000	2.875e-002	0.6293	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23_Main T...	0.4677	0.0000	4.477e-002	0.4875	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24_Main T...	0.6170	0.0000	6.308e-002	0.3199	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25_Main T...	0.7439	0.0000	7.792e-002	0.1782	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26_Main T...	0.8251	0.0000	8.664e-002	8.824e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27_Main T...	0.8687	0.0000	9.041e-002	4.085e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28_Main T...	0.8905	0.0000	9.123e-002	1.828e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29_Main T...	0.9015	0.0000	9.047e-002	8.056e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30_Main T...	0.9077	0.0000	8.881e-002	3.523e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31_Main T...	0.9119	0.0000	8.654e-002	1.535e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32_Main T...	0.9156	0.0000	8.377e-002	6.675e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33_Main T...	0.9192	0.0000	8.051e-002	2.898e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34_Main T...	0.9231	0.0000	7.674e-002	1.256e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35_Main T...	0.9275	0.0000	7.240e-002	5.438e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36_Main T...	0.9325	0.0000	6.744e-002	2.348e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37_Main T...	0.9382	0.0000	6.179e-002	1.010e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38_Main T...	0.9446	0.0000	5.539e-002	4.311e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39_Main T...	0.9518	0.0000	4.818e-002	1.812e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40_Main T...	0.9599	0.0000	4.010e-002	7.350e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Reboiler	0.9689	0.0000	3.113e-002	2.719e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Converged

Cambio de composición de T-102 en fase líquida para el escenario 1

Column: T-102 / COL2 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Parameters

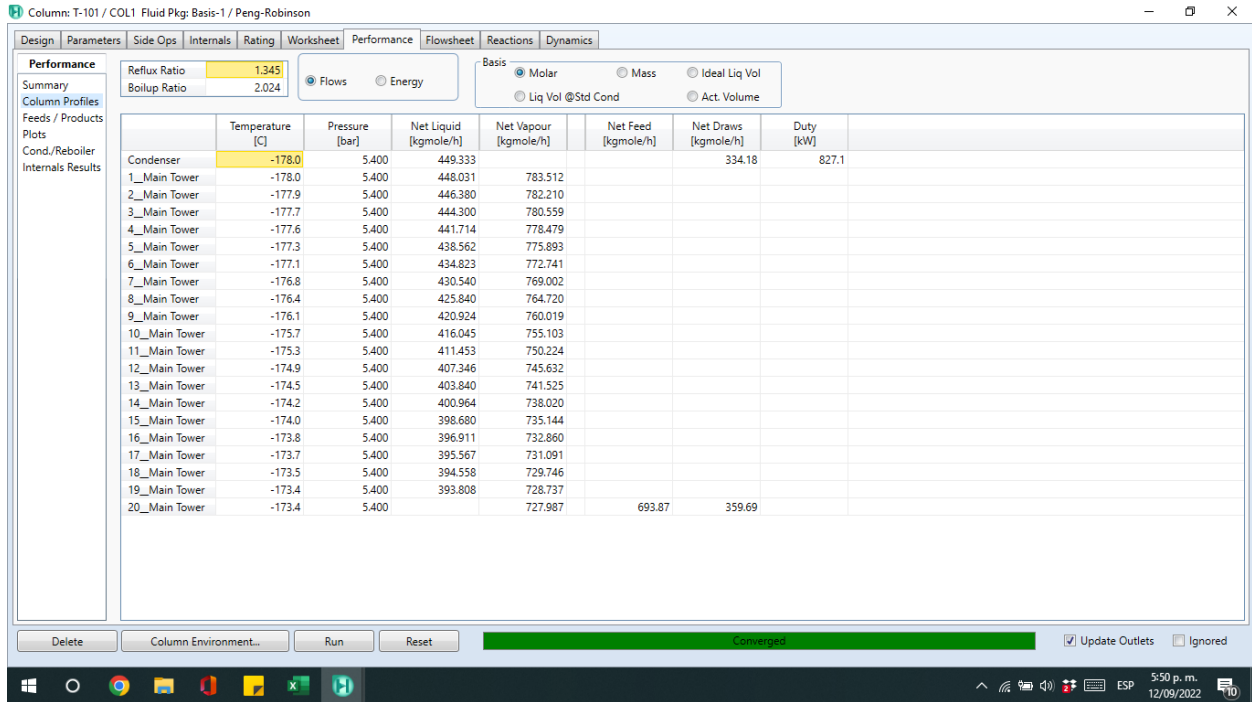
Composition Estimates

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane
21_Main T...	0.5644	0.0000	2.612e-002	0.4095	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22_Main T...	0.6493	0.0000	3.640e-002	0.3143	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23_Main T...	0.7477	0.0000	4.796e-002	0.2043	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24_Main T...	0.8297	0.0000	5.720e-002	0.1131	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25_Main T...	0.8816	0.0000	6.260e-002	5.581e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26_Main T...	0.9093	0.0000	6.492e-002	2.580e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27_Main T...	0.9230	0.0000	6.542e-002	1.154e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28_Main T...	0.9300	0.0000	6.492e-002	5.084e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29_Main T...	0.9339	0.0000	6.387e-002	2.223e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30_Main T...	0.9366	0.0000	6.243e-002	9.686e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31_Main T...	0.9389	0.0000	6.068e-002	4.211e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32_Main T...	0.9412	0.0000	5.862e-002	1.828e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33_Main T...	0.9437	0.0000	5.624e-002	7.928e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34_Main T...	0.9465	0.0000	5.350e-002	3.432e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35_Main T...	0.9496	0.0000	5.037e-002	1.483e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36_Main T...	0.9532	0.0000	4.680e-002	6.393e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37_Main T...	0.9572	0.0000	4.276e-002	2.744e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38_Main T...	0.9618	0.0000	3.821e-002	1.169e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39_Main T...	0.9669	0.0000	3.312e-002	4.902e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40_Main T...	0.9725	0.0000	2.746e-002	1.983e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Reboiler	0.9788	0.0000	2.122e-002	7.313e-008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

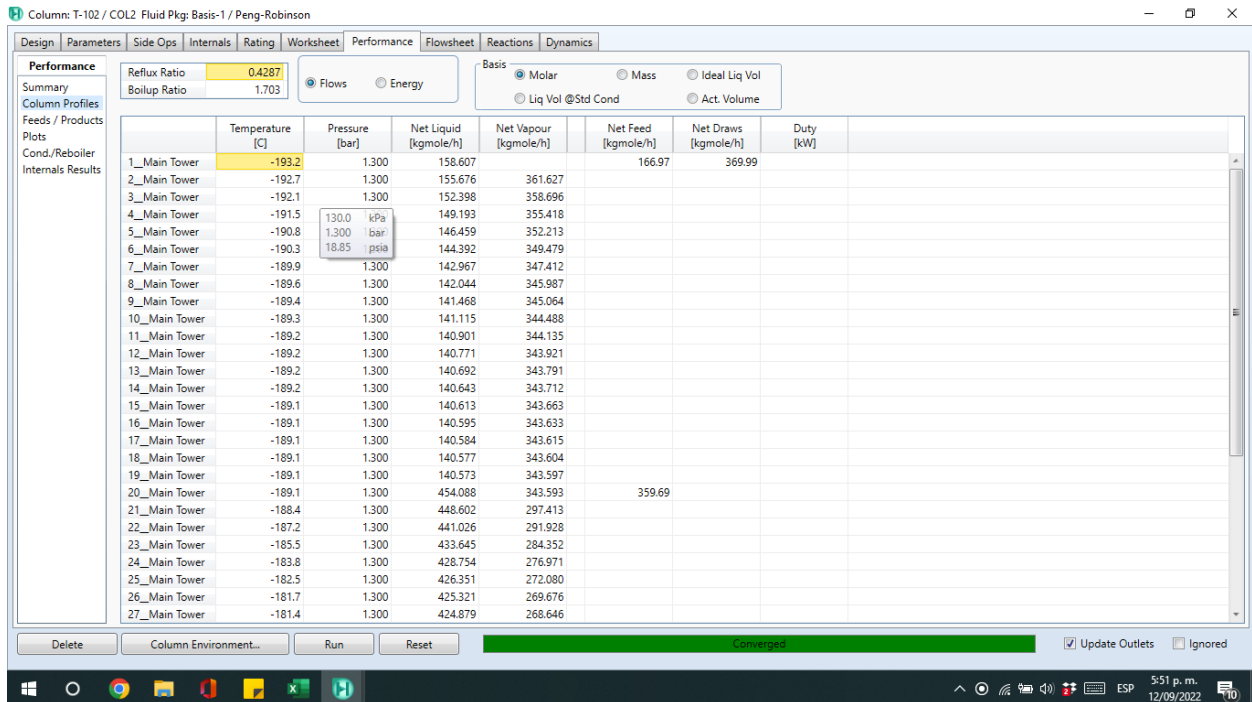
Phase: Vap Liq

Converged

Perfil de temperatura de T-101 para el escenario 1



Perfil de temperatura de T-102 para el escenario 1



Composición de la corriente O2 entrando a GG para el escenario 1

Component	Mass Fraction
Oxygen	0.9736
CO2	0.0000
Argon	0.0264
Nitrogen	0.0000
H2O	0.0000
Methane	0.0000
Ethane	0.0000
Propane	0.0000
i-Butane	0.0000
n-Butane	0.0000
i-Pentane	0.0000
n-Pentane	0.0000
NO	0.0000
NO2	0.0000
SO2	0.0000
H2S	0.0000
SO3	0.0000

Composition Basis: Mass Fractions

Total: 1.0000

Cambio de composición de T-101 en fase vapor para el escenario 2

Stream	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane	n-Pentane
Condenser	1.517e-005	0.0000	9.261e-005	0.9999	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1_Main To...	3.305e-005	0.0000	1.590e-004	0.9998	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2_Main To...	6.171e-005	0.0000	2.409e-004	0.9997	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3_Main To...	1.076e-004	0.0000	3.420e-004	0.9996	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4_Main To...	1.811e-004	0.0000	4.667e-004	0.9994	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5_Main To...	2.989e-004	0.0000	6.204e-004	0.9991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6_Main To...	4.873e-004	0.0000	8.098e-004	0.9987	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7_Main To...	7.887e-004	0.0000	1.043e-003	0.9982	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8_Main To...	1.270e-003	0.0000	1.330e-003	0.9974	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9_Main To...	2.039e-003	0.0000	1.682e-003	0.9963	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10_Main T...	3.262e-003	0.0000	2.112e-003	0.9946	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11_Main T...	5.204e-003	0.0000	2.636e-003	0.9922	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12_Main T...	8.271e-003	0.0000	3.269e-003	0.9885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13_Main T...	1.308e-002	0.0000	4.023e-003	0.9829	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14_Main T...	2.052e-002	0.0000	4.905e-003	0.9746	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15_Main T...	3.186e-002	0.0000	5.904e-003	0.9622	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16_Main T...	4.864e-002	0.0000	6.980e-003	0.9444	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17_Main T...	7.254e-002	0.0000	8.044e-003	0.9194	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18_Main T...	0.1047	0.0000	8.956e-003	0.8864	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19_Main T...	0.1447	0.0000	9.532e-003	0.8458	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20_Main T...	0.1900	0.0000	9.615e-003	0.8004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Cambio de composición de T-101 en fase líquido para el escenario 2

Column: T-101 / COL1 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Parameters

Composition Estimates

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane
Condenser	3.668e-005	0.0000	1.725e-004	0.9998	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1_Main To...	7.993e-005	0.0000	2.961e-004	0.9996	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2_Main To...	1.492e-004	0.0000	4.486e-004	0.9994	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3_Main To...	2.602e-004	0.0000	6.368e-004	0.9991	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4_Main To...	4.379e-004	0.0000	8.688e-004	0.9987	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5_Main To...	7.223e-004	0.0000	1.155e-003	0.9981	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6_Main To...	1.177e-003	0.0000	1.507e-003	0.9973	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
7_Main To...	1.904e-003	0.0000	1.940e-003	0.9962	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8_Main To...	3.065e-003	0.0000	2.472e-003	0.9945	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9_Main To...	4.914e-003	0.0000	3.122e-003	0.9920	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10_Main T...	7.850e-003	0.0000	3.915e-003	0.9882	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
11_Main T...	1.249e-002	0.0000	4.874e-003	0.9826	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
12_Main T...	1.978e-002	0.0000	6.020e-003	0.9742	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
13_Main T...	3.109e-002	0.0000	7.365e-003	0.9615	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
14_Main T...	4.836e-002	0.0000	8.898e-003	0.9427	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
15_Main T...	7.408e-002	0.0000	1.056e-002	0.9154	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
16_Main T...	0.1110	0.0000	1.224e-002	0.8768	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17_Main T...	0.1610	0.0000	1.371e-002	0.8252	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
18_Main T...	0.2242	0.0000	1.469e-002	0.7611	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
19_Main T...	0.2966	0.0000	1.493e-002	0.6885	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
20_Main T...	0.3707	0.0000	1.432e-002	0.6149	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Converged

Cambio de composición de T-102 en fase líquido para el escenario 2

Column: T-102 / COL2 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Parameters

Composition Estimates

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane
21_Main T...	0.6387	0.0000	4.915e-002	0.3121	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22_Main T...	0.7667	0.0000	6.472e-002	0.1685	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23_Main T...	0.8510	0.0000	7.256e-002	7.644e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24_Main T...	0.8945	0.0000	7.402e-002	3.146e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25_Main T...	0.9155	0.0000	7.211e-002	1.238e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26_Main T...	0.9265	0.0000	6.875e-002	4.777e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27_Main T...	0.9334	0.0000	6.478e-002	1.827e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28_Main T...	0.9387	0.0000	6.056e-002	6.957e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29_Main T...	0.9435	0.0000	5.623e-002	2.641e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30_Main T...	0.9480	0.0000	5.186e-002	1.001e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31_Main T...	0.9525	0.0000	4.750e-002	3.782e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32_Main T...	0.9568	0.0000	4.318e-002	1.427e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33_Main T...	0.9611	0.0000	3.891e-002	5.373e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34_Main T...	0.9653	0.0000	3.472e-002	2.019e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35_Main T...	0.9694	0.0000	3.064e-002	7.574e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36_Main T...	0.9733	0.0000	2.668e-002	2.835e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37_Main T...	0.9771	0.0000	2.286e-002	1.058e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38_Main T...	0.9808	0.0000	1.918e-002	3.930e-008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39_Main T...	0.9843	0.0000	1.567e-002	1.446e-008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40_Main T...	0.9877	0.0000	1.233e-002	5.199e-009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Reboiler	0.9908	0.0000	9.171e-003	1.749e-009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Converged

Cambio de composición de T-102 en fase vapor para el escenario 2

Column: T-102 / COL2 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Parameters

Composition Estimates

	Oxygen	CO2	Argon	Nitrogen	H2O	Methane	Ethane	Propane	i-Butane	n-Butane	i-Pentane
21_Main T...	0.3365	0.0000	3.870e-002	0.6248	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
22_Main T...	0.5094	0.0000	6.383e-002	0.4267	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
23_Main T...	0.6820	0.0000	8.572e-002	0.2323	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
24_Main T...	0.7974	0.0000	9.687e-002	0.1058	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
25_Main T...	0.8574	0.0000	9.902e-002	4.359e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
26_Main T...	0.8864	0.0000	9.644e-002	1.716e-002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
27_Main T...	0.9016	0.0000	9.180e-002	6.625e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
28_Main T...	0.9112	0.0000	8.631e-002	2.534e-003	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
29_Main T...	0.9186	0.0000	8.046e-002	9.651e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
30_Main T...	0.9252	0.0000	7.446e-002	3.665e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
31_Main T...	0.9314	0.0000	6.841e-002	1.388e-004	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
32_Main T...	0.9376	0.0000	6.237e-002	5.249e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
33_Main T...	0.9436	0.0000	5.637e-002	1.981e-005	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
34_Main T...	0.9495	0.0000	5.045e-002	7.458e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
35_Main T...	0.9554	0.0000	4.464e-002	2.803e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
36_Main T...	0.9610	0.0000	3.898e-002	1.051e-006	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
37_Main T...	0.9665	0.0000	3.348e-002	3.930e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
38_Main T...	0.9718	0.0000	2.817e-002	1.462e-007	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
39_Main T...	0.9769	0.0000	2.308e-002	5.391e-008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
40_Main T...	0.9818	0.0000	1.820e-002	1.941e-008	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Reboiler	0.9864	0.0000	1.357e-002	6.541e-009	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Phase: Vap Liq

Update Outlets Ignored

Converged

Perfil de temperatura de T-101 para el escenario 2

TRIGEN COMPLETO CO2 NUEVO.hsc - Aspen HYSYS V10 - aspenONE

Column: T-101 / COL1 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Internals Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Performance

Summary

Reflux Ratio: 1.964

Boilup Ratio: 1.720

Basis: Molar Mass Ideal Liq Vol

Liq Vol @Std Cond Act. Volume

	Temperature [C]	Pressure [bar]	Net Liquid [kgmole/h]	Net Vapour [kgmole/h]	Net Feed [kgmole/h]	Net Draws [kgmole/h]	Duty [kW]
Cond./Reboiler Internals Results						334.88	
Condenser	-178.1	5.400	657.846				
1_Main Tower	-178.1	5.400	657.818	992.725			
2_Main Tower	-178.1	5.400	657.781	992.697			
3_Main Tower	-178.1	5.400	657.731	992.660			
4_Main Tower	-178.1	5.400	657.660	992.610			
5_Main Tower	-178.1	5.400	657.555	992.539			
6_Main Tower	-178.1	5.400	657.400	992.435			
7_Main Tower	-178.1	5.400	657.169	992.280			
8_Main Tower	-178.1	5.400	656.823	992.049			
9_Main Tower	-178.1	5.400	656.300	991.702			
10_Main Tower	-178.0	5.400	655.509	991.180			
11_Main Tower	-178.0	5.400	654.306	990.389			
12_Main Tower	-177.9	5.400	652.481	989.185			
13_Main Tower	-177.8	5.400	649.737	987.360			
14_Main Tower	-177.6	5.400	645.686	984.617			
15_Main Tower	-177.4	5.400	639.881	980.566			
16_Main Tower	-177.0	5.400	631.929	974.760			
17_Main Tower	-176.5	5.400	621.716	966.808			
18_Main Tower	-175.8	5.400	609.674	956.595			
19_Main Tower	-175.0	5.400	596.884	944.554			
20_Main Tower	-174.2	5.400	931.763		876.51	541.63	

Search aspenONE Exchange

Risk: 0

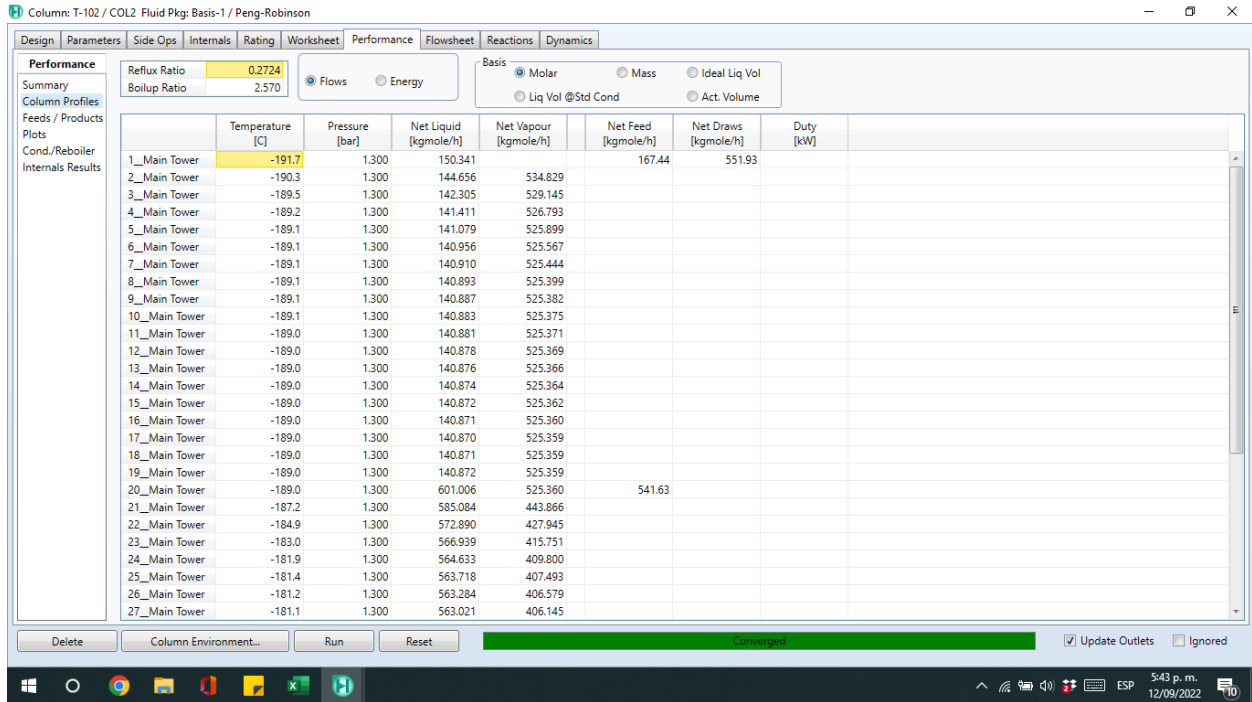
KYCOMBUSTOR UNID

Convergence

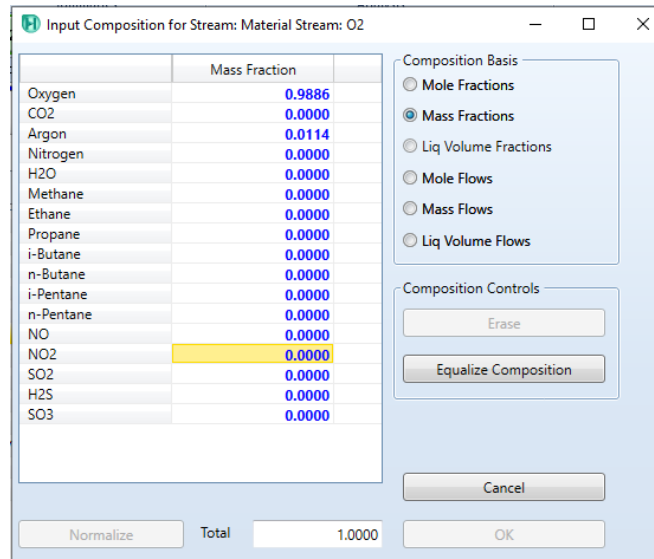
Update Outlets Ignored

5:41 p. m. 12/09/2022

Perfil de temperatura de T-102 para el escenario 2



Composición de la corriente O2 entrando a GG para el escenario 2



Apéndice G. Figuras de temperatura y composición para T-101 y T-102

Gráfico comparativo del perfil de temperatura de T-101 para los casos operativos

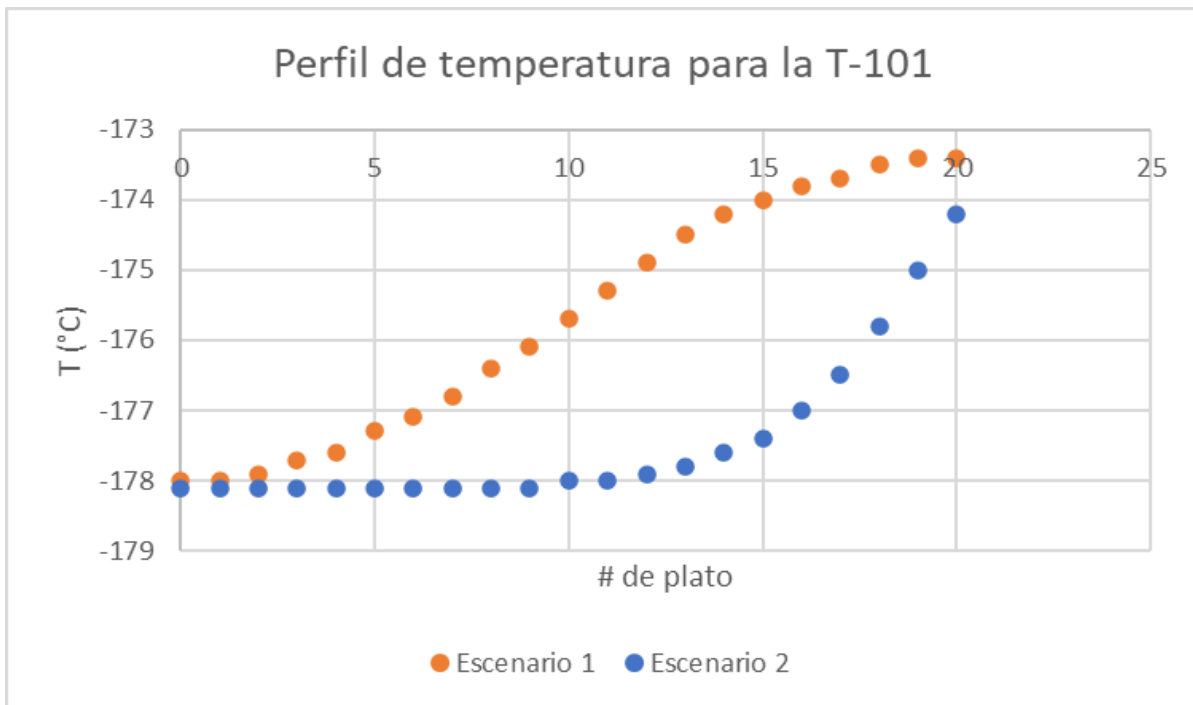


Gráfico comparativo del perfil de temperatura de T-102 para los casos operativos

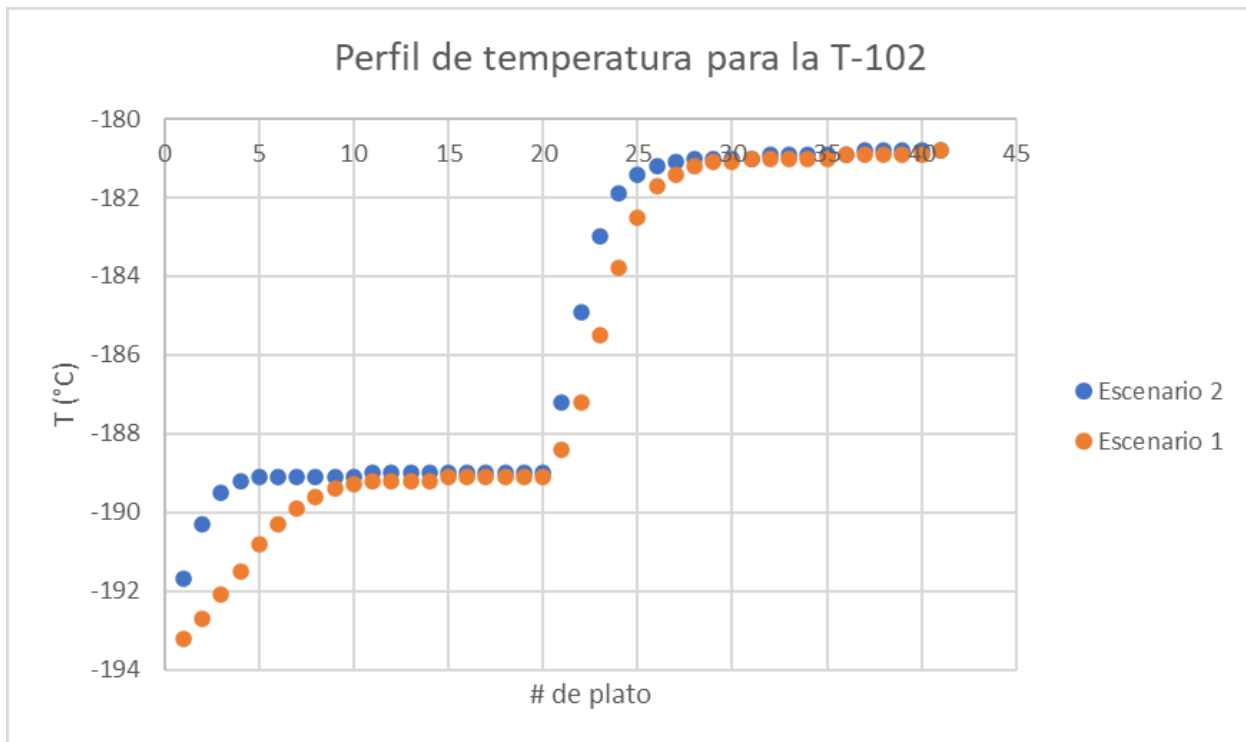


Gráfico comparativo de composición de CO₂ de T-101 para los casos operativos

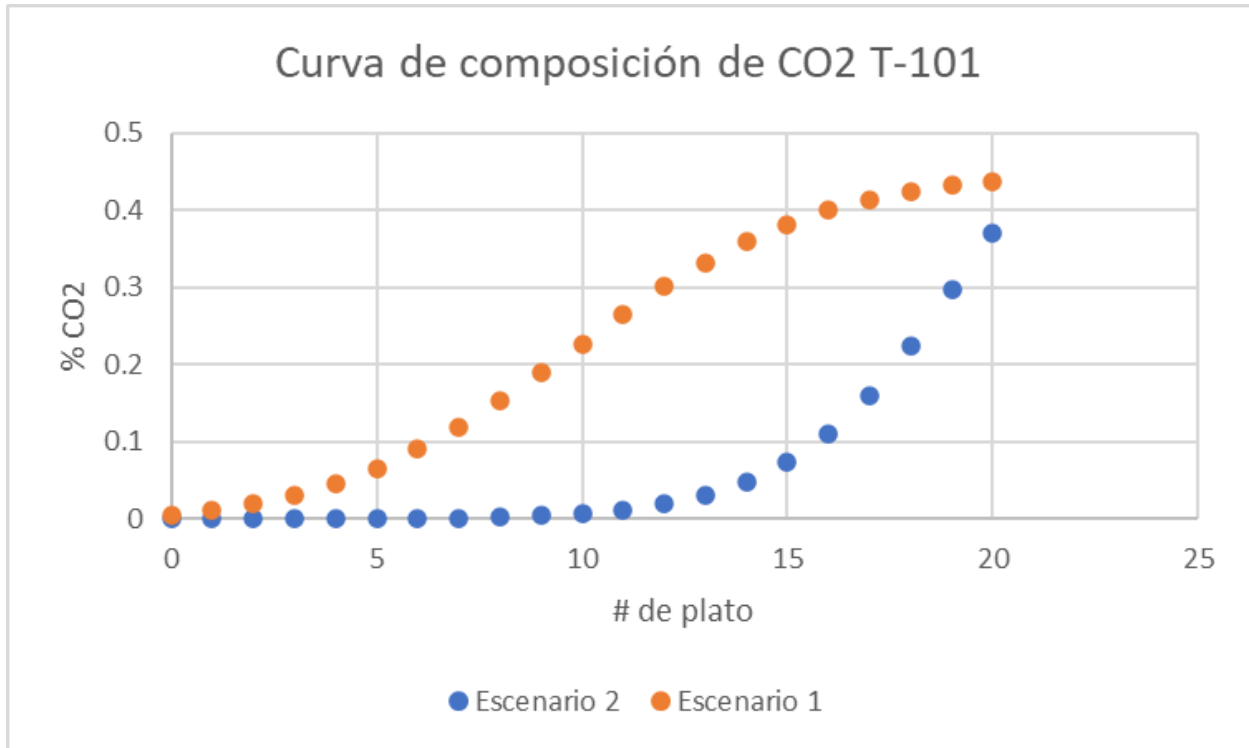
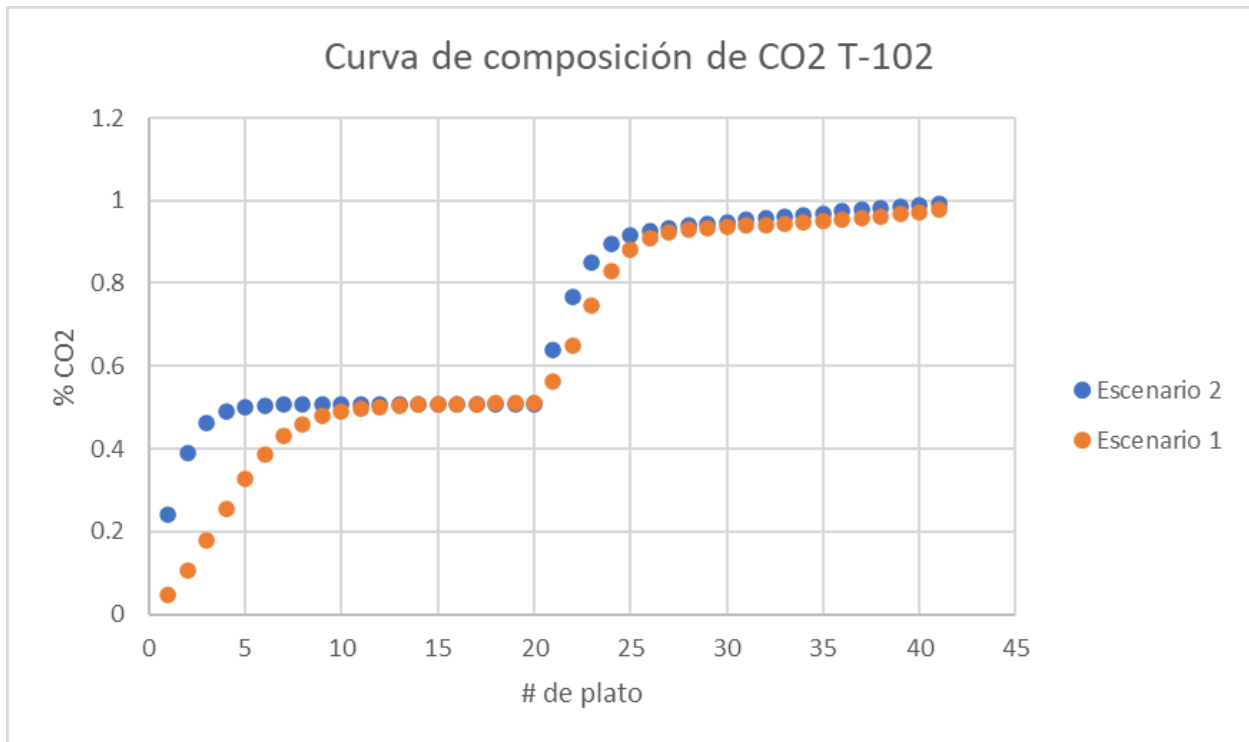


Gráfico comparativo de composición de CO₂ de T-102 para los casos operativos



Corriente	Air-13"	N2-1	N2-2	O2-1
T (°C)	10,00	9,98	25,00	-180,80
P(bar)	1,30	1,20	1,20	1,30
Flujo Molar (kgmol/h)	406,40	573,80	573,80	156,70
Flujo masico (kg/h)	11.480	16.170	16.170	5.039
Flujo Volumetrico (m3/h)	9.604	13.560	13.560	3.700
Composición				
O ₂	0,0341	0,0243	0,0243	0,9794
CO ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ar	0,0076	0,0057	0,0057	0,0206
N ₂	0,9583	0,9700	0,9700	0,0000
H ₂ O	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CH ₄	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
C ₂ H ₈	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Propano	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
iC ₄	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
nC ₄	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
iC ₅	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
nC ₅	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NO	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
NO ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
SO ₂	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
H ₂ S	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
SO ₃	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Apéndice I. Tabla de comparación de reportes literario y simulación

Comparación entre literatura y simulación del proceso de trigeneración

Corriente	Ref.*	Sim.**	Flujo, kg/s			Temperatura, °C			Presion, Bar			% O2 Fracción molar			% N2 Fracción molar		
			Ref.	Sim.	Dif.***	Ref.	Sim.	Dif.	Ref.	Sim.	Dif.	Ref.	Sim.	Dif.	Ref.	Sim.	Dif.
1	Aire	100.00	5.98	94.02	25.00	25.00	0.00	1.00	1.00	0.00	21.00	22.00	1.00	78.00	75.00	3.00	
2	Air-1	100.00	5.98	94.02	143.90	104.40	39.50	2.68	1.98	0.70	21.00	22.00	1.00	78.00	75.00	3.00	
3	Air-1"	100.00	5.98	94.02	30.00	40.00	10.00	2.58	1.98	0.60	21.00	22.00	1.00	78.00	75.00	3.00	
4	Air-2	100.00	5.98	94.02	154.20	106.80	47.40	6.70	3.46	3.24	21.00	22.00	1.00	78.00	75.00	3.00	
5	Air-2"	100.00	5.98	94.02	62.00	40.00	22.00	6.70	3.46	3.24	21.00	22.00	1.00	78.00	75.00	3.00	
12	Air-7	68.00	5.89	62.11	-164.10	-165.20	1.10	6.49	5.40	1.09	21.00	23.00	2.00	78.00	76.00	2.00	
14	Air-10	59.59	3.29	56.30	-171.90	-173.60	1.70	6.49	5.40	1.09	34.77	42.00	7.23	63.84	56.00	7.84	
17	Air-9	40.41	1.30	39.11	-178.60	-178.10	0.50	6.49	5.40	1.09	1.68	0.08	1.60	97.87	99.71	1.84	
15	Air-10'	59.59	3.29	56.30	-180.60	-177.00	3.60	6.39	5.40	0.99	34.77	42.00	7.23	63.84	56.00	7.84	
16	Air-12	59.59	3.29	56.30	-192.50	-189.00	3.50	1.06	1.40	0.34	34.77	42.00	7.23	63.84	56.00	7.84	
18	Air-9'	40.41	1.30	39.11	-185.70	-190.00	4.30	5.07	5.40	0.33	1.68	0.08	1.60	97.87	99.71	1.84	
19	Air-11	40.41	1.30	39.11	-195.50	-192.30	3.20	1.06	1.50	0.44	1.68	0.08	1.60	97.87	99.71	1.84	
20	O2-1	19.02	1.40	17.62	-182.70	-180.80	1.90	1.06	1.30	0.24	99.99	97.94	2.05	0.00	0.00	0.00	
23	Air-13	80.98	3.19	77.79	-194.20	-192.70	1.50	1.06	1.30	0.24	4.69	3.39	1.30	94.21	95.85	1.64	

*Ref. Referencia tomada del autor Ebrahimi & Ziabasharhagh, 2017. **Sim. Simulación del presente proyecto. ***Dif. Diferencia absoluta entre los datos comparables.

Apéndice J. Calculo para la obtención de los Pt/kWh de los escenarios operativos

A partir de los valores de impacto ambiental obtenidos para el escenario operativo 1 y 2 (tabla 6 y apéndice D) se hace la conversión de la casilla Pt/h hacia Pt/kWh mediante el gas natural consumido durante el proceso de trigeneración y la capacidad calorífica alta sin agua, de tal forma que:

$$kWh = W * HHV$$

Reemplazando por la propiedad del gas natural y el valor de la simulación quedaría:

$$kWh = 0,4 \frac{kg}{s} * 47492,382 \frac{kJ}{kg} = 18996,95 kW$$

Ahora para la suma en la categoría salud humana en el escenario operativo 2 se tiene lo siguiente:

$$\frac{Pt}{kWh} = \frac{981,025 \frac{Pt}{h}}{18996,95 kWh} = 0,051 \frac{Pt}{kWh}$$

De igual manera se hace el proceso con los demás valores de la tabla 6 y apéndice D.

Apéndice K Trayectoria e impulsores en el desarrollo de la metodología LCA.

