

HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

Herramienta computacional como respaldo a los estudios de prefactibilidad técnica y  
financiera en proyectos de generación eléctrica con microturbinas de la empresa

Supernova Energy Services S.A.S.

María Fernanda Suárez Pino

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Modalidad Práctica Empresarial

Director

Giovanni Morales Medina

Doctor en Ingeniería Química

Tutor

Alfredo Andrés Guerrero

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

*En primer lugar, a mis padres, Nancy Pino y Edgar Suárez, quienes no solo han sido mi apoyo incondicional, sino también un ejemplo de resiliencia, cada triunfo que he alcanzado se debe a su amor invaluable.*

*A mi hermana, Melissa Suárez, mi compañera de vida y refugio constante, gracias por tus consejos y apoyo a lo largo de este trayecto.*

*Expreso mi gratitud a Wilson Ramírez, quien siempre confió en mí y brindó palabras de motivación que me impulsaron a alcanzar mis metas.*

*Este trabajo también está dedicado a mis amigos, Armando, Cata, Pipe, Sofí, José, Fer, Andrey, Laurita, Aleja, Julián, Jair, Tocayo, Tatis, Liz, Sele, Pau y Dani. Ustedes hicieron de la universidad una de las mejores etapas de mi vida, los llevo siempre en mi corazón.*

*Agradezco a Supernova Energy Services por brindarme la oportunidad de desarrollar mi práctica profesional. En especial, al ingeniero Alfredo Guerrero, esta experiencia contribuyó significativamente a mi crecimiento profesional.*

*Finalmente, mi más sincero agradecimiento al profesor Dr. Giovanni Morales por su invaluable mentoría y dirección a lo largo del desarrollo de este trabajo.*

*María Fernanda Suárez Pino*

**Tabla de contenido**

<b>Introducción .....</b>	<b>11</b>
Descripción de la empresa .....	12
<b>1. Objetivos.....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivo General.....	15
1.2 Objetivos específicos .....	15
<b>2. Marco conceptual .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1 Fase 1. Simulación.....</b>	<b>24</b>
3.1.1. Recopilación de históricos .....	24
3.1.2. Codificación de la simulación estándar .....	24
<b>3.2. Fase 2. Programación del módulo .....</b>	<b>25</b>
3.2.1. Diseño del módulo en Excel .....	25
3.2.2. Validación del módulo.....	25
<b>3.3. Fase 3. Capacitación .....</b>	<b>25</b>
3.3.1. Capacitación al personal del área.....	25
3.3.2. Implementación empresarial del módulo.....	25
3.3.3. Evaluación de resultados.....	26
<b>4. Resultados.....</b>	<b>26</b>

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

<b>4.1. Fase 1. Desarrollo de la simulación .....</b>	<b>26</b>
4.1.1. Análisis de históricos .....	26
4.1.2. Desarrollo de simulación .....	30
4.1.3. Validación de la simulación.....	34
<b>4.2 Fase 2. Programación del módulo .....</b>	<b>35</b>
4.2.1. Programación del módulo en Excel .....	35
4.2.2. Validación del módulo.....	40
<b>4.3. Fase 3. Capacitación .....</b>	<b>43</b>
4.3.1. Capacitación al personal del área.....	43
4.3.2. Implementación empresarial del módulo.....	44
4.3.3. Evaluación de resultados.....	47
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>48</b>
<b>6. Recomendaciones.....</b>	<b>49</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>50</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>53</b>

**Lista de tablas**

Tabla 1. Límites de propiedades energéticas para combustibles .....	22
Tabla 2. Límites de componentes en combustibles.....	23
Tabla 3. Comparativo del rango de condiciones de entrada .....	28
Tabla 4. Comparativos resultados caso base históricos contra simulación.....	34
Tabla 5. Variables de entrada y salida para el diseño de tabla de escenarios.....	36
Tabla 6. Comparativo de rangos de salida históricos y módulo planteado .....	40

### Lista de figuras

Figura 1. Emisiones de CO <sub>2</sub> durante la combustión .....	11
Figura 2. Principales componentes de microturbina comercializada por SES .....	16
Figura 3. Poder calorífico superior vs H/C de principales alcanos.....	17
Figura 4. Límites superiores de composición según tipo de combustible .....	20
Figura 5. Límites inferiores de composición según tipo de combustible .....	21
Figura 6. Variabilidad de datos históricos recopilados .....	26
Figura 7. Esquema 1 de adecuación de gas.....	29
Figura 8. Esquema 2 de adecuación de gas.....	29
Figura 9. Simulación propuesta en Aspen HYSYS del tratamiento de gas .....	30
Figura 10. Gráfica de formación de hidratos corriente 9 .....	33
Figura 11. Gráfica de formación de hidratos corriente 13 .....	33
Figura 12. Formulario para ingreso de condiciones de entrada del gas.....	37
Figura 13. Diseño de formulario para modificar variables operativas.....	38
Figura 14. Interfaz del módulo HyGas .....	39
Figura 15. Comparativo gasto energético del sistema de compresión por caso .....	42
Figura 16. Comparativo gasto energético del sistema de enfriamiento por caso.....	42
Figura 17. Conferencia virtual de capacitación aplicaciones SES.....	43
Figura 18. Perfil de los encuestados .....	44
Figura 19. Respuestas: pregunta 1 encuesta de opinión SES.....	44
Figura 20. Respuestas: pregunta 2 encuesta de opinión SES.....	45
Figura 21. Respuestas: pregunta 3 encuesta de opinión SES.....	45
Figura 22. Respuestas: pregunta 4 encuesta de opinión SES.....	46

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

Figura 23. Carpeta de los archivos del módulo en la base de datos de SES .....47

**Lista de anexos**

Anexo A. Manual de usuario para el módulo HyGas .....	53
Anexo B. Manual técnico del módulo HyGas .....	66

## Resumen

**Título:** Herramienta computacional como respaldo a los estudios de prefactibilidad técnica y financiera en proyectos de generación eléctrica con microturbinas de la empresa Supernova Energy Services S.A.S.\*

**Autor:** María Fernanda Suárez Pino\*\*

**Palabras Clave:** Gas natural, microturbina, pretratamiento de gas, Aspen HYSYS, módulo Excel.

### Descripción:

Supernova Energy Services S.A.S. (SES), con base en Medellín, Antioquia, se dedica a la comercialización de microturbinas Capstone Green Energy. En el desarrollo de sus servicios, SES requiere de la evaluación de pretratamiento de gases para su utilización en microturbinas Capstone. Estas evaluaciones pueden demorar la prestación de los servicios debido a la carencia de simulaciones previas y al aseguramiento de la información.

El presente documento detalla el desarrollo de un módulo en Excel como soporte a las actividades de SES en la evaluación del pretratamiento de gases. La metodología envolvió el análisis de datos históricos, así como la codificación de una simulación en Aspen HYSYS v12. Posteriormente, el módulo en Excel fue codificado y denominado HyGas; la conexión entre Excel y Aspen HYSYS fue definida mediante el complemento *Aspen Simulation Workbook*.

Según los resultados, la simulación codificada en Aspen HYSYS reproduce los datos históricos con un error promedio de 5%. De igual manera, el módulo HyGas reportó una conexión factible con la simulación, facilitando las evaluaciones de los diferentes casos analizados. Por último, el módulo HyGas fue evaluado y aprobado por los ingenieros del área de aplicaciones de la empresa SES.

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela De Ingeniería Química. Director: Giovanni Morales Medina. Ingeniero Químico, Doctor. Tutor: Alfredo Guerrero. Ingeniero Mecánico.

### **Abstract**

**Title:** Computational Tool as Support for Technical and Financial Pre-feasibility Studies in Electric Generation Projects with Microturbines by Supernova Energy Services S.A.S

**Author:** María Fernanda Suárez Pino

**Keywords:** Natural Gas, Microturbine, Gas Pretreatment, Aspen HYSYS, Computational Tool

#### **Description:**

Supernova Energy Services S.A.S. (SES), based in Medellin, Antioquia, is dedicated to the marketing of Capstone Green Energy microturbines. In the development of its services, SES requires the evaluation of gas pretreatment for use in Capstone microturbines. These evaluations can delay the provision of services due to the lack of previous simulations and information assurance.

This document details the development of an Excel module to support SES activities in the evaluation of gas pretreatment. The methodology involved the analysis of historical data, as well as the coding of a simulation in Aspen HYSYS v12. Subsequently, the Excel module was coded and named HyGas; the connection between Excel and Aspen HYSYS was defined through the Aspen Simulation Workbook add-in.

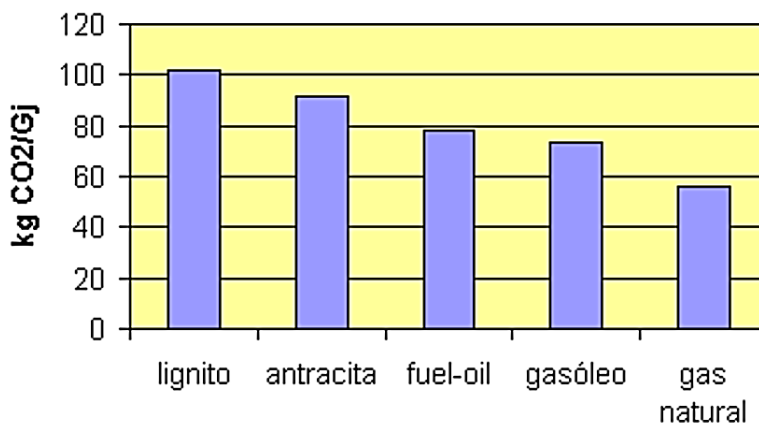
According to the results, the simulation coded in Aspen HYSYS reproduces historical data with an average error of 5%. Similarly, the HyGas module reported a feasible connection with the simulation, facilitating evaluations of the different cases analyzed. Finally, the HyGas module was evaluated and approved by the engineers in the applications área of SES.

## Introducción

El gas natural se ha destacado en los últimos años por ser una fuente de energía que resalta por su versatilidad, eficiencia y menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles (ver figura 1). Esta superioridad se debe a que se ha mostrado más amigable con el medio ambiente en todas sus etapas (extracción, elaboración y transporte) y se posiciona como mejor alternativa en términos de consecuencia atmosféricas debido a que genera una menor cantidad de residuos durante la combustión lo que permite que se use de forma directa en los procesos productivos; caso contrario ocurre con el crudo al cual se le deben aplicar una serie de tratamientos de refinación para su aprovechamiento (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.).

### Figura 1

*Emisiones de CO<sub>2</sub> durante la combustión*



*Nota.* Tomado de (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.)

Para que el gas natural se pueda comercializar se deben cumplir las especificaciones presentes en la resolución CREG-071 de 1999 o Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT) (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2023). En varios casos adecuar este gas supone

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

un alto costo por las tecnologías que se requerirían, como el endulzamiento con aminas, absorción con glicoles, separación con membranas y adsorción con alúmina o gel de sílice (Amaya Amaya, 2019). Por lo anterior, en los estudios de prefactibilidad, una herramienta computacional que ayude en el análisis de los pretratamientos de gas natural supondría un ahorro en tiempos y recursos. En este sentido la empresa Supernova Energy Services (SES) presenta una oportunidad para desarrollar su propia herramienta computacional en estudios de prefactibilidad relacionados con el aprovechamiento del gas natural con microturbinas.

Diariamente la empresa SES atiende solicitudes de clientes que requieren equipos de generación para sus procesos, por lo cual, la empresa envía propuestas que incluyen un análisis de prefactibilidad técnica y financiera con aplicación de microturbinas. Las microturbinas que comercializa SES aprovechan la combustión del gas para generar energía eléctrica, mientras la energía térmica de los gases de escape es utilizada en proyectos de cogeneración. Una ventaja significativa de estos equipos es que no requieren especificaciones de gas natural estrictas como las establecidas en el RUT (Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2023). Sin embargo, ante incumplimiento de las especificaciones de fábrica, SES acude a una empresa externa, la cual define el pretratamiento para los gases. No obstante, los costos y los tiempos de respuesta de la empresa externa disminuyen la competitividad de SES. Por lo anterior, el presente documento propone el desarrollo de una herramienta computacional como respaldo a los estudios de prefactibilidad técnica y financiera en proyectos de generación eléctrica, capitalizando la oportunidad definida en la empresa SES.

### **Descripción de la empresa**

La empresa Supernova Energy Services S.A.S (SES), con sede en Medellín, fue fundada en 1993 como distribuidor de la tecnología de LG Electronics, destacándose como líder en el

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

mercado de aires acondicionados. En 2008, la empresa expandió su oferta al empezar a proporcionar soluciones integrales de climatización bajo el modelo ESCO. Al año siguiente, en 2009, incursionaron como distribuidores de Capstone Turbine Corporation, reconocida por su tecnología innovadora aplicada a microturbinas de 65 kW y 200 kW (Supernova Energy Services, 2023). Estas microturbinas tienen la capacidad de trabajar de manera modular, permitiendo alcanzar potencias rentables de hasta 3MW. Esto los llevó a ser nombrados, en 2010, distribuidores exclusivos para Colombia y Venezuela de la tecnología de Microturbinas Capstone.

**Misión:** Supernova Energy Services se enfoca en la comercialización de la tecnología de Microturbinas Capstone y la oferta de servicios relacionados con eficiencia energética, proyectos llave en mano, así como Ingeniería Básica y de Detalle destinada a proyectos de cogeneración, trigeneración y asistencia técnica.

**Visión:** La meta para el 2026 es ser reconocidos a nivel nacional e internacional por la oferta de soluciones integrales en generación y cogeneración, así como por la optimización energética y la evaluación de proyectos adaptados a las necesidades energéticas de los clientes. Se busca fomentar el uso de tecnologías limpias y sostenibles, aportando un impacto favorable en aspectos ambientales, económicos y de confiabilidad.

Durante los más de 10 años de colaboración con Capstone, han instalado más de 15MW en Colombia, distribuidos en más de 16 proyectos, y más de 5.5MW en Venezuela, acumulando más de 2,000,000 de horas de operación en estos dos países.

Además de la asociación con Capstone, SES ha establecido una alianza estratégica en el último año con Baker Hughes, expertos en generación eléctrica con turbinas de gran potencia

HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES (superior a 5MW). Esta asociación ha permitido expandirse hacia sectores que podrían resultar poco competitivos con la tecnología Capstone.

Adicionalmente, SES cuenta con aliados que complementan las soluciones energéticas ofrecidas. Entre ellos se encuentran Chillers de Absorción de la marca World Energy, Calderas y recuperadores de calor suministrados por Alfa Laval, compresores para gas de pozo por Strotech y sistemas de compresión de gas natural y biogás proporcionados por BioKomp (Supernova Energy Services, 2023).

## 1. Objetivos

**1.1 Objetivo General:** Desarrollar una herramienta computacional para el análisis del pretratamiento de gases basada en una simulación con el software comercial Aspen HYSYS como apoyo a los estudios de prefactibilidad técnica y financiera en proyectos de generación eléctrica con microturbinas de la empresa Supernova Energy Services S.A.S.

### 1.2 Objetivos específicos:

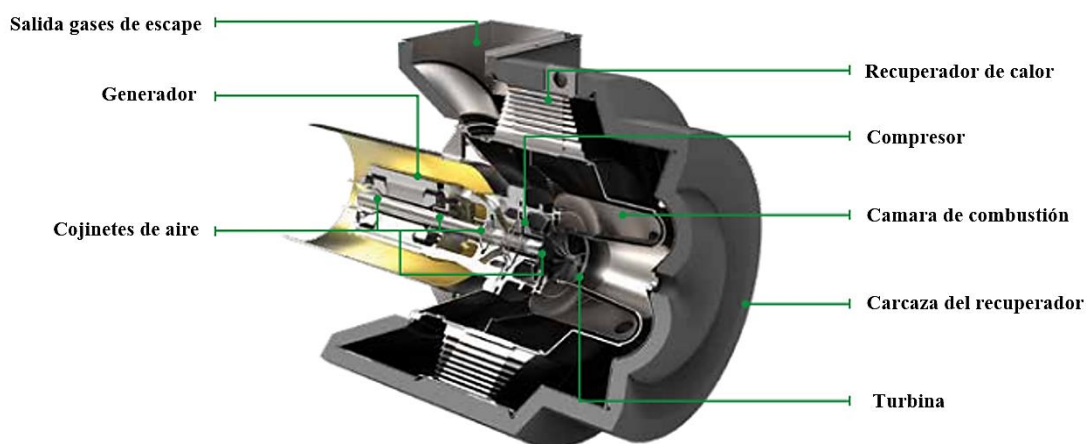
- Codificar una simulación en Aspen HYSYS que considere el pretratamiento del gas natural, con base a los históricos suministrados por Supernova como insumo para la herramienta computacional.
- Diseñar la herramienta computacional en un módulo de Excel, utilizando macros VB como interfaz de ejecución de la simulación desarrollada, facilitando la evaluación del pretratamiento del gas.
- Capacitar a los ingenieros del área de aplicaciones de la empresa Supernova Energy Services S.A.S en la implementación del módulo, definiendo diferentes ejemplos de aplicación, así como el uso de los valores de salida.

## 2. Marco conceptual

La generación de energía eléctrica mediante microturbinas se presenta como una alternativa valiosa para mejorar la eficiencia energética en procesos industriales, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y disminuir el consumo de energía primaria en proyectos de cogeneración y trigeneración (Velasco, 2009). Estas microturbinas destacan por su versatilidad al ser funcionales con una amplia gama de combustibles, incluyendo gases que no cumplen con las especificaciones para ser inyectados en gaseoductos debido a restricciones en sus propiedades fisicoquímicas (Hernandez Mena & Gómez Meyer). Su principio funcional se basa en la presencia de un compresor, cámara de combustión, turbina, alternador, recuperador y generador (ver figura 2).

### Figura 2

*Principales componentes de microturbina comercializada por SES*



*Nota.* Adaptado de (Capstone Green Energy Corporation, 2023)

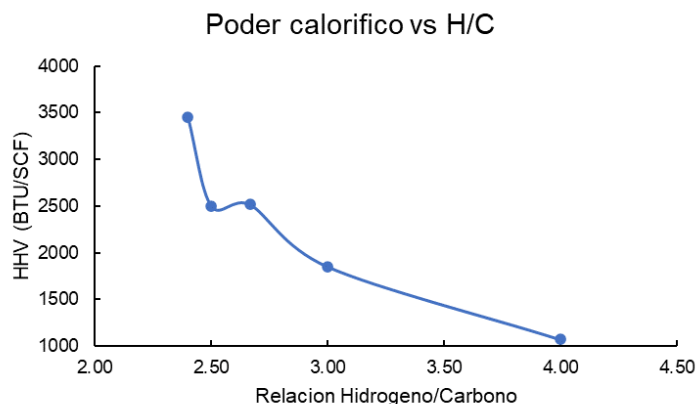
Una microturbina opera de manera similar a una turbina convencional. En primer lugar, el gas de combustión se expande, generando energía mecánica que impulsa el compresor y el generador eléctrico a través de un eje rotativo. Algunas microturbinas incorporan sistemas de

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

recuperación que permiten aprovechar la energía térmica de los gases de escape (Hernandez Mena & Gómez Meyer). El rendimiento y la integridad de estas unidades están influenciados por las propiedades fisicoquímicas del gas utilizado y restricciones establecidas por el fabricante. Uno de los factores limitantes es el índice de Wobbe, también conocido como parámetro de eficiencia energética que representa la relación entre el poder calorífico superior o en inglés *Higher Heating Value* (HHV) y la raíz cuadrada de la densidad relativa del combustible (Meriño Stand, 2015); un índice de Wobbe más alto implica un mayor contenido energético, lo cual, según la aplicación correspondiente, tiene el potencial de mejorar el rendimiento en el proceso de combustión. Otro parámetro relevante en términos de seguridad y prevención de daños en los equipos es el número de metano. Este número indica que a medida que aumenta la proporción de metano en el combustible, disminuye el riesgo de daños debido a la resistencia a la autoignición (Meriño Stand, 2015). La figura 3 ilustra la variación del poder calorífico superior en relación con el incremento de la relación hidrógeno/carbono. Según esta figura, a medida que la relación H/C aumenta, el poder calorífico volumétrico disminuye.

**Figura 3**

*Poder calorífico superior vs H/C de principales alcanos*



*Nota.* Elaborado por el autor con base en datos del simulador de uso libre COCO (AmsterCHEM, 2024).

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

La figura 3 soporta la importancia de la composición de metano, ya que su baja capacidad calorífica lo posiciona como una variable fundamental en la evaluación de la calidad del gas destinado a las microturbinas. A menor composición de metano y mayor composición de hidrocarburos pesados, mayor será el poder calorífico neto del gas y existirán mayores riesgos operativos como la autoignición. No obstante, hay combustibles de alto poder calorífico, como el propano y el GLP, que se utilizan ampliamente debido a su facilidad de transporte, ya que pueden comprimirse y distribuirse en estado líquido.

El rango crítico de HHV para las turbinas distribuidas por SES, en el cual la operatividad de los equipos se ve comprometida, abarca desde 1275 Btu/ft<sup>3</sup> (47.5 MJ/m<sup>3</sup>) hasta 2450 Btu/ft<sup>3</sup> (91.3 MJ/m<sup>3</sup>). Esta limitación se debe a la elevada presencia de hidrocarburos pesados, los cuales pueden provocar condensación en la cámara de combustión. Cuando se supera el límite superior, se utiliza combustible tipo GLP (Gas Licuado de Petróleo) y propano. Los gases que no cumplen con las propiedades mencionadas deben ser sometidos a un pretratamiento. Este pretratamiento comúnmente consiste en retirar hidrocarburos pesados que por su temperatura de ebullición son fácilmente condensables y que por su elevado poder calorífico afectan la operación de las turbinas. Entre los pretratamientos se encuentran (Martínez Medina, 2021):

- **Procesos criogénicos:** En estos sistemas, se establece un contacto entre un refrigerante de alto punto de ebullición y el gas de pozo para condensar hidrocarburos pesados, los cuales tienen una temperatura de rocío superior en comparación con los hidrocarburos más ligeros. Entre los refrigerantes utilizados para estos procesos se encuentran los glicoles, como el etilenglicol, y mezclas como el agua-trietilenglicol, que ajusta el punto de rocío del agua (Amaya Amaya, 2019; Vargas-Reyes et al., 2023). La selección del refrigerante se basa en variables de

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

operación tales como la temperatura, la presión y factores económicos, los cuales pueden tener un impacto significativo en la rentabilidad del proyecto.

- **Compresión Mecánica:** Esta operación implica un aumento de presión que facilita la condensación de hidrocarburos pesados. Estos, al incrementar la presión, aumenta la temperatura de saturación, lo que facilita la condensación. Para llevar a cabo el proceso de compresión, se utilizan diversos equipos que aplican principios operativos distintos. Entre los compresores empleados se encuentran los tipos centrífugos, reciprocantes y rotatorios, como los de tipo tornillo o paleta (Freile, 2007). Un requisito fundamental para que el gas ingrese a estos equipos es la ausencia de líquidos. Para garantizar esto, se somete la corriente de gas a una etapa de saturación con agua y, posteriormente, se hace pasar por un separador despojador (*Scrubber*) con el fin de eliminar cualquier presencia de agua libre en el gas (Aranea, Domínguez, & Perugachi, 2012).

Uno de los problemas operativos más comunes en este tipo de tratamientos es la formación de hidratos, los cuales son depósitos sólidos que se producen debido a la presencia de agua, temperaturas bajas y presiones altas, estos hidratos suponen un gran problema ya que obstruyen líneas de flujo y generan costos adicionales (Meza Ortega & Torrado Bayona, 2018). Por lo anterior, es importante tener en cuenta las condiciones operativas en los pretratamientos de gases.

Los pretratamientos aplicados deben conducir a que los gases cumplan las condiciones aceptables para su uso en las turbinas Capstone Green Energy; estas condiciones son presentadas en las tablas 1 y 2. En estas tablas se muestran las distinciones y clasificación de combustible que realiza la fábrica. En la Tabla 1 se establecen los límites en términos de poder calorífico e índice de Wobbe. De manera general, a mayor densidad del combustible mayor poder calorífico e índice de Wobbe.

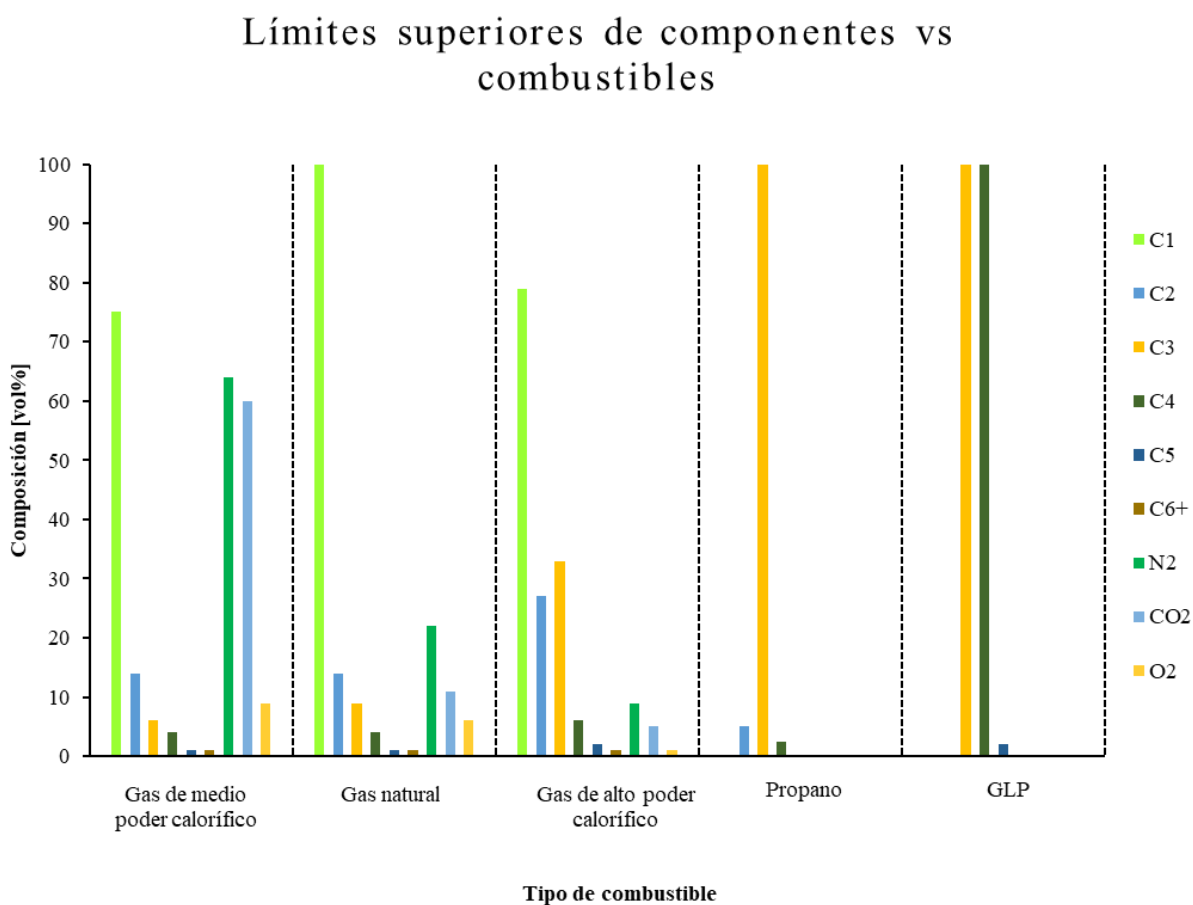
## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

Por otro lado, la Tabla 2 define límites en la composición volumétrica de diversos combustibles. Para el gas natural se requiere un mínimo del 50% de metano, valores máximos del 14% de etano, 9% de propano, 4% de butano, 1% de pentano, 1% de compuestos C<sub>6</sub>+, 22% de nitrógeno, 11% de dióxido de carbono y 6% de oxígeno. En la figura 4, se presentan los límites superiores para los combustibles definidos por Capstone.

Los gases de poder calorífico medio están definidos por su composición de N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Estos gases, por su aporte nulo, disminuyen el poder calorífico de la mezcla.

**Figura 4**

*Límites superiores de composición según tipo de combustible*



*Nota.* Adaptado de (Capstone Green Energy Corporation, 2023)

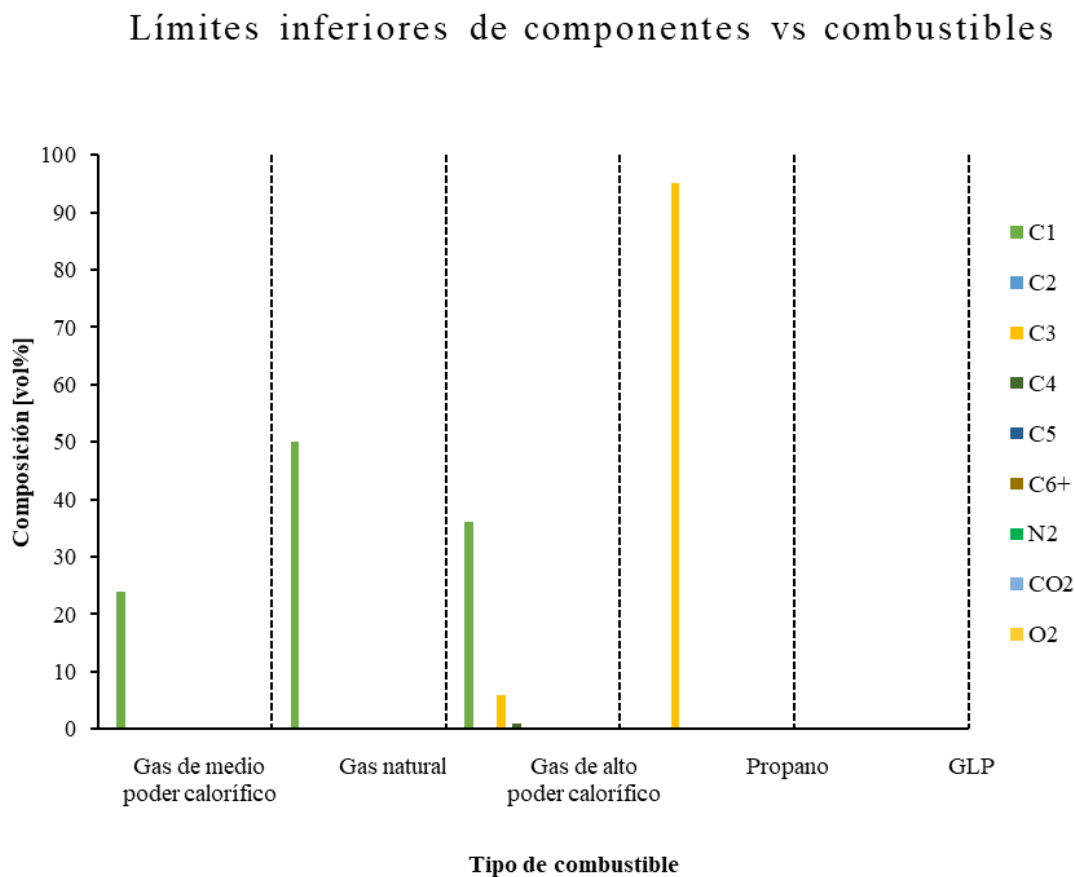
## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

La Figura 5 presenta los límites inferiores que deben asegurarse para el aprovechamiento de combustibles en turbinas Capstone. Observando la figura 5, se deduce que el uso de gases de medio poder calorífico, natural y de alto poder calorífico requiere una composición mínima de metano. Esta composición mínima es mayor para el gas natural (50 vol%) y menor para el gas de medio poder calorífico (24 vol%).

En contraste, el propano permite hasta un 5% de impurezas, es decir, componentes distintos al propano. Como se evidencia en la figura 4, este combustible admite composiciones que incluyen etano y butano.

### Figura 5

*Límites inferiores de composición según tipo de combustible*



*Nota.* Adaptado de (Capstone Green Energy Corporation, 2023)

**Tabla 1***Límites de propiedades energéticas para combustibles*

Combustibles	Propiedades de calentamiento del gas [HHV]			
	Poder Calórico		Índice de Wobbe	
	Btu/ft <sup>3</sup> (MJ/m <sup>3</sup> )		Btu/ft <sup>3</sup> (MJ/m <sup>3</sup> )	
	LI	LS	LI	LS
<b>Gas de medio poder calorífico</b>	350 (13.0)	875 (32.6)	348 (13.0)	1,021 (38.0)
Type-A	350 (13.0)	600 (22.4)	348 (13.0)	706 (26.3)
Type-B	550 (20.5)	875 (32.6)	552 (20.6)	1,021 (38.0)
<b>Gas Natural</b>	825 (30.7)	1,275 (47.5)	877 (32.7)	1,444 (53.8)
<b>Gas de alto poder calorífico</b>	1,250 (46.6)	1,811 (67.5)	1,329 (49.5)	1,741 (64.9)
<b>Propano</b>	2,450 (91.3)	2,550 (95.0)	2,025 (75.4)	2,046 (76.2)
<b>GLP (Gas Licuado de Petróleo)</b>	2,450 (91.3)	3,436 (128.0)	2,025 (75.4)	2,046 (76.2)
GLP-A	2,450 (91.2)	2,850 (106.2)	2,025 (75.4)	2,200 (82.0)
GLP-B	2,812 (104.8)	3,436 (128.0)	2,147 (80.0)	2,423 (90.3)

*Nota.* Adaptado de (Capstone Green Energy Corporation, 2023)

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

**Tabla 2***Límites de componentes en combustibles*

Combustible	Límite de composición del gas [vol. %]												
	C1		C2		C3		C4		C5	C6	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
	LI	LS	LS	LI	LS	LI	LS	LS	LS	LS	LS	LS	LS
<b>Gas de medio poder calorífico</b>	24	75	14	0	6.0	0	4.0	1.0	1.0	64	60	9.0	
<b>Type-A</b>	24	59	3.0	0	2.0	0	1.0	0.5	0.5	64	60	9.0	
<b>Type-B</b>	55	75	14	0	6.0	0	4.0	1.0	1.0	10	41	3.0	
<b>Gas Natural</b>	50	100	14	0	9.0	0	4.0	1.0	1.0	22	11	6.0	
<b>Gas de alto poder calorífico</b>	36	79	27	6.0	33	1.0	6.0	2.0	1.0	9.0	5.0	1.0	
<b>Propano</b>	0	0.1	5.0	95	100	0	2.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	
<b>GLP (Gas Licuado de Petróleo)</b>	0	0.1	0.1	0	100	0	100	2.0	0.1	0.1	0.1	0.1	
<b>GLP-A</b>	0	0.1	0.1	58	100	0	40	2.0	0.1	0.1	0.1	0.1	
<b>GLP-B</b>	0	0.1	0.1	0	58	40	100	2.0	0.1	0.1	0.1	0.1	

*Nota.* Adaptado de (Capstone Green Energy Corporation, 2023)

### 3. Metodología

Para cumplir con los objetivos planteados, se propuso el siguiente esquema metodológico, el cual se divide en tres fases:

#### 3.1 Fase 1. Simulación

##### 3.1.1. *Recopilación de históricos*

Se comenzó por identificar los formatos que Supernova utiliza para analizar gases y cómo reciben y transmiten la información de los clientes. Semanalmente, se recibe al menos una cromatografía, que se analiza primero con una herramienta propia de Supernova. Esta herramienta ayuda a identificar los gases que necesitan tratamiento, los compuestos que superan los límites del fabricante, el poder calorífico y otras propiedades. La recopilación de históricos se efectuó mediante la inspección de cromatografías y diseños de sistemas de pretratamiento de gases suministrados por Supernova Energy Services S.A.S y el aliado de Supernova para el diseño y suministro de equipos de tratamiento de gases.

##### 3.1.2. *Codificación de la simulación estándar*

Se desarrolló de simulación usando el software Aspen HYSYS basándose en los aspectos repetitivos presentes en los históricos suministrados por la empresa. El diagrama obtenido en HYSYS abarca el tratamiento básico para gases con alto contenido de hidrocarburos y así mismo alto poder calorífico. Adicionalmente se analizaron mediante la herramienta de HYSYS “*Stream Analysis*” las condiciones de presión y temperatura a las que se forman hidratos en las principales corrientes de riesgo.

## **3.2. Fase 2. Programación del módulo**

### ***3.2.1. Diseño del módulo en Excel***

Se programó el módulo usando macros de VBA y el complemento de Aspen HYSYS en Excel (*Aspen Workbook Simulation*) para efectuar la conexión entre los programas.

### ***3.2.2. Validación del módulo***

Se llevó a cabo una validación del correcto funcionamiento del módulo comparando los resultados de 10 casos analizados en registros históricos con la simulación realizada por el módulo. Para evaluar la desviación entre los resultados de históricos y los estimados, se calcularon los errores individuales para cada caso, luego se utilizó el concepto de error RMSE (Root Mean Square Error). Este método permite cuantificar las diferencias entre los valores de un modelo o estimador y los valores observados, siendo especialmente sensible a errores significativos.

## **3.3. Fase 3. Capacitación**

### ***3.3.1. Capacitación al personal del área***

Se efectuó una capacitación del módulo, manejo e implementación dirigida a los ingenieros del área de aplicaciones de Supernova Energy Services.

### ***3.3.2. Implementación empresarial del módulo***

Se realizó la puesta en marcha del módulo en Supernova Energy Services para apoyar los análisis de prefactibilidad y disminuir tiempos de respuesta a los posibles clientes. Al finalizar esta etapa se realizó una encuesta para conocer la opinión y recomendaciones de los ingenieros del área de aplicaciones.

### 3.3.3. Evaluación de resultados

Se consideraron las recomendaciones, inquietudes y opiniones para mejorar el módulo, además de utilizarlas en el desarrollo de los manuales de usuario y técnico. Estos manuales estarán disponibles como recursos de apoyo para los usuarios que utilicen el módulo en el futuro.

## 4. Resultados

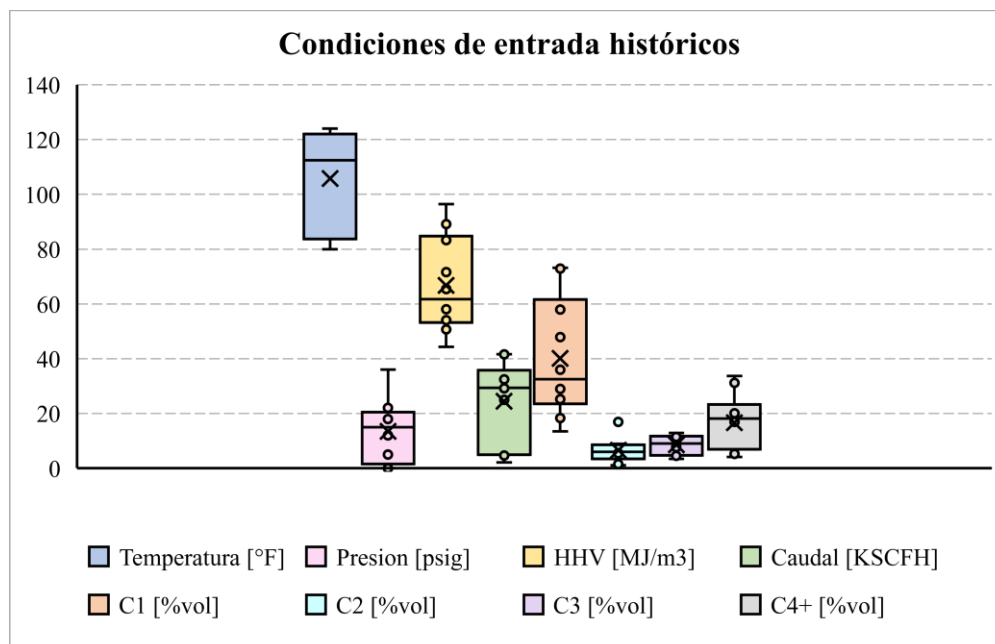
### 4.1. Fase 1. Desarrollo de la simulación

#### 4.1.1. Análisis de históricos

Un total de 10 casos históricos de la empresa SES fueron recopilados para el desarrollo del módulo. Estos casos fueron definidos por las variables de temperatura, presión, caudal, composición volumétrica y poder calorífico del gas. La figura 6 presenta el diagrama de caja y bigotes de las propiedades del gas en cada caso.

**Figura 6**

*Variabilidad de datos históricos recopilados*



## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

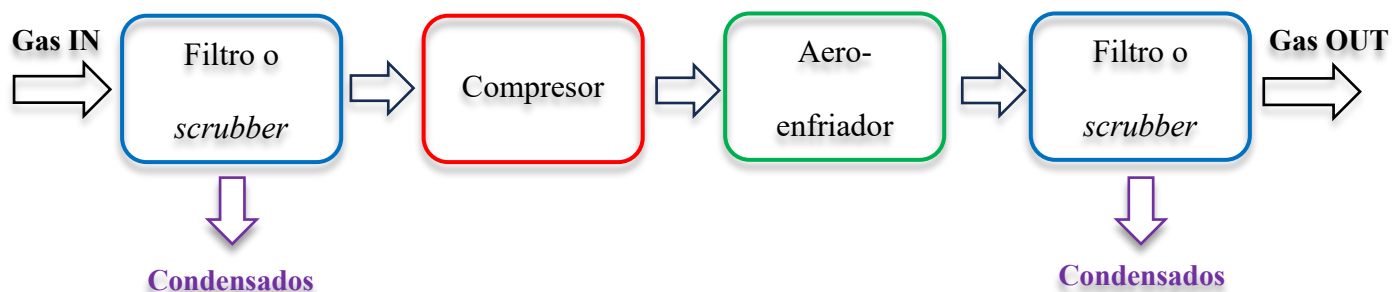
De la figura 6 se puede observar que para cada variable existe un rango definido, con mayor dispersión en la temperatura [80°F, 124°F], HHV [44MJ/m<sup>3</sup>, 96 MJ/m<sup>3</sup>], caudal [2 KSCFH, 41 KSCFH] y composición de metano [13%vol, 73%vol]. Únicamente se perciben datos atípicos para la composición de etano, los cuales se le atribuyen a la naturaleza del gas. La variable que menos fluctúa corresponde al porcentaje en volumen del propano, variando entre el 3% y el 13%. Esta estabilidad puede atribuirse a las características del campo de las muestras de gas de los casos analizados.

De los 10 casos recopilados se eligió uno como caso base a elección de SES. El caso corresponde a un gas de pozo petrolero en el departamento de Huila el cual presenta condiciones intermedias dentro del rango de históricos. El principal problema del gas es el exceso de hidrocarburos pesados, sobrepasando el límite de composición C<sub>4+</sub>, lo cual genera el riesgo de condensación en las microturbinas. La Tabla 3 muestra los rangos identificados en los históricos para las variables principales de los gases a tratar. Estos presentan un exceso en la composición de hidrocarburos pesados C<sub>4+</sub> y un alto poder calorífico (>44.36 MJ/m<sup>3</sup>), lo que indica que estos gases son propicios para someterse a un pretratamiento con el objetivo de reducir la presencia de estos compuestos pesados.

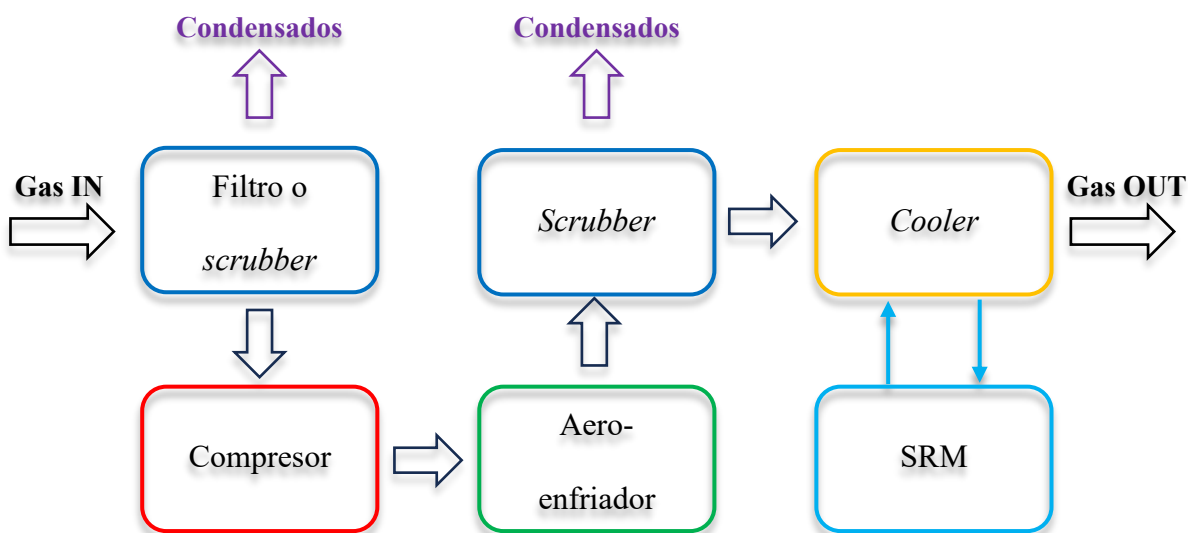
**Tabla 3***Comparativo del rango de condiciones de entrada*

Variable gas	Rango de entrada históricos		Caso Base
	Mínimo	Máximo	Entrada
Temperatura (°F)	80	124	113
Presión (psig)	0	36	36
Caudal (MMSCFD)	0.05	1	0.8120
Composición molar Metano	0.1344	0.7312	0.7312
Composición molar Etano	0.0104	0.1686	0.0405
Composición molar Propano	0.0341	0.1288	0.0455
Composición molar n-Butano	0.0206	0.1180	0.0206
Composición molar n-Pentano	0.0059	0.0810	0.0059
Composición molar n-Hexano	0.0014	0.0873	0.0057
Composición molar n-Heptano	0	0.0657	0.0057
Composición molar n-Octano	0	0.0296	0.0031
Composición molar CO <sub>2</sub>	0.0014	0.3869	0.1059
Composición molar Nitrógeno	0.0061	0.1409	0.0073
Fracción de vapor	0.8831	1	0.9984
HHV (MJ/m <sup>3</sup> )	44.36	96.41	44.36

En los casos históricos, la adecuación de gases con alto contenido de hidrocarburos pesados y condensables fue realizada con un sistema con compresión, aero-enfriador y los respectivos *scrubbers* para la recuperación de condensados. Lo anterior se ilustra en la figura 7.

**Figura 7***Esquema 1 de adecuación de gas*

Asimismo, en los casos históricos un segundo esquema de tratamiento, análogo al anterior con la adición de un sistema de refrigeración mecánica (SRM), fue utilizado en la recuperación de un compuesto liviano en específico. Este esquema de tratamiento es mostrado en la figura 8.

**Figura 8***Esquema 2 de adecuación de gas*

A los esquemas mostrados anteriormente se les puede hacer ajustes adicionando etapas de compresión o enfriamiento, pero en general se mantienen las tecnologías y secuencias ilustradas.

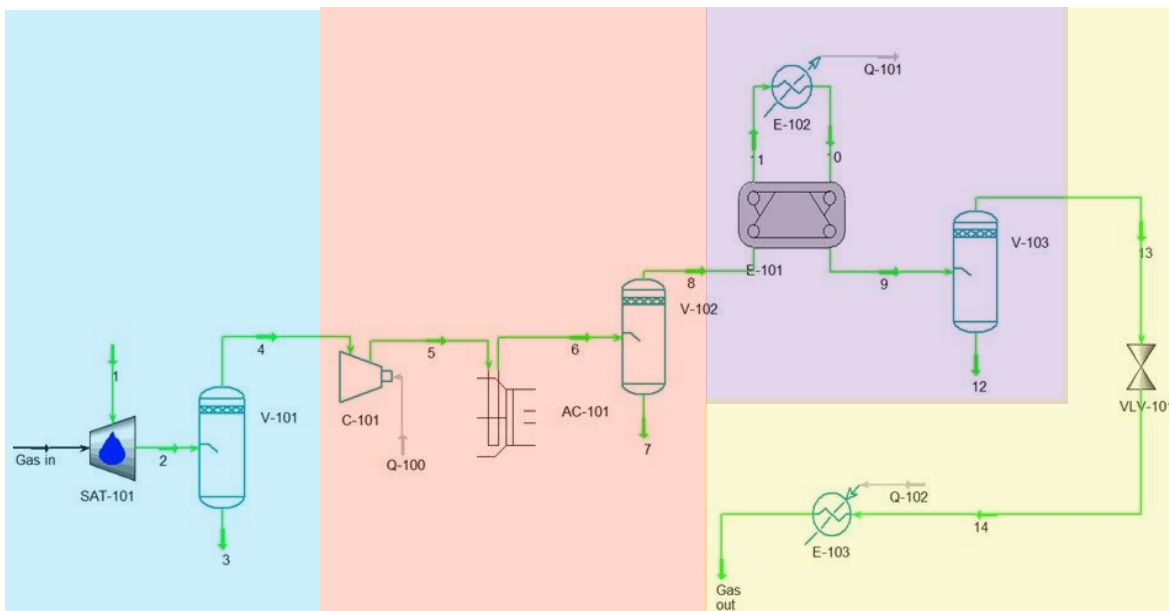
#### 4.1.2. Desarrollo de simulación

Para llevar a cabo el diseño de la simulación en Aspen HYSYS se seleccionó el paquete termodinámico Peng-Robinson. Esta elección se fundamenta en su amplio reconocimiento y uso en hidrocarburos livianos (Vargas-Reyes et al., 2023) (García del Valle, 2018).

La simulación consideró el esquema de tratamiento 2 (Figura 8) debido a su mayor rigurosidad, lo que lo hace apto para gases de difícil adecuación. Esta elección se basa en la consideración de la variabilidad significativa en las condiciones de los gases analizados, según se evidencia en los datos históricos. La Figura 9 muestra la simulación codificada en Aspen HYSYS, considerando la alternativa de tratamiento 2; esta simulación corresponde a la base para el módulo.

#### Figura 9

*Simulación propuesta en Aspen HYSYS del tratamiento de gas*



En la Figura 9, la zona azul define la etapa de saturación con agua (SAT-101) y posterior separación en el *scrubber* V-101 que permite separar el agua líquida que pudiera estar presente

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

(corriente 3). Asimismo, en rojo, se distingue la fase de compresión, utilizando el compresor C-101 para aumentar la presión del gas saturado (corriente 2) desde la presión de suministro del campo hasta 150 psig. El incremento en la temperatura por la compresión se regula con un enfriador (*air cooler* AC-101), que emplea aire a temperatura ambiente como refrigerante (delta T mínimo de 10°F). Luego, un *scrubber* V-102 separa los condensados generados (corriente 7) del gas de proceso (corriente 8).

Seguido a esta separación, se encuentra una etapa de enfriamiento marcada en recuadro morado. Esta etapa es más demandante a nivel energético, ya que conduce a menores temperaturas que las resultantes del *air cooler*. En esta etapa, el gas (corriente 8) ingresa a un intercambiador E-101 (de placas) para condensar una cantidad significativa de livianos a una temperatura de 50°F. En E-101, una mezcla de agua-trietilenglicol (corriente 10) es utilizada en el intercambio calórico. El gas enfriado (corriente 9) es enviado al *scrubber* V-103, separando los condensados (corriente 12) del gas de proceso. El gas resultante (Figura 9, corriente 13), a una presión elevada por la compresión, pasa por una última etapa de tratamiento (marcada en recuadro amarillo). En esta etapa, una válvula reguladora VLV-101 reduce la presión a 80 psig, la cual es adecuada para el ingreso del gas a las turbinas.

El último equipo considerado en la simulación es un calentador E-103, referido como un economizador, utilizado para disminuir la carga energética en el sistema de enfriamiento; en el E-103 se realiza una integración energética entre las corrientes 14 y 8, disminuyendo el flujo requerido de agua-trietilenglicol en el *cooler* E-102. En planta, este economizador es un intercambiador de placas gas-gas. Aunque el economizador no se consideró en la simulación debido a la necesidad de ingresar manualmente la temperatura de salida, se estableció un valor estándar basado en registros previos para garantizar una temperatura mínima segura (15°C por

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

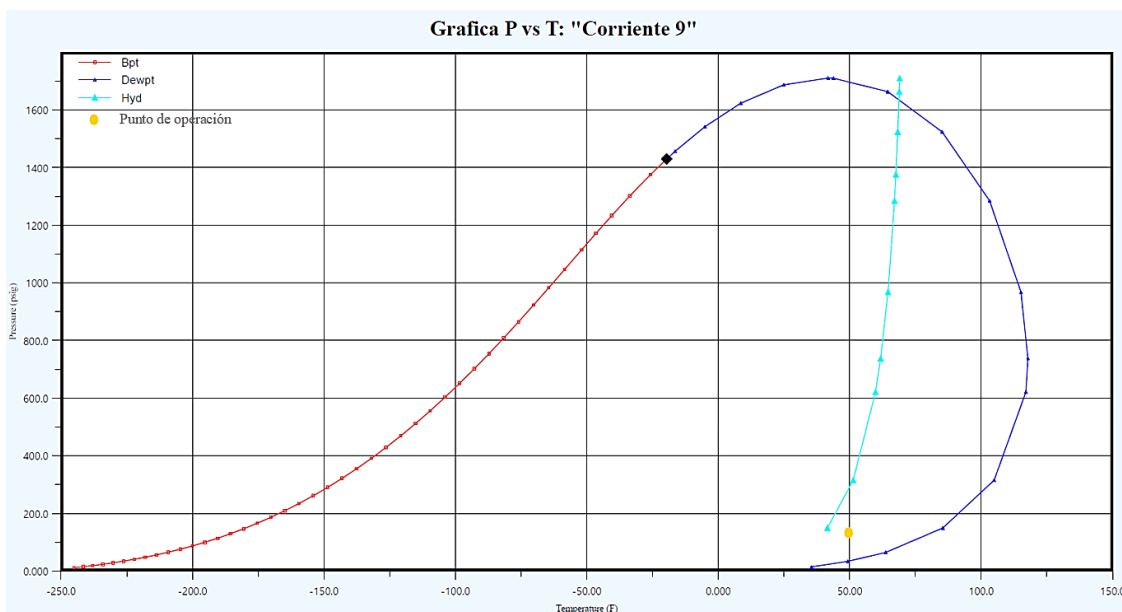
encima del *dew point* del gas), manteniendo una diferencia adecuada con el punto de rocío del gas y evitando la entrada de líquidos a los equipos. Según esto, una temperatura estándar de salida de 100°F (37 °C) fue seleccionada como valor predefinido, basada en el rango observado en registros históricos (desde 80°F hasta 124 °F); asimismo, a esta temperatura se evita fase líquida en la entrada a las turbinas Capstone.

La formación de hidratos es una condición crítica que debe controlarse en este proceso. Para evaluar esta variable, se realizó un análisis de formación de hidratos en las corrientes de proceso, para esto se usó la herramienta de HYSYS “*Stream Analysis*” para formación de hidratos, esto nos permite identificar las condiciones de presión y temperatura a las que se presentan hidratos. Los resultados de este análisis indican que las corrientes 9 y 13 representan los mayores riesgos de formación de hidratos debido a sus condiciones operativas. Específicamente, para la corriente 9, la figura 10 muestra un intervalo crítico identificado por la línea verde. Esta línea señala el rango donde se da la formación de hidratos, desde aproximadamente 41°F y 155 psig hasta alrededor de 63°F y 1630 psig. Es esencial evitar estas condiciones para prevenir la formación de hidratos, ya que su presencia podría acarrear complicaciones significativas en todo el proceso. En situaciones particulares, puede ser imperativo rebasar los límites establecidos, lo que conlleva el riesgo de formación de hidratos. En tales escenarios, es fundamental considerar la incorporación de algún glicol directamente en las corrientes propensas a la formación de hidratos. Este enfoque tiene como objetivo desplazar los límites de presión y temperatura para formación de hidratos. No obstante, es importante tener en cuenta que esta solución introduce una mayor complejidad al sistema y genera costos adicionales asociados a la implementación de dicha medida. Respecto a la corriente 13, los límites son similares a la corriente 9, yendo desde

HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES aproximadamente 42°F y 152 psig hasta 63°F y 1720 psig; la línea de formación de hidratos en la corriente 13 puede ser analizada en la figura 11.

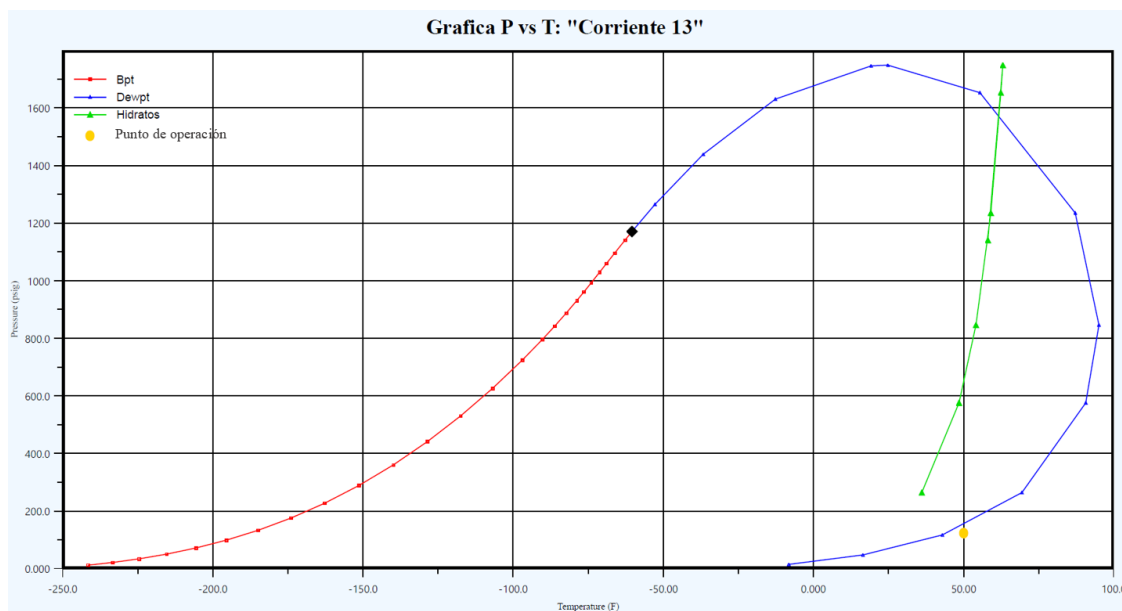
**Figura 10**

*Gráfica de formación de hidratos corriente 9*



**Figura 11**

*Gráfica de formación de hidratos corriente 13*



## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

Según se aprecia en las Figuras 10 y 11, el punto operativo se encuentra alejado en las dos corrientes con mayor riesgo de formación de hidratos (corrientes 9 y 13). Esto sugiere que, en las condiciones establecidas, el caso base permanece libre de la formación de hidratos.

### 4.1.3. Validación de la simulación

Para validar la simulación realizada, se compararon los resultados a la salida del caso base con los históricos. La comparación se presenta en la tabla 4, en términos de %diferencia.

**Tabla 4**

*Comparativos resultados caso base históricos contra simulación*

Variable gas	Históricos	Simulación	%Diferencia
Presión (psig)	80	80	0%
Caudal (MMSCFD)	0.7932	0.7890	1%
Composición molar Metano	0.7479	0.7511	0%
Composición molar Etano	0.0413	0.0414	0%
Composición molar Propano	0.0458	0.0456	0%
Composición molar C4+	0.0296	0.0274	7%
Composición molar CO2	0.1082	0.1085	0%
Composición molar Nitrogeno	0.0074	0.0075	1%
Fracción de vapor	1	1	0%
HHV (MJ/m3)	41.83	41.4847	1%
Variable operativa	Históricos	Simulación	%Diferencia
Temperatura cooler E-102 in (F)	50	49.99	0%
Temperatura cooler E-102 out (F)	42	40	5%
Energía cooler E-102 (kJ/kg )	21.71	13.56	38%
Presión salida compresor C-101 (psig)	132	150	14%
Energía compresor C-101 (kJ/kg)	473.79	187.67	60%
Caudal condensados (barril/día)	15.54	19.99	29%

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

Al comparar los resultados recopilados en los históricos con los obtenidos mediante la simulación con relación al caso base, se identifican discrepancias significativas en las condiciones energéticas de los sistemas de compresión y enfriamiento. Esto puede ser explicado, ya que para el valor de la presión al gas en la simulación es superior que la reportada en los históricos. Lo anterior fue definido para generar un mayor retiro de condensados.

De igual manera, las cifras de energía calculadas en la simulación resultan menores en comparación con los registros históricos, esto debido a las diferencias en el diseño del tratamiento. En los históricos se reporta el uso de dos compresores, principalmente por limitaciones técnicas relacionadas con caudales de gas que pueden condicionar el funcionamiento de los equipos en campo. La simulación, por el contrario, omite estas limitaciones técnicas debido al cambio de proveedor de compresores. Con las anteriores explicaciones, en términos generales, la simulación muestra concordancia con los resultados contenidos en los históricos, presentando una diferencia promedio del 1% con respecto a las condiciones de salida del gas.

### **4.2 Fase 2. Programación del módulo**

#### ***4.2.1. Programación del módulo en Excel***

Para la programación de la herramienta computacional o módulo en Excel; se eligió Excel como ambiente de codificación ya que es programa dinámico y ampliamente aplicado por el personal de la empresa. El módulo diseñado en Excel fue denominado como HyGas.

La conexión entre la simulación definida en Aspen HYSYS (Figura 8) y el ambiente Excel fue realizada mediante el complemento *Aspen Workboon Simulation*, definiendo las variables de entrada y salida mostradas en la Tabla 5.

**Tabla 5***Variables de entrada y salida para el diseño de tabla de escenarios*

<b>Variables de entrada</b>	<b>Variables de salida</b>
Composición molar del gas de entrada	Composición molar del gas de salida
Temperatura del gas a la entrada	Caudal de gas a la salida
Presión del gas a la entrada	<i>Dew point</i> del gas de salida
Caudal del gas a la entrada	Poder calorífico del gas de salida
Caudal de agua de enfriamiento	Caudal de condensados obtenidos
Temperatura ambiente	Condiciones de presión y temperatura a las que se forman hidratos en las corrientes 9 y 13
Presión a la salida del compresor C-101	Energía necesaria en el compresor
Temperatura del refrigerante en E-102	Energía necesaria en el <i>cooler</i> E-102

Por su parte, la figura 12 presenta un formulario que facilita la introducción de las variables de entrada a la simulación (Tabla 5). Este formulario presenta por defecto valores de las variables de entrada; también, el formulario reporta el valor de la sumatoria de la composición molar de los gases, de tal manera que el usuario pueda verificar el valor unitario respectivo.

**Figura 12**

*Formulario para ingreso de condiciones de entrada del gas*

**Datos entrada gas**

Caudal de gas (MMSCFD)

Temperatura (°F)

Presión (psig)

Composición molar Metano

Composición molar Etano

Composición molar Propano

Composición molar n-Butano

Composición molar i-Butano

Composición molar n-Pentano

Composición molar i-Pentano

Composición molar n-Hexano

Composición molar n-Heptano

Composición molar n-Octano

Composición molar n-Nonano

Composición molar n-Decano

Temperatura Ambiente (°F)

Composición molar n-C11

Composición molar CO2

Composición molar Nitrogeno

Composición molar H2S

Composición molar H2O

Composición molar Oxigeno

Composición molar Helio

Composición molar Dimetilsulfuro (C2H6S)

Composición molar Acetileno (C2H2)

Composición molar Hidrogeno

Composición molar CO

Composición molar C2H6S

Caudal agua de enfriamiento (MMSCFD)

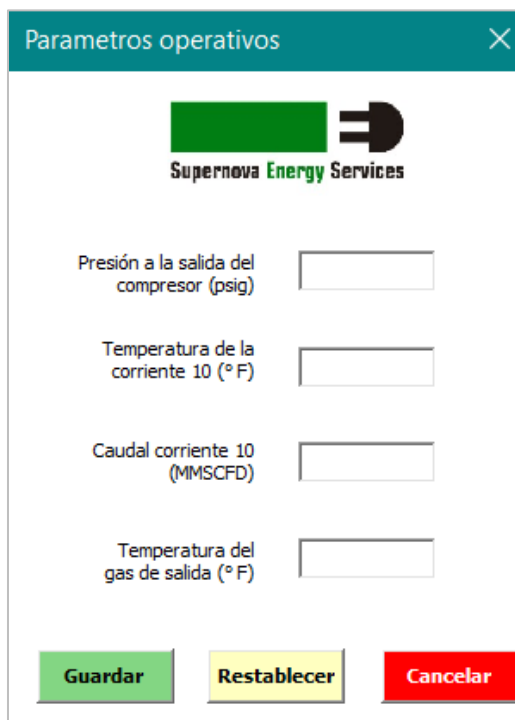
**Sumatoria de Composiciones 1**

**Registrar** **Limpiar** **Cancelar**

Junto al formulario para ingresar las condiciones del gas, se incluyó un formulario adicional que facilita la modificación de las condiciones operativas relacionadas con los sistemas de compresión y enfriamiento. Esto permite ajustar la presión de salida del compresor C-101, modificar la temperatura y el caudal del refrigerante en E-102, así como ajustar la temperatura de salida del gas, según las preferencias del usuario. Este formulario es mostrado en la figura 13.

**Figura 13**

*Diseño de formulario para modificar variables operativas*



Parametros operativos

**Supernova Energy Services**

Presión a la salida del compresor (psig)

Temperatura de la corriente 10 (°F)

Caudal corriente 10 (MMSCFD)

Temperatura del gas de salida (°F)

**Guardar** **Restablecer** **Cancelar**

Una vez recopilados los datos en el formulario y trasladados a la tabla de escenarios, se procede a ejecutar la simulación. Después, las variables de interés se transfieren a una tabla específica que incluye una columna condicionada con los valores límite establecidos por el fabricante para el combustible tipo “gas natural” (Tablas 1 y 2). Este enfoque simplifica la generación de conclusiones sobre la viabilidad del uso del gas tratado.

En la figura 14 se presenta el diseño de la interfaz final que muestra la tabla de análisis del gas tratado. Esta interfaz se divide en cuatro zonas. La primera, resaltada en amarillo, corresponde al panel de configuración, donde se pueden ajustar las condiciones de entrada del gas, los parámetros operativos para el pretratamiento y ejecutar la conexión y efectuar la simulación con Aspen HYSYS.

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

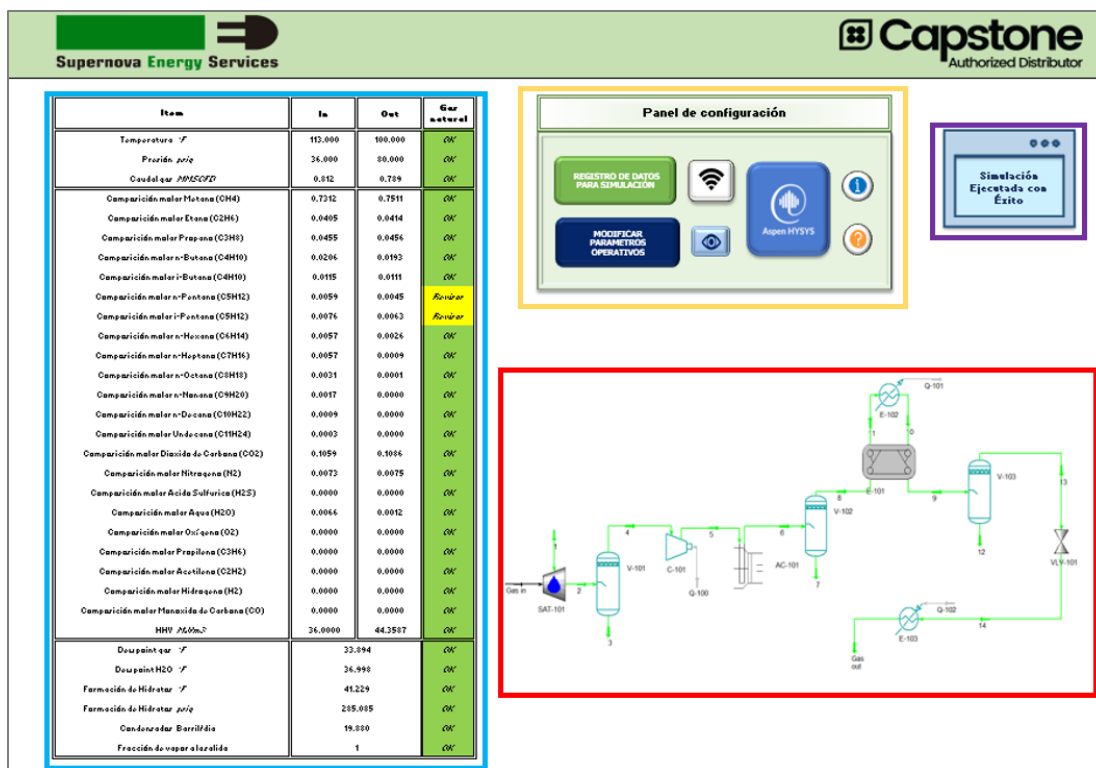
La segunda zona, marcada en morado, muestra el estado de la simulación a través de una ventana. En caso de que la simulación no haya convergido con éxito, se mostrará el mensaje "Problemas en la Simulación".

La tercera zona, delimitada en rojo, presenta el diagrama del tratamiento, brindando al usuario una visión del diseño de la simulación sin necesidad de abrir HYSYS.

Por último, la cuarta zona, encerrada en azul, despliega el panel de resultados. Aquí se contrastan las condiciones de entrada del gas con las del gas después del tratamiento. Además, se ha incorporado una columna denominada "Gas natural", codificada según los rangos establecidos por Capstone, de no cumplirse estos rangos aparecerá el mensaje "Revisar" notificando al usuario a cerca del no cumplimiento de los límites estipulados.

**Figura 14**

*Interfaz del módulo HyGas*



#### 4.2.2. Validación del módulo

La Tabla 6 presenta el rango de valores para cada variable de los registros históricos, así como los valores obtenidos mediante la aplicación del módulo, incluyendo la diferencia, medida como el error RMSE.

**Tabla 6**

*Comparativo de rangos de salida históricos y módulo planteado*

Variable gas	Rango de salida históricos		Rango de salida módulo		%error RMSE
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	
Temperatura (°F)	89.27	111.20	100	100	8%
Presión (psig)	78.23	80	80	80	2%
Caudal (MMSCFD)	0.0278	0.9179	0.0280	0.9360	3%
Composición molar Metano	0.2197	0.7767	0.2271	0.7651	3%
Composición molar Etano	0.0125	0.1768	0.0127	0.176	1%
Composición molar Propano	0.036	0.1183	0.0331	0.1204	5%
Composición molar C4+	0.0296	0.1237	0.0274	0.0542	17%
Composición molar CO <sub>2</sub>	0.0015	0.4787	0.0015	0.4986	2%
Composición molar Nitrogeno	0.0065	0.1702	0.0064	0.1700	3%
Fracción de vapor	1	1	1	1	0%
HHV (MJ/m3)	30.19	50.4	25.9508	51.4574	6%
Variable operativa	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	%error RMSE
Temperatura cooler E-102 in (F)	38.99	72.28	51.47	54.20	18%
Temperatura cooler E-102 out (F)	35	50	40	40	12%
Energía cooler E-102 (kJ/kg )	8.16	53.45	15.58	19.31	50%
Presión salida compresor C-101 (psig)	120	300	150	150	21%
Energía compresor C-101 (kJ/kg)	151.95	473.79	119.45	221.96	36%
Caudal condensados (barril/día)	6.06	459.81	11.42	442.68	15%

De acuerdo con la tabla 6, se observa una diferencia promedio de 5% para las variables de salida del gas alcanzando una diferencia máxima del 17%. Estas diferencias entre con los históricos son el resultado de la rigurosidad del tratamiento aplicado al gas en la simulación. Particularmente,

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

las diferencias se deben a las condiciones de presión y temperatura para el retiro de hidrocarburos pesados. En cuanto a los requerimientos de energía las diferencias llegan al 50%. Esta discrepancia se origina en el hecho de que en los registros históricos se analizó y diseñó un proceso de tratamiento específico para las condiciones particulares de cada gas estudiado. En contraste, el módulo aplica un sistema y condiciones idénticas para diferentes gases, generando estas variaciones.

A pesar de esto, para la mayoría de los casos, las energías de los sistemas de tratamiento y enfriamiento fueron inferiores a las obtenidas en los registros históricos. Esto indica que la simulación requiere una menor demanda energética en comparación con los datos históricos analizados. La apreciación anterior se clarifica aún más al observar las figuras 15 y 16, donde se demuestra que, para la mayoría de los casos, la simulación resulta ventajosa al comparar la demanda energética en los sistemas principales de tratamiento. En la Figura 15, se contrasta el gasto energético del sistema de compresión en los 10 casos evaluados, revelando una demanda menor con la simulación en la mayoría de los escenarios. Únicamente se registra una demanda superior en el caso 5, el cual presenta una diferencia aproximada del 50%.

Asimismo, en la Figura 16 se compara el gasto energético del sistema de enfriamiento en cada caso histórico con la simulación propuesta. La gráfica revela que, para la mayoría de los casos, la simulación presenta una menor demanda energética, con la única excepción del caso 6, que requiere un mayor consumo energético. En resumen, la simulación se muestra favorable a nivel de ahorro energético, dado el menor consumo observado en el 90% de los casos evaluados.

Figura 15

*Comparativo gasto energético del sistema de compresión por caso*

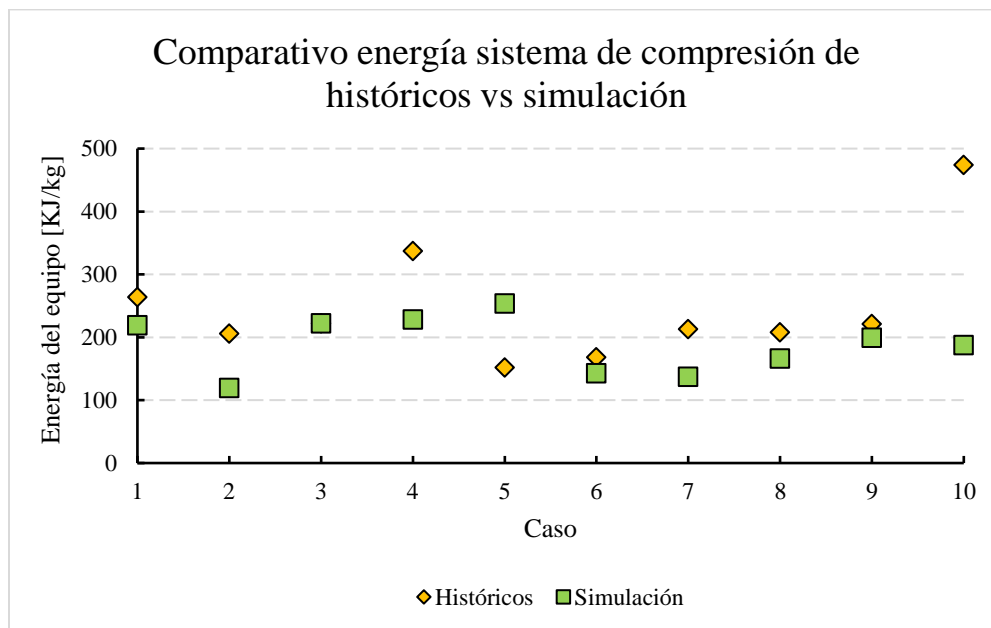
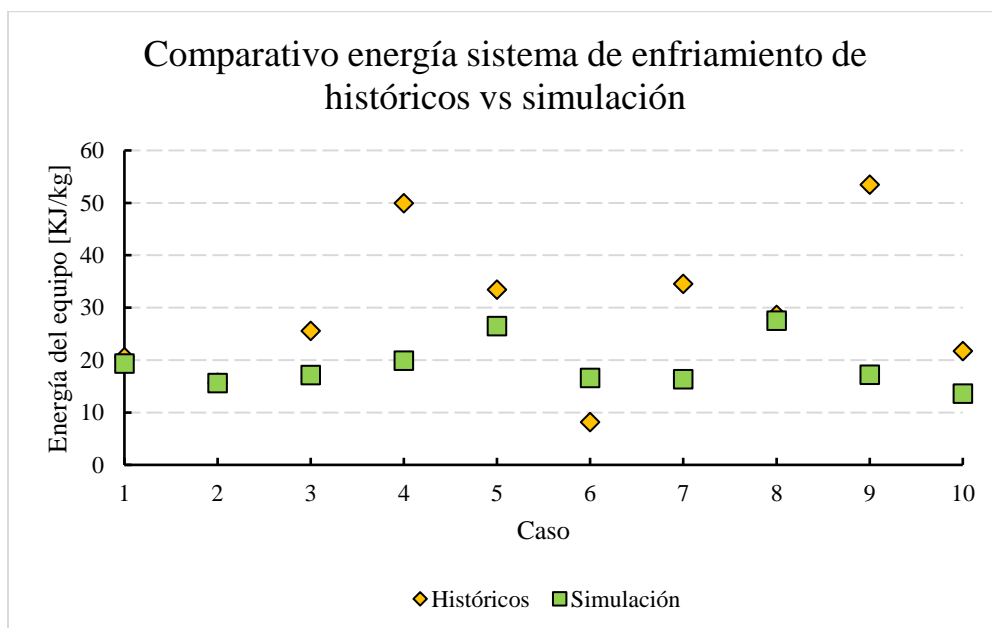


Figura 16

*Comparativo gasto energético del sistema de enfriamiento por caso*



## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

En aquellos casos en los que se requiere modificar los parámetros predeterminados asignados al módulo, resulta favorable el uso de la opción “Modificar parámetros operativos” que permite aplicar condiciones específicas y a elección del usuario dependiendo de la complejidad de tratamiento del gas.

### 4.3. Fase 3. Capacitación

#### 4.3.1. Capacitación al personal del área

La capacitación sobre el módulo HyGas fue efectuada mediante una sesión virtual en Google Meets; la figura 17 presenta una imagen evidencia del desarrollo de la capacitación. Durante la capacitación, los aspectos más relevantes del módulo HyGas fueron analizados, incluyendo su funcionamiento, la simulación base en HYSYS y diversos casos de estudio.

**Figura 17**

*Conferencia virtual de capacitación aplicaciones SES*

The image shows a Google Meet interface during a virtual training session. The main content is a presentation slide titled "Simulación base" (Base Simulation). The slide includes a box with "Valores predeterminados" (Predefined values) and a process flow diagram.

**Valores predeterminados**

- P compresión = 150 psig
- T agua enfriamiento = 40°F
- Caudal agua enfriamiento = Caudal gas
- T salida gas = 100°F

The diagram shows a process flow starting with "Gas in" entering a separator (SAS-101). The gas then goes through a compressor (C-101), a heat exchanger (E-102), a separator (V-102), and another heat exchanger (E-103) before exiting as "Gas out". There are also cooling water loops involving heat exchangers E-101 and E-102, and a separator V-101. The slide also features logos for "SESAQ Quiéreme" and "75 Aniversario UIS 1948-2023".

On the right side of the Meet window, there is a "Personas" (People) panel showing the list of participants:

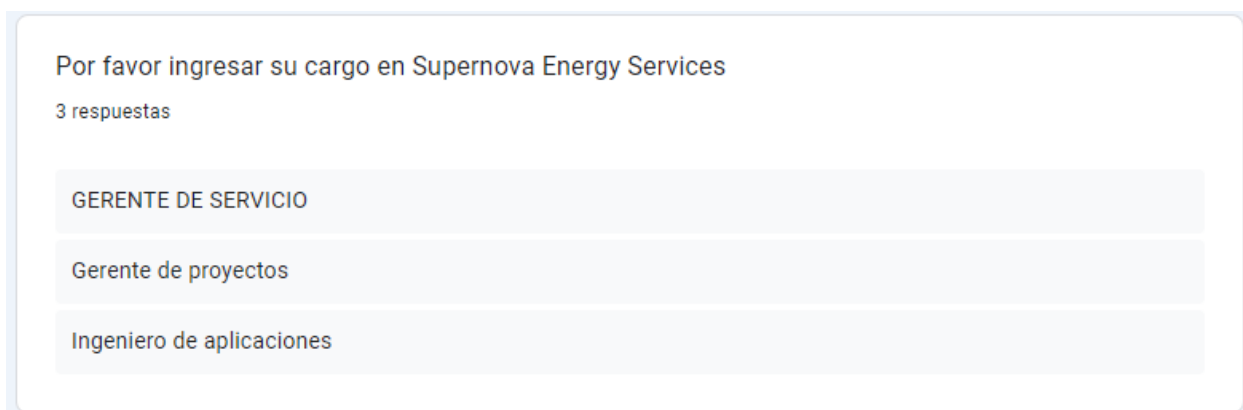
- EN LA REUNIÓN (6):
  - Colaboradores (6):
    - Javier Duarte (Tu)
    - Alfredo Guerrero
    - Daniel Rivera
    - Maria Fernanda Suarez ... (Organizador de la reunión)
    - Maria Fernanda Suarez ... (Presentación)
    - Néstor Móseres
- También invitados (3):
  - Amanda Montero
  - Anoela Barraoan

### 4.3.2. Implementación empresarial del módulo

El personal de la empresa asistente a la capacitación del módulo HyGas diligenció una encuesta con cuatro preguntas, lo cual permitió conocer las perspectivas de aplicación de la herramienta. Los resultados de la encuesta son presentados en las Figuras 19 – 23.

#### Figura 18

##### *Perfil de los encuestados*



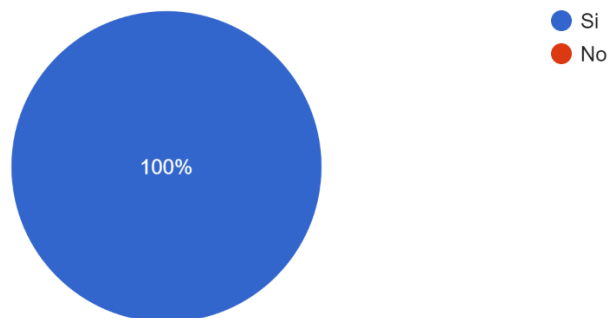
Los resultados de las preguntas realizadas se pueden ver en las figuras 17, 18, 19 y 20.

#### Figura 19

##### *Respuestas: pregunta 1 encuesta de opinión SES*

¿Considera que el modulo HYGAS es facil de usar?

3 respuestas

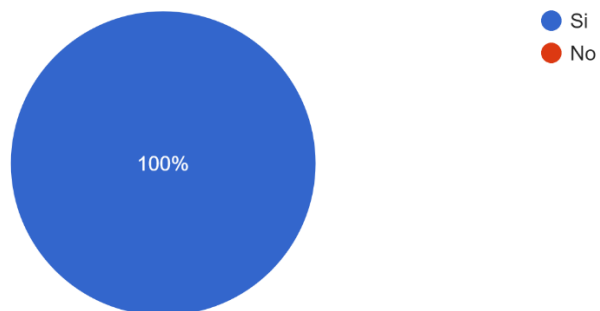


**Figura 20**

*Respuestas: pregunta 2 encuesta de opinión SES*

¿Considera que el modulo es una buena herramienta para evaluar la viabilidad de gases para microturbinas Capstone?

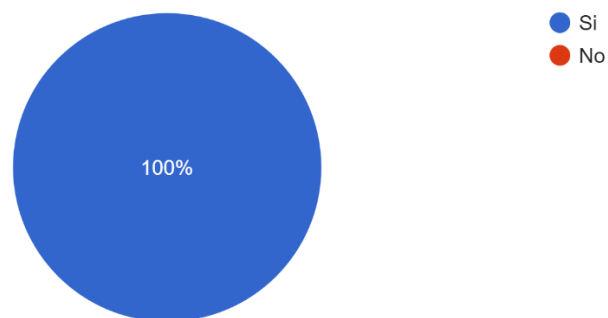
3 respuestas

**Figura 21**

*Respuestas: pregunta 3 encuesta de opinión SES*

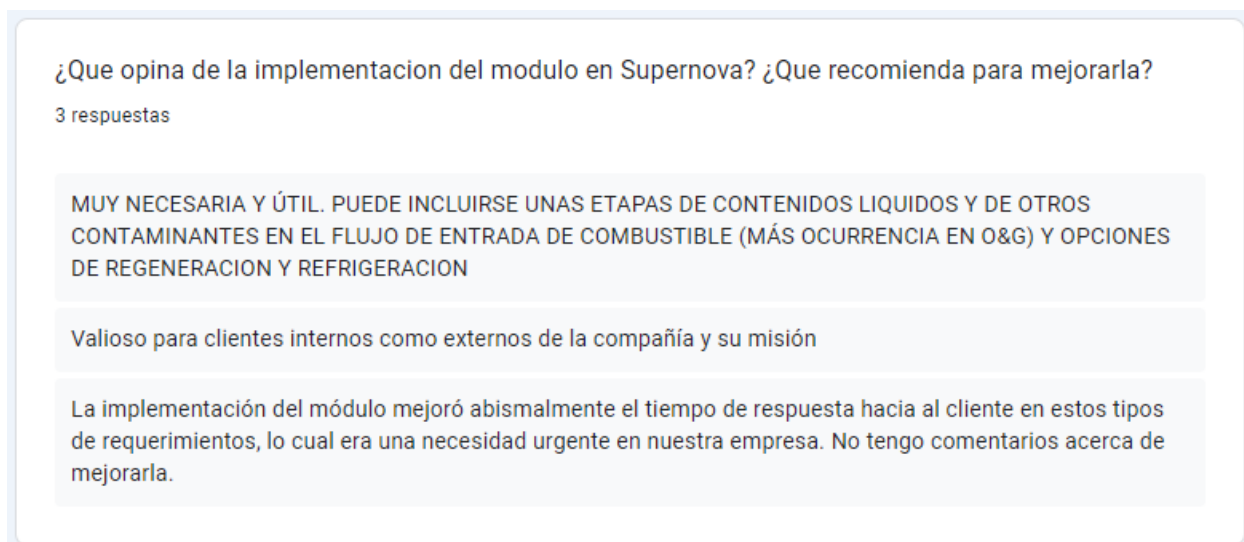
¿Considera que el modulo es una herramienta que agiliza la respuesta a los clientes con respecto a la viabilidad de aprovechamiento de gas?

3 respuestas



**Figura 22**

*Respuestas: pregunta 4 encuesta de opinión SES*



Según las anteriores figuras, los ingenieros del área de aplicaciones percibieron de manera positiva la implementación del módulo HyGas. Es importante resaltar que, entre los comentarios, los ingenieros consideraron útil la implementación del módulo HyGas para sus tareas diarias, ya que presenta una potencial reducción en los tiempos de respuesta a los clientes. Además, los ingenieros presentaron sugerencias como, la necesidad de estructurar tratamientos específicos que aborden de manera rigurosa la presencia de líquidos en situaciones particulares, así como la codificación de distintos métodos de regeneración y refrigeración para mejorar aún más la eficacia del sistema. Lo anterior corresponde a una futura mejora para ampliar las capacidades del módulo HyGas.

### 4.3.3. Evaluación de resultados

Teniendo en cuenta las opiniones de los ingenieros asistentes a la capacitación, se realizaron los manuales técnicos y de usuario que permiten dejar una guía para el uso del módulo. Así mismo se tuvieron en cuenta las inquietudes y se dio respuesta a algunas de ellas en los manuales.

Para fácil acceso y uso de la herramienta por parte del personal de SES, los archivos del módulo HyGas fueron almacenados en la base de datos de la empresa (figura 23). Estos archivos incluyeron los manuales técnicos y de usuario correspondientes; estos manuales pueden ser analizados en los Anexos A y B. El correcto funcionamiento de los archivos almacenados en la base de datos empresarial fue corroborado durante la capacitación realizada.

### Figura 23

*Carpeta de los archivos del módulo en la base de datos de SES*

The screenshot shows a file explorer interface with the following details:

- Path: Compartido conmigo > 2. SES PROJECT > 0CAPACITACION
- Toolbar: 1 seleccionado, icons for share, download, copy, delete, refresh, and menu.
- Table of files and folders:

Nombre	Propietario	Abierto...	↑	Tamaño de e	⋮
Cromatografos	Néstor Móser...			—	⋮
Dry Cooler	Néstor Móser...			—	⋮
TRATAMIENTO DE AGUA	Néstor Móser...			—	⋮
HEAT TRACE	Néstor Móser...			—	⋮
New folder	Néstor Móser...			—	⋮
BAKER HUGHES	Daniel Rivera			—	⋮
CORPORATE BROCHURES	Néstor Móser...			—	⋮
THERMOTAR	Néstor Móser...			—	⋮
Herramienta Hysys	yo	13:08		—	⋮

## 5. Conclusiones

- A partir de la recopilación y análisis de los datos históricos de SES, se identificaron dos sistemas de tratamiento básicos aplicables al pretratamiento de gases, los cuales se identifican por tener una etapa de compresión y enfriamiento. Los gases que imperativamente requieren estos tratamientos son aquellos que exceden los límites establecidos para hidrocarburos pesados ( $>1\%$  de  $C_6+$ ) y poder calorífico ( $>47.5 \text{ MJ/m}^3$ ).
- Se logró desarrollar una simulación estándar en Aspen HYSYS para el pretratamiento del gas natural, basándonos en datos históricos proporcionados por Supernova. La herramienta computacional ofrece una representación precisa y detallada del proceso habitual de pretratamiento, mostrando coherencia con los datos recopilados. Además, se creó con éxito una herramienta computacional en un módulo de Excel, con macros en Visual Basic, proporcionando una interfaz amigable para ejecutar eficientemente la simulación de Aspen HYSYS. Esta programación facilita la evaluación del pretratamiento del gas, permitiendo a los usuarios realizar análisis detallados de manera rápida y eficiente.
- La capacitación proporcionada a los ingenieros del área de aplicaciones de Supernova Energy Services se ejecutó efectivamente. Se definieron y ejemplificaron diversos casos de aplicación del módulo desarrollado, permitiendo a los ingenieros comprender la implementación práctica. Además, se enfatizó el uso de los valores de salida para tomar decisiones informadas en situaciones prácticas.

## 6. Recomendaciones

- Sería recomendable evaluar métodos de tratamiento más complejos como separación con membranas, destilación fraccionada, absorción con aminas, entre otros que podrían permitir ajustar gases difíciles de tratar o con contaminantes como CO<sub>2</sub> y Sulfuros. Estos elementos no responden a los tratamientos de compresión mecánica y procesos criogénicos analizados en este trabajo.
- Sería recomendable evaluar un esquema de tratamiento específico que considere la presencia de hidratos, así como métodos para prevenir o controlar su formación en caso de ser inevitable.
- Se sugiere considerar la necesidad de estructurar tratamientos específicos que aborden de manera rigurosa la presencia de líquidos en situaciones particulares. Además, se recomienda la codificación de distintos métodos de regeneración y refrigeración como parte del desarrollo de futuros proyectos, con el objetivo de mejorar aún más la eficacia del pretratamiento.

### Referencias bibliográficas

*Alejandro—Resolución 71 de 1999 CREG.* (s. f.). Comisión de Regulación de Energía y Gas.

Recuperado 24 de noviembre de 2023, de

[https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0071\\_1999.htm#1](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0071_1999.htm#1)

*Aliados.* (s. f.). Supernova Energy Services. Recuperado 27 de noviembre de 2023, de

<https://www.supernova-es.com/empresa/aliados>

Amaya Amaya, T. Y. (2019). *SEPARACIÓN, DESHIDRATACIÓN Y ENDULZAMIENTO DE GAS DE PRODUCCIÓN EN CABEZA DE POZO PARA AUTOGENERACIÓN ELÉCTRICA ECOSOSTENIBLE* [Universidad Industrial de Santander].

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/85041c98-dbf1a-456c-b915-93d0ca67e810/content>

Aranea, J. F., Domínguez, J. C., & Perugachi, S. J. (2012). *Métodos de deshidratación del gas natural* [Escuela Superior Politécnica del Litoral].

[https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24525/1/FICT\\_M%C3%A9todos%20de%20Deshidratacion%20de%20Gas%20Natural.pdf](https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/24525/1/FICT_M%C3%A9todos%20de%20Deshidratacion%20de%20Gas%20Natural.pdf)

*C200S.* (s. f.). Capstone green energy corporation. Recuperado 24 de noviembre de 2023, de

<https://www.capstonegreenenergy.com/products/energy-generation-technologies/capstone-microturbines/c200s>

*Coco—The cape-open to cape-open simulator.* (s. f.). Recuperado 12 de enero de 2024, de

<https://www.cocosimulator.org/>

Freile, D. A. (2007). *Compresión y Tratamiento del Gas Natural*. DSpace ESPOL; Escuela Superior Politécnica de Litoral.

HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6243/23/5.%20CAP.%20IV%20Compresi%C3%B3n%20y%20Tratamiento%20del%20gas%20natural.pdf>

García-del-Valle, J. (2018). Aplicación de ecuaciones de estado cúbicas y desarrollo de correlaciones numéricas para el cálculo de propiedades termodinámicas en saturación de refrigerantes para su uso en microcontroladores. *Maskana*, 9(2), 75-88. <https://doi.org/10.18537/mskn.09.02.09>

Hernandez Mena, L. E., & Gomez Meyer, J. S. (s. f.). *Microturbinas: Una tecnología para la generación distribuida*. 36-39.

[https://www.cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra\\_revista/MetFlu5/4\\_Microturbinas.pdf](https://www.cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_revista/MetFlu5/4_Microturbinas.pdf)

Martínez Medina, R. (2021). *Análisis del efecto de la presión de alimentación en plantas de licuefacción de gas natural mediante refrigerante mezclado* [Universidad de Valladolid].

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/47911/TFG-I-1901-Anejos.pdf?sequence=1>

Meriño Stand, L. I. (2015). *Diseño de una metodología para lograr una combustión eco-eficiente y segura de mezclas de gases* [Universidad Industrial de Santander].

<https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/64867843-82fc-453d-8111-4dcea349b017/content>

Meza Ortega, J. I., & Torrado, J. B. (2018). *Estudio de la formación de hidratos y su incidencia en la producción de hidrocarburos en un campo offshore colombiano* [Universidad Industrial de

Santander]. <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/173260.pdf>

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico—Gas Natural y Medio Ambiente.

Gobierno de España (s. f.). Recuperado 19 de noviembre de 2023, de

<https://energia.gob.es/gas/Gas/Paginas/gasnatural.aspx#:~:text=El%20gas%20natural%20es%20el,en%20la%20fase%20de%20utilizaci%C3%B3n>.

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

*Sobre nosotros.* (s. f.). Supernova Energy Services. Recuperado 27 de noviembre de 2023, de <https://www.supernova-es.com/empresa/sobre-nosotros>

Vargas-Reyes, L. S., González-Martínez, A. C., Morales-Medina, G. (2023). Variaciones en la concentración de CO<sub>2</sub> en gases asociados: evaluación del desempeño de un proceso de acondicionamiento con turboexpander. *Fuentes, El reventón energético*, 21(2), 103–119. <https://doi.org/10.18273/revfue.v21n2-2023007>

Velasco, F. R. (2009). *ESTUDIO DE VIABILIDAD Y DISEÑO DE UNA PLANTA DE COGENERACIÓN PARA UNA INDUSTRIA CÁRNICA* [UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR]. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7685/PFC\\_Fernando\\_Ramiro\\_Velasco.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7685/PFC_Fernando_Ramiro_Velasco.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**Anexos****Anexo A***Manual de usuario para el módulo HyGas***Manual de usuario para el módulo HyGas****“TRATAMIENTO Y COMPRESIÓN DE GAS PARA APROVECHAMIENTO EN MICROTURBINAS****CAPSTONE GREEN ENERGY“****Versión A****“15 de enero del 2024”**

## Contenido

Introducción .....	<b>56</b>
1. Objetivos.....	<b>57</b>
1.1. Objetivo General .....	57
1.2. Objetivos Específicos .....	57
2. Requisitos del Sistema.....	<b>58</b>
2.1. Software y Versiones .....	58
2.2. Configuración de Excel.....	58
3. Instrucciones de Instalación.....	<b>59</b>
3.1. Pasos de instalación.....	59
3.2. Configuración inicial.....	60
4. Funcionalidades del módulo HyGas.....	<b>60</b>
4.1. Descripción General.....	60
4.2. Instrucciones de uso paso a paso.....	60
5. Guía de Resolución de Problemas .....	<b>65</b>
5.1. Preguntas Frecuentes.....	65

**Lista de figuras**

Figura 1. Secuencia de acceso al módulo en Google Drive.....	59
Figura 2. Carpeta del módulo.....	59
Figura 3. Formulario para ingreso de datos de gas de entrada.....	61
Figura 4. Formulario para configuración de parámetros operativos.....	62
Figura 5. Panel de Configuración .....	62
Figura 6. Panel de Resultados .....	63
Figura 7. Panel de estado de simulación.....	64

## Introducción

Este manual de usuario representa una guía integral para el módulo en Excel *HyGas* diseñado específicamente para el tratamiento y compresión de gas, basado en una simulación del software Aspen HYSYS. Su desarrollo responde a la necesidad de optimizar el análisis de pretratamientos del gas natural en estudios de prefactibilidad técnica y financiera, especialmente en proyectos relacionados con microturbinas.

El gas natural se destaca en el contexto energético debido a su versatilidad y su bajo impacto ambiental, presentando un potencial significativo como alternativa a las fuentes de energía tradicionales. Sin embargo, la necesidad de cumplir con las especificaciones establecidas en el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT) ha planteado desafíos significativos, especialmente en términos de los costos asociados con los tratamientos requeridos para su adecuación.

En respuesta a esta problemática, la empresa Supernova Energy Services (SES) ha identificado la oportunidad de desarrollar una herramienta computacional propia. Esta herramienta busca respaldar los análisis de prefactibilidad técnica y financiera al proporcionar una solución eficiente para evaluar los pretratamientos del gas natural. Esto permitirá agilizar los procesos de toma de decisiones en la implementación de microturbinas en proyectos energéticos.

El propósito de este manual es ofrecer orientación detallada y precisa sobre el uso del módulo, proporcionando instrucciones, ejemplos prácticos y directrices específicas para su aplicación en los análisis de viabilidad. Se espera que esta herramienta optimice los procesos de estudio, evaluación y selección de tecnologías para el aprovechamiento eficiente del gas natural en proyectos de autogeneración.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo General**

Facilitar el entendimiento y la correcta utilización de un módulo en Excel que se basa en una simulación en HYSYS para el tratamiento de gas. Se busca proporcionar a los usuarios las herramientas necesarias para comprender, ejecutar y analizar los resultados obtenidos a través de esta simulación.

### **1.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Detallar paso a paso cómo utilizar el módulo en Excel, incluyendo la importación de datos desde HYSYS, si es necesario.
- ✓ Enseñar cómo ajustar parámetros en la simulación HYSYS para reflejar cambios en el tratamiento de gas y cómo esto impacta en los resultados.
- ✓ Identificar y proporcionar soluciones para los problemas que los usuarios podrían enfrentar al trabajar con la interfaz de HyGas.

## 2. Requisitos del Sistema

### 2.1. Software y Versiones

- Aspen HYSYS V12 o versiones superiores
- Microsoft Excel 2016

### 2.2. Configuración de Excel

- Se deben habilitar las macros en el libro de Excel
- Se debe habilitar el complemento *Aspen Simulation Workbook*, en caso de tenerlo desactivado.

### 3. Instrucciones de Instalación

#### 3.1. Pasos de instalación

Para tener acceso al módulo HyGas dirigirse al drive de la empresa Supernova Energy Services y seguir la siguiente ruta.

**Figura 24**

*Secuencia de acceso al módulo en Google Drive*



Finalmente abrir el archivo “**Módulo HYGAS**”

**Figura 25**

*Carpeta del módulo*

Nombre	Fecha de modificación	Tipo	Tamaño
Diagrama Simulación HYSYS	19/11/2023 11:24 p. m.	Archivo JPG	40 KB
<b>Modulo HYGAS</b>	27/12/2023 11:37 a. m.	Hoja de cálculo h...	327 KB
Simulacion Practica mix+intercambiador...	21/12/2023 9:43 a. m.	Archivo BK0	616 KB
Simulacion Practica mix+intercambiador...	21/12/2023 9:49 a. m.	HYSYS Simulation...	564 KB
Manual de usuario para el modulo HyGas	28/12/2023 11:25 a. m.	Microsoft Edge P...	433 KB
Manual Tecnico del modulo HyGas	28/12/2023 11:25 a. m.	Microsoft Edge P...	414 KB

### 3.2. Configuración inicial

Posterior a haber habilitado la ejecución de macros en el libro de Excel y de activar el complemento *Aspen Simulation Workbook*, se debe conectar la interfaz con el simulador Hysys, para esto se cuenta con un botón en el panel de configuración que permite realizar esta acción fácilmente. Se podrá verificar que se realizó la conexión cuando en la barra de estado aparezca el mensaje *“Successfully activated simulation”*

## 4. Funcionalidades del módulo HyGas

### 4.1. Descripción General

El módulo en Excel *HyGas* representa una herramienta integral que utiliza datos y resultados derivados de una simulación en Aspen HYSYS para el tratamiento eficiente y la compresión de gas, específicamente diseñado para su utilización en microturbinas Capstone Green Energy. Esta herramienta permite a los usuarios analizar, gestionar y optimizar los parámetros de tratamiento de gas, considerando aspectos cruciales como la calidad del gas, la eficiencia de compresión, requisitos de las microturbinas así como su viabilidad técnica y económica, con el fin de garantizar un suministro óptimo y sostenible de combustible para la generación de energía limpia y eficiente.

### 4.2. Instrucciones de uso paso a paso

Posterior a seguir las instrucciones de instalación y comprobar que se cumple con todos los requisitos de software y versiones se procede a ubicar el archivo de Excel y simulación en Hysys, se debe abrir el archivo de Excel y seguir los siguientes pasos

**Paso 1:** Conectar el libro de Microsoft Excel con la simulación en Aspen Hysys mediante el complemento *Aspen Workbook Simulation*, esta acción se puede realizar rápidamente mediante el botón de conectar en el panel de control.

**Paso 2:** Si se desea ver la simulación en Aspen Hysys, se puede abrir fácilmente mediante el botón de ver en el panel de configuración.

**Paso 3:** Posterior a hacer la conexión con Hysys, se procede a registrar los datos del gas que ingresa al tratamiento, para esto se usa el botón de **“Registro de datos para simulación”**, el cual mostrara un formulario a diligenciar para correr la simulación.

**Figura 26***Formulario para ingreso de datos de gas de entrada*

Datos entrada gas
×

Caudal de gas (MMSCFD)

Temperatura (° F)

Presión (psig)

Composición molar Metano

Composición molar Etano

Composición molar Propano

Composición molar n-Butano

Composición molar i-Butano

Composición molar n-Pentano

Composición molar i-Pentano

Composición molar n-Hexano


Composición molar n-Heptano

Composición molar n-Octano

Composición molar n-Nonano

Composición molar n-Decano

Temperatura Ambiente (° F)



Composición molar n-C11

Composición molar CO2

Composición molar Nitrogeno

Composición molar H2S

Composición molar H2O

Composición molar Oxigeno

Composición molar Helio

Composición molar Dimetilsulfuro (C2H6S)

Composición molar Acetileno (C2H2)

Composición molar Hidrogeno

Composición molar CO

Composición molar C2H6S

Caudal agua de enfriamiento (MMSCFD)

**Sumatoria de Composiciones 1**

Registrar

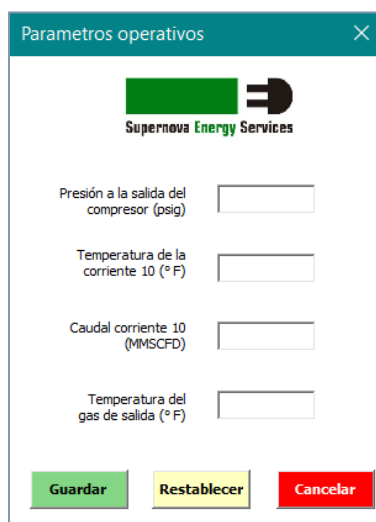
Limpiar

Cancelar

**Paso 4:** Si se desea configurar los parámetros operativos se usaría el botón “**Modificar parámetros operativos**”, el cual permite mediante un formulario, variar condiciones de presión, temperatura y caudal de los sistemas de compresión y enfriamiento.

**Figura 27**

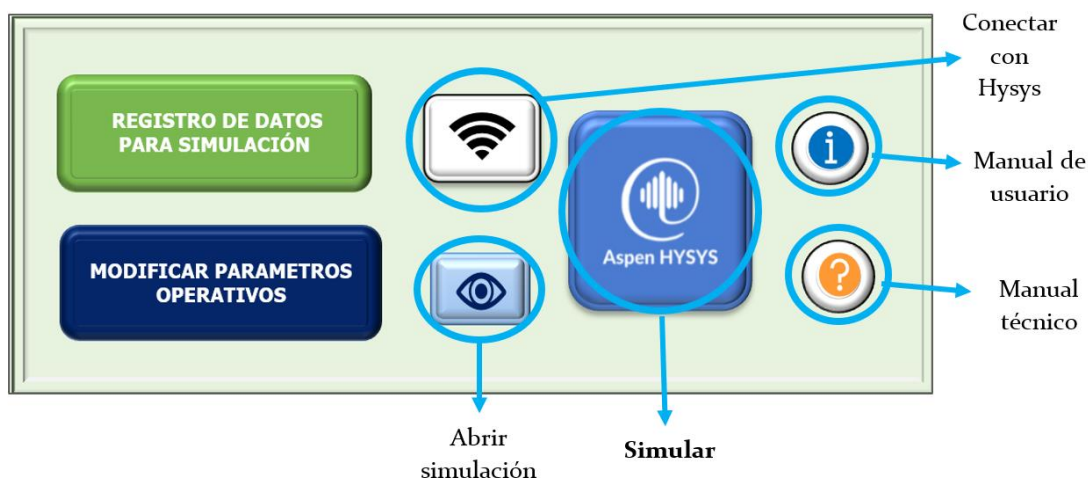
*Formulario para configuración de parámetros operativos*



**Paso 5:** Después de especificar todas las condiciones que se desean simular, se debe oprimir el botón diferenciado con el logo de Aspen HYSYS para efectuar la simulación. Los resultados obtenidos en la simulación se podrán visualizar fácilmente en el panel de resultados, donde además de observar los resultados se podrá verificar el cumplimiento de los límites de las variables del gas estipuladas por el fabricante.

**Figura 28**

*Panel de Configuración*



## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

Figura 29

Panel de Resultados

Item	In	Out	Gas natural
Temperatura °F	113.000	100.000	OK
Presión <i>psig</i>	36.000	80.000	OK
Caudal gas <i>MMSCFD</i>	0.812	0.789	OK
Composición molar Metano (CH <sub>4</sub> )	0.7312	0.7511	OK
Composición molar Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0.0405	0.0414	OK
Composición molar Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0.0455	0.0456	OK
Composición molar n-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0206	0.0193	OK
Composición molar i-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0115	0.0111	OK
Composición molar n-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0059	0.0045	Revisar
Composición molar i-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0076	0.0063	Revisar
Composición molar n-Hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	0.0057	0.0026	OK
Composición molar n-Heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	0.0057	0.0009	OK
Composición molar n-Octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	0.0031	0.0001	OK
Composición molar n-Nonano (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> )	0.0017	0.0000	OK
Composición molar n-Decano (C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> )	0.0009	0.0000	OK
Composición molar Undecano (C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> )	0.0003	0.0000	OK
Composición molar Dioxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0.1059	0.1086	OK
Composición molar Nitrogeno (N <sub>2</sub> )	0.0073	0.0075	OK
Composición molar Acido Sulfurico (H <sub>2</sub> S)	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Agua (H <sub>2</sub> O)	0.0066	0.0012	OK
Composición molar Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Propileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Monoxido de Carbono (CO)	0.0000	0.0000	OK
HHV <i>MJ/m<sup>3</sup></i>	36.0000	44.3587	OK
Dew point gas °F		33.894	OK
Dew point H <sub>2</sub> O °F		36.998	OK
Formación de Hidratos °F		41.229	OK
Formación de Hidratos <i>psig</i>		285.085	OK
Condensados Barril/día		19.880	OK
Fracción de vapor a la salida		1	OK

**Paso 6:** Adicional al panel de resultados el módulo cuenta con una ventana en la que se especifica el estado de la simulación, si la simulación se ejecutó con éxito aparecerá en color

HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES  
verde un mensaje “Simulación ejecutada con éxito”, de lo contrario se mostrará el mensaje  
“Problemas en la simulación”

**Figura 30**

*Panel de estado de simulación*



## 5. Guía de Resolución de Problemas

### 5.1. Preguntas Frecuentes

#### 1. ¿Existen restricciones para los parámetros operativos?

**Respuesta:** Si, toda variación en los parámetros operativos va a influenciar en las restricciones con respecto a capacidad de intercambio energético, se requieren valores mínimos en términos de caudal y temperatura de agua de enfriamiento y temperatura de salida del gas. Para evitar la condensación de hidrocarburos, el fabricante recomienda mantener una temperatura de 15°C por encima del *dew point* del gas. Por otro lado, la presión y temperatura influyen en la formación de hidratos, en general para que se formen estos compuestos se deben tener altas presiones y bajas temperaturas. Se podrá hacer seguimiento y control de hidratos mediante el ítem “**Formación de hidratos**” en el panel de resultados.

#### 2. ¿Qué hacer si la simulación presenta problemas o no converge?

**Respuesta:** Se podrá monitorear el estado de la simulación mediante el panel de estado de simulación. Normalmente cuando se presenta el mensaje de “**Problemas en la Simulación**” es debido a que los parámetros de entrada que se han establecido generan errores de convergencia en Hysys, para resolver este problema intente cambiar dichos parámetros.

#### 3. ¿Puedo modificar directamente la simulación en Aspen HYSYS?

**Respuesta:** No, el diseño de la simulación se debe mantener ya que cualquier modificación puede afectar la conexión con Excel y generar errores al momento de usar el Módulo HyGas. **Por ningún motivo se deben realizar modificaciones.**

**Anexo B***Manual técnico del módulo HyGas***Manual técnico del módulo HyGas**

“TRATAMIENTO Y COMPRESIÓN DE GAS PARA APROVECHAMIENTO EN MICROTURBINAS

CAPSTONE GREEN ENERGY“

**Versión A**

**“15 de enero del 2024”**

## Contenido

<b>1. Objetivos.....</b>	<b>69</b>
1.1. Objetivo general .....	69
1.2. Objetivos Específicos .....	69
<b>2. Descripción Técnica.....</b>	<b>70</b>
2.1. Diseño de la simulación en Aspen HYSYS .....	70
<b>3. Ejemplos .....</b>	<b>73</b>
3.1.Caso 1: Gas con alto contenido de compuestos CH <sub>5</sub> + .....	73
3.2.Caso 2: Gas con alto contenido de livianos.....	75

**Lista de figuras**

<b>Figura 1.</b> Simulación propuesta en Aspen Hysys del tratamiento de gas .....	71
<b>Figura 2.</b> Gráfica de formación de hidratos .....	72
<b>Figura 3.</b> Ejemplo gas alto contenido CH <sub>5</sub> +.....	73
<b>Figura 4.</b> Panel de resultados caso 1 .....	74
<b>Figura 5.</b> Ejemplo gas alto contenido de hidrocarburos livianos.....	75
<b>Figura 6.</b> Panel de resultados caso 2 .....	76

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo general

Ofrecer información detallada del funcionamiento interno del módulo en Excel *HyGas* que permita analizar las variables que condicionan la viabilidad del aprovechamiento de gases ricos en hidrocarburos pesados y de alto poder calorífico teniendo como base una simulación general en el software Aspen Hysys.

### 1.2 Objetivos específicos

- ✓ Explicar la interpretación de los resultados generados por la simulación en HYSYS dentro de Excel, destacando los parámetros clave del tratamiento de gas.
- ✓ Detallar la estructura de la simulación en Aspen Hysys que sirve como base de los resultados obtenidos en el módulo de Excel *HyGas*.
- ✓ Definir y especificar de manera detallada los requisitos operativos, capacidades funcionales y limitaciones del módulo *HyGas*, proporcionando un marco claro para su implementación y uso.
- ✓ Ofrecer casos prácticos y ejemplos con datos de muestra para validar cómo utilizar el módulo en situaciones típicas de tratamiento de gas.
- ✓ Crear una guía que contenga procedimientos detallados para diagnosticar y resolver problemas técnicos que puedan surgir dentro del módulo *HyGas*, basándose en las heurísticas recogidas de la experiencia de los ingenieros en el campo.

## 2. Descripción Técnica

### 2.1 Diseño de la simulación en Aspen HYSYS

Para llevar a cabo el diseño de la simulación en Aspen Hysys, se optó por utilizar el paquete termodinámico Peng-Robinson. Esta elección se fundamenta en su amplio reconocimiento y uso, ya que no solo es uno de los más conocidos, sino que también resulta ser útil para calcular equilibrios líquido-vapor, densidades líquidas y el factor de compresibilidad (García del Valle, 2018).

En la Figura 1, la zona azul muestra una etapa de saturación con agua (SAT-101) como precaución técnica para evitar la entrada de posibles líquidos que puedan afectar el funcionamiento de los equipos.

Posteriormente, en rojo, se distingue la fase de compresión, utilizando un compresor C-101 para aumentar la presión hasta 150 psig, generando un incremento en la temperatura. Esta temperatura se regula con un enfriador de aire (*air cooler* AC-101), que emplea aire a temperatura ambiente como refrigerante y tiene un delta T mínimo de 10°F. Luego, un *scrubber* V-102 elimina los condensados generados en la etapa previa de compresión y enfriamiento.

Seguido a esta separación, se encuentra una etapa de enfriamiento marcada en morado. Esta fase es más rigurosa, ya que implica una disminución de temperatura mayor que el *air cooler*. Aquí, se emplea un intercambiador E-101 (generalmente de placas) para retirar una cantidad significativa de livianos del gas. Se utiliza una mezcla de agua-trietilenglicol para reducir la temperatura del gas hasta 50°F (delta T mínimo de 10°F), lo que permite condensar gran parte de los componentes pesados y algunos livianos, que se eliminan en el *scrubber* V-103.

El gas resultante, a una presión elevada por la compresión y enfriamiento, pasa por una última etapa de tratamiento (marcada en amarillo). Aquí, se agrega una válvula reguladora VLV-101 para reducir la presión a 80 psig, adecuada para el ingreso del gas según las especificaciones del fabricante de las turbinas.

El último equipo considerado en la simulación es un calentador E-103, referido como un economizador, utilizado para disminuir la carga energética en el sistema de enfriamiento. Este economizador es un intercambiador de placas gas-gas que pone en contacto indirecto dos corrientes de gas diferentes. Se eligió una temperatura estándar de salida de 100°F (37 °C) como

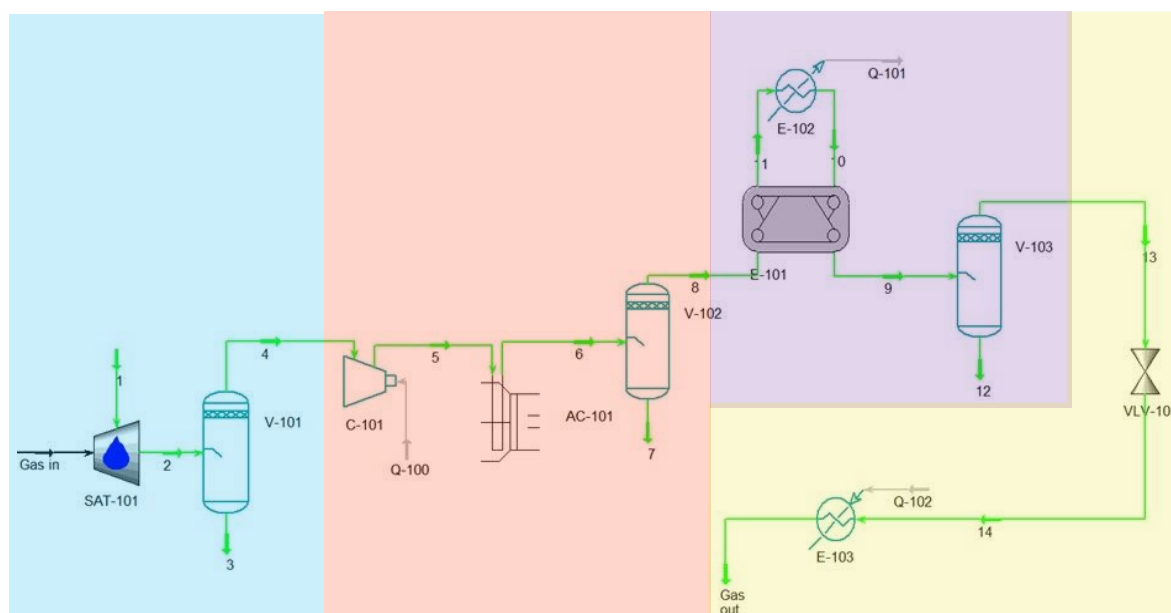
## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

valor predefinido, basado en un rango observado en registros históricos (80 a 124 °F) y la condición mínima de temperatura establecida por las turbinas Capstone para evitar la entrada de líquidos.

Aunque el economizador no se consideró en la simulación debido a la necesidad de ingresar manualmente la temperatura de salida, se estableció un valor estándar basado en registros previos para garantizar una temperatura mínima segura (15°C por encima del *dew point* del gas), manteniendo una diferencia adecuada con el punto de rocío del gas, evitando la entrada de líquidos a los equipos.

### Figura 31

*Simulación propuesta en Aspen Hysys del tratamiento de gas*



Como condición a controlar también se tiene la formación de hidratos, las cuales suponen restricciones en la viabilidad y diseño del proceso, es por esto por lo que a todas las corrientes se les aplico un análisis de formación de hidratos, que por sus condiciones operativas las corrientes 9 y 13 son las que presentan un mayor riesgo de ocurrencia.

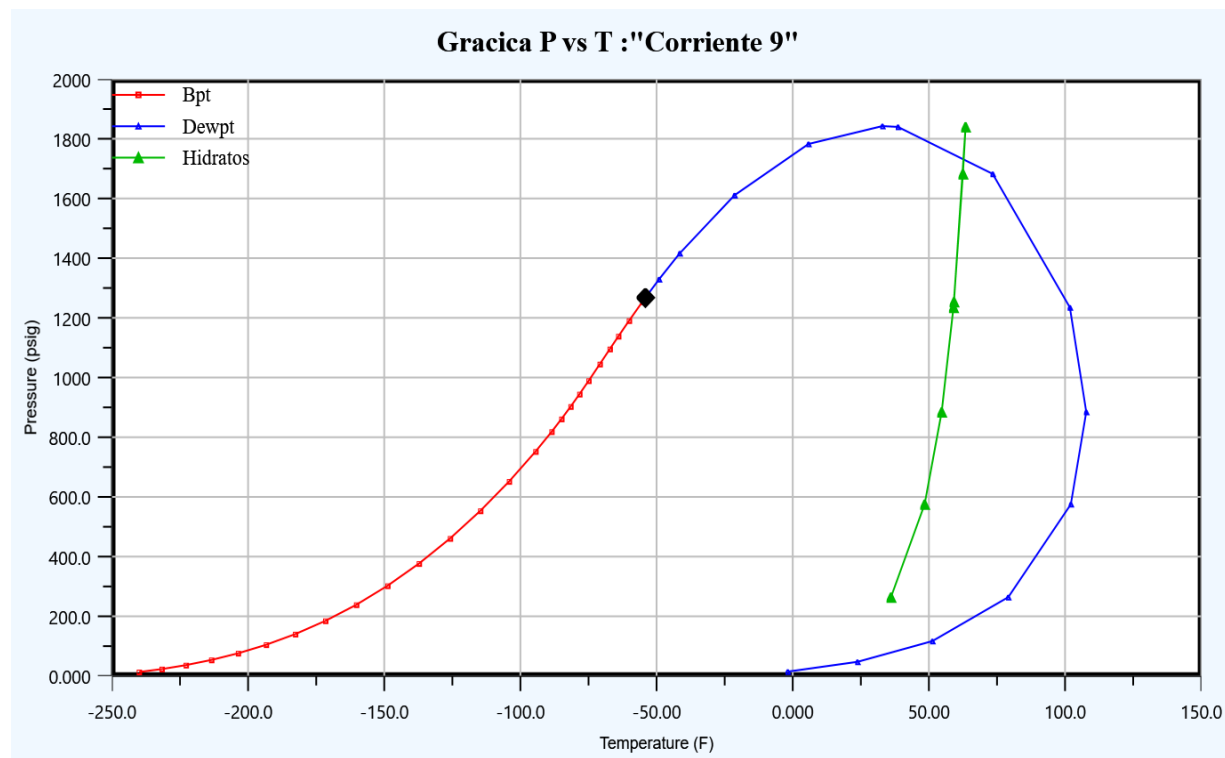
Específicamente, para la corriente 9 de un caso de estudio, se observa en la figura 1 un intervalo crítico identificado por la línea verde. Esta línea señala el rango donde se da la formación de hidratos, desde aproximadamente 36°F y 279 psig hasta alrededor de 63°F y 1816 psig. Es esencial evitar estas condiciones para prevenir la formación de hidratos, ya que su presencia podría acarrear complicaciones significativas en todo el proceso.

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

En resumen, es fundamental evitar que las condiciones de temperatura y presión alcancen valores críticos para prevenir la formación de hidratos y garantizar el funcionamiento óptimo del sistema, minimizando así posibles complicaciones técnicas.

**Figura 32**

*Gráfica de formación de hidratos*



### 3. Ejemplos y recomendaciones

#### 3.1 Caso 1: Gas con alto contenido de compuestos CH5+

Los gases con alto contenido de CH5+ son muy comunes en contexto petroleros y ponen en riesgo la operatividad de las microturbinas Capstone ya que poseen una temperatura de rocío elevada, lo que puede generar una condensación no deseada que a su vez ocasionaría puntos calientes en la cámara de combustión. Un ejemplo práctico de esto se muestra en la figura 3.

**Figura 33**

*Ejemplo gas alto contenido CH5+*

Item	In
Temperatura °F	120.000
Presión <i>psig</i>	30.000
Caudal gas <i>MMSCFD</i>	1.000
Composición molar Metano (CH4)	0.6320
Composición molar Etano (C2H6)	0.0700
Composición molar Propano (C3H8)	0.0400
Composición molar n-Butano (C4H10)	0.0200
Composición molar i-Butano (C4H10)	0.0100
Composición molar n-Pentano (C5H12)	0.0050
Composición molar i-Pentano (C5H12)	0.0030
Composición molar n-Hexano (C6H14)	0.0100
Composición molar n-Heptano (C7H16)	0.0100
Composición molar n-Octano (C8H18)	0.0100
Composición molar n-Nonano (C9H20)	0.0100
Composición molar n-Decano (C10H22)	0.0000
Composición molar Undecano (C11H24)	0.0000
Composición molar Dioxido de Carbono (CO2)	0.0800
Composición molar Nitrogeno (N2)	0.1000
Composición molar Acido Sulfurico (H2S)	0.0000
Composición molar Agua (H2O)	0.0000
Composición molar Oxígeno (O2)	0.0000
Composición molar Propileno (C3H6)	0.0000
Composición molar Acetileno (C2H2)	0.0000
Composición molar Hidrogeno (H2)	0.0000
Composición molar Monoxido de Carbono (CO)	0.0000
HHV <i>MWh/m3</i>	30.0000

La figura 3 muestra que el gas presenta un elevado contenido de hidrocarburos pesados a partir de los hexanos. En este caso, se ha determinado que un tratamiento estándar mediante la

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

aplicación de presión y un proceso criogénico es adecuado para llevar el gas a condiciones óptimas para las microturbinas Capstone.

Para este tipo de gases, no es necesario implementar condiciones operativas extremas en cuanto a presión y temperatura, dado que los compuestos CH<sub>5</sub><sup>+</sup> son altamente sensibles a las variaciones en estos parámetros. En otras palabras, tienden a condensarse fácilmente ante perturbaciones en presión y temperatura.

La figura 4 presenta el análisis del gas resultante en el módulo, donde se aplicó una presión de 100 psig y una temperatura de agua de enfriamiento de 40°F. Se observa que, bajo estas condiciones, el gas se trata adecuadamente para su aprovechamiento en microturbinas, minimizando el riesgo de formación de hidratos. Además, la fracción de vapor a la salida es 1, indicando que no hay presencia de una mezcla líquido-vapor en la salida del proceso asegurando la integridad de los equipos.

### Figura 34

#### Panel de resultados caso 1

Item	In	Out	Gas natural
Temperatura °F	120.000	100.000	OK
Presión psig	30.000	80.000	OK
Caudal gas MMSCFD	1.000	0.960	OK
Composición molar Metano (CH <sub>4</sub> )	0.6320	0.6574	OK
Composición molar Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0.0700	0.0724	OK
Composición molar Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0.0400	0.0405	OK
Composición molar n-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0200	0.0183	OK
Composición molar i-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0100	0.0037	OK
Composición molar n-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0050	0.0038	OK
Composición molar i-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0030	0.0025	OK
Composición molar n-Hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	0.0100	0.0044	OK
Composición molar n-Heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	0.0100	0.0013	OK
Composición molar n-Octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	0.0100	0.0002	OK
Composición molar n-Nonano (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> )	0.0100	0.0000	OK
Composición molar n-Decano (C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Undecano (C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Dioxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0.0800	0.0830	OK
Composición molar Nitrogeno (N <sub>2</sub> )	0.1000	0.1041	OK
Composición molar Acido Sulfurico (H <sub>2</sub> S)	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Agua (H <sub>2</sub> O)	0.0000	0.0017	OK
Composición molar Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Propileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Monoxido de Carbono (CO)	0.0000	0.0000	OK
HHV MMBtu	30.0000	46.0700	OK
Dew point gas °F		45.303	OK
Dew point H <sub>2</sub> O °F		46.057	OK
Formación de Hidratos °F		34.125	OK
Formación de Hidratos psig		334.288	OK
Condensados Barril/día		48.615	OK
Fracción de vapor a la salida		1	OK

### 3.2. Caso 2: Gas con alto contenido de livianos

Como segundo caso se puede analizar el ejemplo de gases con alto contenido de livianos, que si bien no son tan fácilmente condensables se deben garantizar los límites estipulados por Capstone. En este caso específico (figura 5) se tiene una alta composición de propano, butanos y pentanos. Por literatura se sabe que los hidrocarburos livianos son menos sensibles a los cambios de temperatura y presión.

#### Figura 35

*Ejemplo gas alto contenido de hidrocarburos livianos*

Item	In
Temperatura °F	100.000
Presión psig	30.000
Caudal gas MMSCFD	1.000
Composición molar Metano (CH <sub>4</sub> )	0.7000
Composición molar Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0.0450
Composición molar Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0.0500
Composición molar n-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0500
Composición molar i-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0500
Composición molar n-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0059
Composición molar i-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0076
Composición molar n-Hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	0.0057
Composición molar n-Heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	0.0000
Composición molar n-Octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	0.0000
Composición molar n-Nonano (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> )	0.0000
Composición molar n-Decano (C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> )	0.0000
Composición molar Undecano (C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> )	0.0000
Composición molar Dioxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0.0600
Composición molar Nitrogeno (N <sub>2</sub> )	0.0260
Composición molar Acido Sulfurico (H <sub>2</sub> S)	0.0000
Composición molar Agua (H <sub>2</sub> O)	0.0000
Composición molar Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0.0000
Composición molar Propileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	0.0000
Composición molar Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0.0000
Composición molar Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	0.0000
Composición molar Monoxido de Carbono (CO)	0.0000
HHV MJ/m <sup>3</sup>	30.0000

En situaciones como estas, es imperativo aplicar un tratamiento más riguroso en términos de las variables operativas. Simplemente aplicar una presión de 150 psig a la salida del compresor

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

resulta insuficiente para alcanzar los límites establecidos por el fabricante. No se logran cumplir los rangos deseados para la composición de butanos y pentanos, y al reducir demasiado la temperatura, se incrementa el riesgo de formación de hidratos.

Para abordar estas limitaciones, se optó por incrementar la presión a 180 psig a la salida del compresor. Esto condujo a la condensación de los pentanos, permitiendo cumplir con los límites de composición establecidos para este componente. Sin embargo, persiste un exceso de butanos en la mezcla. Los resultados detallados de este tratamiento se presentan en la figura 6.

**Figura 36**

*Panel de resultados caso 2*

Item	In	Out	Gas natural
Temperatura °F	100.000	100.000	OK
Presión psig	30.000	80.000	OK
Caudal gas MMSCFD	1.000	0.972	OK
Composición molar Metano (CH <sub>4</sub> )	0.7000	0.7181	OK
Composición molar Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> )	0.0450	0.0456	OK
Composición molar Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	0.0500	0.0488	OK
Composición molar n-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0500	0.0428	Revisar
Composición molar i-Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> )	0.0500	0.0451	Revisar
Composición molar n-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0059	0.0036	OK
Composición molar i-Pentano (C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> )	0.0076	0.0052	OK
Composición molar n-Hexano (C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> )	0.0057	0.0018	OK
Composición molar n-Heptano (C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar n-Octano (C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar n-Nonano (C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar n-Decano (C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Undecano (C <sub>11</sub> H <sub>24</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Dioxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	0.0600	0.0613	OK
Composición molar Nitrogeno (N <sub>2</sub> )	0.0260	0.0267	OK
Composición molar Acido Sulfurico (H <sub>2</sub> S)	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Agua (H <sub>2</sub> O)	0.0000	0.0010	OK
Composición molar Oxígeno (O <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Propileno (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Acetileno (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Hidrogeno (H <sub>2</sub> )	0.0000	0.0000	OK
Composición molar Monoxido de Carbono (CO)	0.0000	0.0000	OK
HHV Btu/lbm?	30.0000	49.4884	Revisar
Dew point gas °F		22.674	OK
Dew point H <sub>2</sub> O °F		32.982	OK
Formación de Hidratos °F		47.369	OK
Formación de Hidratos psig		219.090	OK
Condensados Barril/dia		24.597	OK
Fracción de vapor a la salida		1	OK

## HERRAMIENTA COMO RESPALDO EN PROYECTOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA EN SES

En situaciones en las que no es posible cumplir con los rangos establecidos, resulta beneficioso consultar directamente con el fabricante para explorar la viabilidad de aprovechar estos gases. Generalmente, la respuesta a estas consultas sugiere mantener una temperatura constante del gas mediante un intercambiador de tipo serpentín en la tubería del gas, ya que la presencia de líquidos es uno de los principales desafíos asociados a estos gases.

Asimismo, se recomienda consultar con el fabricante sobre el elevado poder calorífico de los gases. Aunque heurísticamente es posible adaptar las turbinas en estos casos, el principal inconveniente suele radicar en el diseño de la cámara de combustión. En caso de ser necesario, esta puede ser personalizada según las características del gas para garantizar la viabilidad técnica del aprovechamiento de este.