

Caracterización por Nodos y Creación de una Herramienta de Análisis Operacional para la Red de Gas Combustible de la Refinería de Barrancabermeja Ecopetrol S.A.

Andrés Eduardo González Sanabria

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Químico

Director:

Hernando Guerrero Amaya

Ph.D. Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Codirector:

Leonardo Jaime Basante Herrera

Ingeniero Industrial

Universidad Industrial De Santander
Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas
Escuela De Ingeniería Química
Bucaramanga
2021

Dedicatoria

A Dios, ser supremo, quien me dio la vida, una familia espectacular y la oportunidad de estudiar para convertirme en ingeniero químico.

A mi Madre quien es el motor de mi vida.

A mi Padre quien me ha enseñado a luchar por mis objetivos.

A mis tíos quienes además de ser como unos padres más, me apoyaron para que me fuese posible terminar la carrera.

A mi nonito Carlos y mi nonita Aminta, quienes en el cielo deben estar orgullosos de mí.

Agradecimientos

A ECOPETROL S.A. por permitirme realizar la práctica empresarial.

A los ingenieros Oscar Miguel Miranda Rios y Leonardo Jaime Basante Herrera por su apoyo y enseñanzas durante la práctica.

Al profesor Hernando Guerrero Amaya por ser mi director de proyecto de grado y un ejemplo a seguir.

A Juan José Bonilla, Silvia Güiza, Silvia León, Camila Algarra, Andrés Valbuena, Dayana Harris, por ser esos amigos que me dejo la carrera.

A la escuela de Ingeniería química y la Universidad Industrial de Santander por brindarme una formación integral y de calidad.

Tabla de Contenido

Introducción 11

Descripción de la Empresa 13

1.Marco Teórico 14

2. Objetivos 19

2.1 General 19

2.2 Específicos 19

3. Metodología 20

Fase 1: Diseño herramienta de cálculo de diferentes propiedades del gas combustible 20

Fase 2: Construcción de Base de Datos Histórica de las Cromatografías de las Unidades en las Cuales se Monitorea la Calidad del Gas. D-958, D-940, D-2421 y V-5102 y Aplicación de estos en Herramienta de Cálculo 21

Fase 3: Creación Dashboard en Excel, el cual permita visualizar las corrientes de la red de gas combustible en tiempo real con sus respectivas composiciones, y propiedades calculadas en la herramienta de cálculo diseñada 22

4. Resultados 24

4.1 Diseño herramienta de cálculo de diferentes propiedades del gas combustible 24

4.2 Caracterización por nodos de la red de gas combustible sector refinería (diciembre 2018 – diciembre 2020)..... 25

4.3 Caracterización del gas combustible para cada nodo del sector refinera.....	26
4.4 Poder calorífico inferior sector refinera	27
4.5 Índice de Wobbe inferior sector refinera	28
4.6 Temperatura adiabática de llama sector refinera	29
4.7 Emisiones gas efecto invernadero sector refinera.....	30
4.8 Número de metanos sector refinera.....	31
4.9 Relación aire - combustible sector refinera.....	33
4.10 Tablero de monitoreo red de gas combustible sector refinera	34
4.11 Panel principal del tablero de monitoreo.....	35
4.12 Paneles secundarios del tablero de monitoreo.....	37
5. Conclusiones	40
6. Recomendaciones.....	41
Referencias Bibliográficas	42
Anexos.....	44

Lista de Tablas

Tabla 1. Recibos y unidades usuarias por nodo del sector refinería	15
Tabla 2. Problemas de intercambiabilidad de gases.....	17
Tabla 3. Actividades desarrolladas durante la práctica empresarial en Ecopetrol S.A	23
Tabla 4. Caracterización por nodos gas combustible sector refinería.....	27

Lista de Figuras

Figura 1. Red de gas combustible sector refinera de la GRB	14
Figura 2. Esquema metodol6gico del proyecto de practica empresarial	20
Figura 3. Herramienta de c6lculo de propiedades del gas combustible	25
Figura 4. Poder calorifico inferior sector refinera.....	28
Figura 5. Índice de Wobbe inferior sector refinera	29
Figura 6. Temperatura adiabática de llama sector refinera	30
Figura 7. Emisiones gas efecto invernadero sector refinera	31
Figura 8. Número de metanos sector refinera	32
Figura 9. Relación aire – combustible sector refinera.....	34
Figura 10. Dashboard red de gas combustible departamento PSI.....	36
Figura 11. Dashboard D-940 departamento PSI	38

Lista de Anexos

Anexo A. Comportamiento red de gas combustible sector refinería	44
Anexo B. Comportamiento D-958 2018-2020	45
Anexo C. Comportamiento D-2421 2018-2020	46
Anexo D. Comportamiento D-940 2018-2020.....	47
Anexo E. Comportamiento V-5102 2018-2020	48
Anexo F. Dashboard D-958 departamento PSI.....	49
Anexo G. Dashboard D-2421 departamento PSI	50
Anexo H. Dashboard V-5102 departamento PSI	51

Resumen

Título: caracterización por nodos y creación de una herramienta de análisis operacional para la red de gas combustible de la refinería de Barrancabermeja Ecopetrol S.A. *

Autor: Andrés Eduardo González Sanabria **

Palabras Clave: Gas Combustible, Intercambiabilidad de Gases, Número de Metano, Índice de Wobbe.

Descripción:

El departamento PSI de la refinería de Barrancabermeja de Ecopetrol es el encargado de la captación y producción de los servicios industriales utilizados en el sector refinería de la GRB, en su ejercicio operativo son los responsables de la calidad del gas combustible, calidad la cual es monitoreada a través del laboratorio de la refinería mediante cromatografía de gases, y de la cual solo se obtienen los datos de composición y poder calorífico inferior del gas, datos los cuales son muy relevantes pero que no son suficientes para tomar decisiones sobre cambios en la red de gas combustible. En este sentido, se decidió crear una herramienta de cálculo de diferentes propiedades del gas como temperatura adiabática de llama, gases efecto invernadero, etc. y de algunos parámetros relacionados con intercambiabilidad de gases como el índice de Wobbe inferior y el número de metanos, proceso el cual se llevó a cabo en Microsoft Excel y el cual funciona en paralelo con PI Datalink, software que permite cargar los datos en línea del laboratorio; usando así esta herramienta como base para realizar 2 proyectos, el primero fue una caracterización por nodos del funcionamiento de la red de gas combustible para un periodo de 2 años, en la cual se obtuvo una caracterización del gas que paso por cada drum del sector refinería, permitiendo un conocimiento más a fondo de la red y que funciona como soporte para comparar y establecer objetivos para los años posteriores; el segundo proyecto fue un tablero de monitoreo en línea, el cual funciona como una herramienta de análisis operacional, que permite anticiparse a eventos operativos inesperados, prevenir daños tempranos a los activos y soportar la toma de decisiones para mejorar la eficiencia de procesos.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

Director: Hernando Guerrero Amaya. Codirector: Leonardo Jaime Basante Herrera.

Abstract

Title: Characterization by Nodes and Creation of an Operational Analysis Tool for the Fuel Gas Network of the Refinery of Barrancabermeja Ecopetrol S.A. *

Author: Andres Eduardo Gonzalez Sanabria **

Key Words: Fuel Gas, Gas Interchangeability, Methane Number, Wobbe Index.

Description:

The PSI department of the Barrancabermeja refinery of Ecopetrol is in charge of capturing and producing the industrial services used in the GRB refinery sector, in their operational exercise they are responsible for the quality of the fuel gas, quality which is monitored through the refinery laboratory using gas chromatography, and from which only the composition data and lower calorific value of the gas are obtained, data which are very relevant but are not enough to make decisions about changes in the fuel gas network. In this sense, it was decided to create a tool for calculating different gas properties such as adiabatic flame temperature, greenhouse gases, etc. and for some parameters related to gas interchangeability such as the lower Wobbe index and the methane number, process which was carried out in Microsoft Excel and which works in parallel with PI Datalink, software that allows you to upload laboratory data online; Using this tool as a basis to carry out 2 projects, the first was a characterization by nodes of the operation of the fuel gas network for a period of 2 years, in which a characterization of the gas that passed through each drum in the refinery sector was obtained, allowing a more in-depth knowledge of the network and that works as a support to compare and establish objectives for subsequent years; the second project was an online monitoring Dashboard, which functions as an operational analysis tool, which allows anticipating unexpected operational events, preventing early damage to assets, and supporting decision-making to improve process efficiency.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.
Director: Hernando Guerrero Amaya. Codirector: Leonardo Jaime Basante

Introducción

El departamento de servicios industriales refinería (PSI) de la refinería de Barrancabermeja (GRB) es el responsable de la producción de agua desmineralizada, agua de enfriamiento, agua potable, agua contra incendios, aire de instrumentos, aire industrial, vapor y energía eléctrica para todas las unidades de proceso y administrativas del área refinería. (s.f., diapositiva 131)

En su ejercicio operativo, este departamento es responsable del suministro del gas combustible que alimenta las unidades de proceso de la refinería, como los hornos de las unidades topping y las calderas de vapor, sin embargo, debido a lo anterior y a los diferentes aportantes (desvíos con elevadas concentraciones de hidrógeno y otros compuestos originados por los gases de cola provenientes de los procesos de cracking catalítico), la red de gas combustible tiene una gran variabilidad en su composición y poder calorífico diariamente; estas variables tienen un gran impacto en algunos indicadores clave de desempeño como la carga de crudo, la producción de medios, entre otros.

La refinería cuenta con un laboratorio encargado de la toma de muestras del gas combustible para que, mediante cromatografía de gases, obtener la composición de este gas y cargar a la red CD-LAB de Ecopetrol estos datos junto con el poder calorífico del gas. Estos datos pueden ser usados para el cálculo de otras propiedades las cuales pueden ser de gran importancia para el análisis operacional, y también desde el punto de vista ambiental como lo es, la temperatura adiabática de llama, las emisiones de gases efecto invernadero, el índice de Wobbe, entre otras propiedades, y por esto se propone el diseño de una herramienta de cálculo para estas propiedades a partir de los datos registrados de las cromatografías.

El departamento PSI y todos los consumidores de la red de gas combustible, requieren conocer el comportamiento en tiempo real e histórico de la red de gas, para esto se realizó un estudio de caracterización por nodos de los últimos 2 años de la red de gas combustible y se diseñó un Dashboard en Excel (tablero de monitoreo) el cual permita la visualización, en tiempo real de las composiciones, poder calorífico, temperatura de llama, emisiones GEI, relación aire/combustible, entre otras propiedades del gas en todos los puntos la red de gas combustible sector refinería de la GRB, siendo esta, una herramienta de análisis operacional la cual contribuya a la toma de acciones en cada uno de los escenarios operativos que se puedan presentar, de forma práctica y eficaz.

Descripción de la Empresa

Ecopetrol S.A. es una empresa colombiana dedicada a la industria de Oil & gas, la cual se encuentra ubicada desde enero del 2020 en el puesto 34 del ranking internacional de las empresas más valiosas y además en el puesto 6 de las empresas más fuertes del sector. (Brand Finance, 2020)

Tiene operaciones ubicadas en el centro, sur, oriente y norte del país, además de realizar operaciones en el exterior. Cuenta con dos refinerías, la refinería de Barrancabermeja (GRB) fundada en 1922 y la refinería de Cartagena, adquirida por Ecopetrol en 1974. (Ecopetrol, 2021)

En su cadena de valor, el primer eslabón de la empresa es la exploración, a través del cual descubren acumulaciones de hidrocarburos que sean viables en términos económicos, el segundo eslabón, es el de producción de crudo y gas, que sea realiza directamente, o, en asocio con otras compañías; el tercer eslabón, el transporte, donde mediante los sistemas de oleoductos y poliductos, envían el crudo y el gas a las refinerías o puertos de exportación, el cuarto lugar en su cadena de valor es para la refinación y petroquímica, la cual se lleva a cabo en las refinerías, en donde se encargan de dar un valor agregado al crudo; por último, la función comercial, encargada de conectar a la empresa con los mercados del país y del mundo. (Ecopetrol, 2021)

Entre sus líneas de producción destacan la venta de crudos, y combustibles derivados del crudo como lo son: ACPM o Diesel, GLP, Combustóleo, Turbocombustible, gasolina motor corriente y extra, queroseno, gasolina de aviación y petroquímicos. (Ecopetrol, 2021)

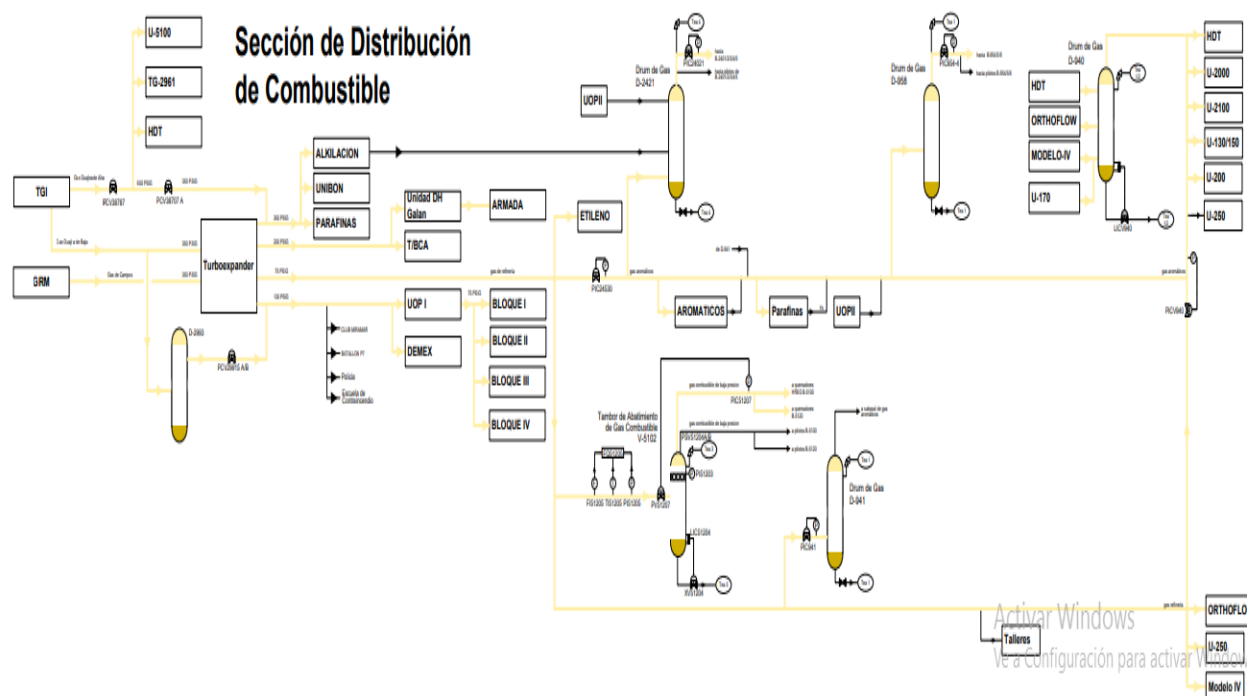
Los ingresos generados por ventas en el tercer trimestre del 2020 incrementaron un 46% comparado con el segundo trimestre del año, lo cual muestra una recuperación en la demanda y mejores precios de realización de crudos. (Semana, 2020)

1. Marco Teórico

El departamento de servicios industriales refinería cuenta con 4 tanques de almacenamiento de gas combustible (drums) los cuales son el D-940, D-958, D-2421 y V-5102, estos drums se encuentran ubicados a lo largo de la red de gas (sector refinería), como se muestra en la Figura 1, estas unidades se encuentran en diferentes puntos estratégicos, donde reciben gas combustible de 3 diferentes fuentes, las cuales son gas Guajira, gas de Campos y por último gas de desvíos, el cual se conoce como gas residuo de otras unidades de proceso el cual es re circulado a la red para su posterior uso.

Figura 1.

Red de gas combustible sector refinería de la GRB



Estos drums de gas combustible se ven afectados en mayor o menor manera de acuerdo con la cantidad de desvíos que recibe cada uno, y a partir de ellos, se envía gas a las diferentes unidades de operación como las calderas B-2400 o las unidades 2000 y 2100.

En la Tabla 1 se presentan los recibos de gas que tiene cada drum y sus respectivas unidades usuarias según la configuración actual.

Tabla 1.

Recibos y unidades usuarias por nodo del sector refinerías

NODO	D-958	D-2421	D-940	V-5102
RECIBOS DE	Cola UOP II Cabezal de gas aromáticos	GLP Vaporizado ALK Cabezal gas aromáticos Etileno (E-4146) UOP II	UOP II Cola Orthoflow Orthoflow HDT	
UNIDADES USUARIAS	Calderas B-950	Calderas B-2400	U-200 U-150 U-130 U-250 U-2100 U-2000 HDT Acido	Caldera B-5100 Caldera B-5120

El análisis operacional es una de las herramientas para el desarrollo eficiente de métodos, utilizada por el personal operativo y de ingeniería en los diferentes procesos (plantas de proceso) de la refinería; a través de esta pueden estudiarse todos los elementos productivos e improductivos de una operación (Collados y Hernández, 2013), en sus planes de mejora, se encuentra la velocidad de respuesta a los demás departamentos ante inconvenientes en el gas combustible del cual son responsables; uno de los principales factores que se analizan en la refinería es el poder calorífico, este se define como la cantidad de calor generado, por unidad de masa o unidad de volumen de la sustancia, al oxidarse completamente, este poder calorífico suele tener dos definiciones específicas el PCS y el PCI, donde el PCI es el usado en la planta ya que éste considera que el vapor de agua

que se encuentra contenido en los gases producto de la combustión no condensa, por lo cual no hay aporte adicional de calor de condensación del vapor de agua. (Fernández, s.f.)

El PCI normalmente es obtenido a través del laboratorio de la refinería mediante cromatografía de gases, la cual es una técnica analítica usada para separar los componentes químicos de la muestra de una mezcla y luego detectarlos para determinar su ausencia o presencia y la cantidad presente. Para que esta técnica sea exitosa, los componentes deben ser volátiles, y térmicamente estables para que no se degraden en el sistema. (Turner, 2021)

Uno de los objetivos del proyecto es el diseño de una herramienta de cálculo de diferentes propiedades del gas combustible que no eran tenidas en cuenta por el departamento, las cuales aportan información valiosa a nivel ambiental y de intercambiabilidad de gases, esta última es la capacidad de cambiar un combustible gaseoso por otro en un equipo de combustión, de forma tal, que, sin realizarle ningún ajuste, no se presenten diferencias desde el punto de vista de eficiencia, seguridad operacional, desempeño o emisiones al medio ambiente. (Ortiz, 2014)

En la Tabla 2 se presentan algunos de los inconvenientes generados cuando se presentan problemas de intercambiabilidad de gases en los equipos de combustión.

Tabla 2.

Problemas de intercambiabilidad de gases.

PROBLEMAS DE INTERCAMBIABILIDAD	
RELACIONADOS CON FENOMENOS DE COMBUSTION	RELACIONADOS CON LA NATURALEZA DE LAS EMISIONES
<ul style="list-style-type: none"> ○ Puntas de llama amarillas ○ Desprendimiento de la llama del quemador ○ Apagado de la llama ○ Autoignicion del gas ○ Retroceso de la llama ○ Problemas de dinamica de la llama 	<ul style="list-style-type: none"> ● Oxidos de nitrogeno (NOx) ● Monoxido de carbono (CO) ● Hidrocarburos sin quemar (CxHy)

Uno de los parámetros más antiguos y a la vez más relevantes respecto al tema anteriormente mencionado es el índice de Wobbe, este se basa en la descripción del fenómeno de flujo de un gas a través de un orificio de área constante, el cual funciona como un inyector. (Ortiz, 2014)

$$IW = \frac{PCI}{\sqrt{dr}} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde PCI, es el poder calorífico inferior y dr, es la densidad relativa del gas.

La gran utilidad de este índice es que, para cualquier orificio, todos los gases que tengan el mismo valor de IW van a suministrar la misma energía. El índice de Wobbe es un indicador sencillo y que brinda una descripción rápida de la intercambiabilidad. En la actualidad, la mayoría de los equipos de combustión, tienen la capacidad de soportar variaciones hasta de un 5% del IW.

Otra propiedad que se tuvo en cuenta al momento de crear la herramienta de cálculo fue la temperatura adiabática de llama, que es la máxima temperatura que pueden obtener los productos

de la reacción de combustión, esto es, aquella obtenida si todo el calor que se genera durante el proceso se usara para calentar productos. (Cala, et al, 2014)

Altas temperaturas adiabáticas de llama pueden generar combustión a alta temperatura (>1300 C) lo cual favorece mecanismos de formación de NO_x térmico y se debe tener en cuenta que las emisiones de NO_x pueden aumentar exponencialmente con la temperatura. (Cala, et al, 2014)

También se decidió agregar un concepto bastante innovador a la calculadora y es la del número de metanos, este es un parámetro para el estudio de intercambiabilidad de gases, el cual permite evaluar la resistencia que cada corriente de gas posee ante la autoignición, la cual es comparada con una mezcla combustible referencia.

Se puede definir como el porcentaje en volumen de metano, el cual, mezclado con hidrogeno es igual a una mezcla desconocida, que, bajo condiciones iguales, genera la misma reacción de sonido audible, productor de altas temperaturas y alta presión, la cual degrada los materiales de los equipos y los corroe, conocida como autoignición. (Saavedra, et al, 2014)

Por último, teniendo en cuenta el factor ambiental, también se agregaron las emisiones de gas efecto invernadero, quienes son cualquier gas que tiene la propiedad de absorber la radiación infrarroja emitida desde la superficie terrestre y volver a irradiarla a la superficie de la tierra, contribuyendo al efecto invernadero. El dióxido de carbono, el metano y el vapor de agua son los gases de efecto invernadero de mayor importancia. También se encuentran en menor medida, los óxidos de nitrógeno y los gases fluorados. (Mann, 2019)

2. Objetivos

2.1 General

Caracterizar históricamente (2018-2020) y diseñar una herramienta de análisis operacional la cual permita conocer en tiempo real las composiciones, poder calorífico, temperatura de llama, entre otras propiedades de la red de gas combustible del sector refinería de la GRB, previniendo eventos operativos inesperados, daños tempranos de los activos y soportando la toma de decisiones para mejorar la eficiencia de los procesos.

2.2 Específicos

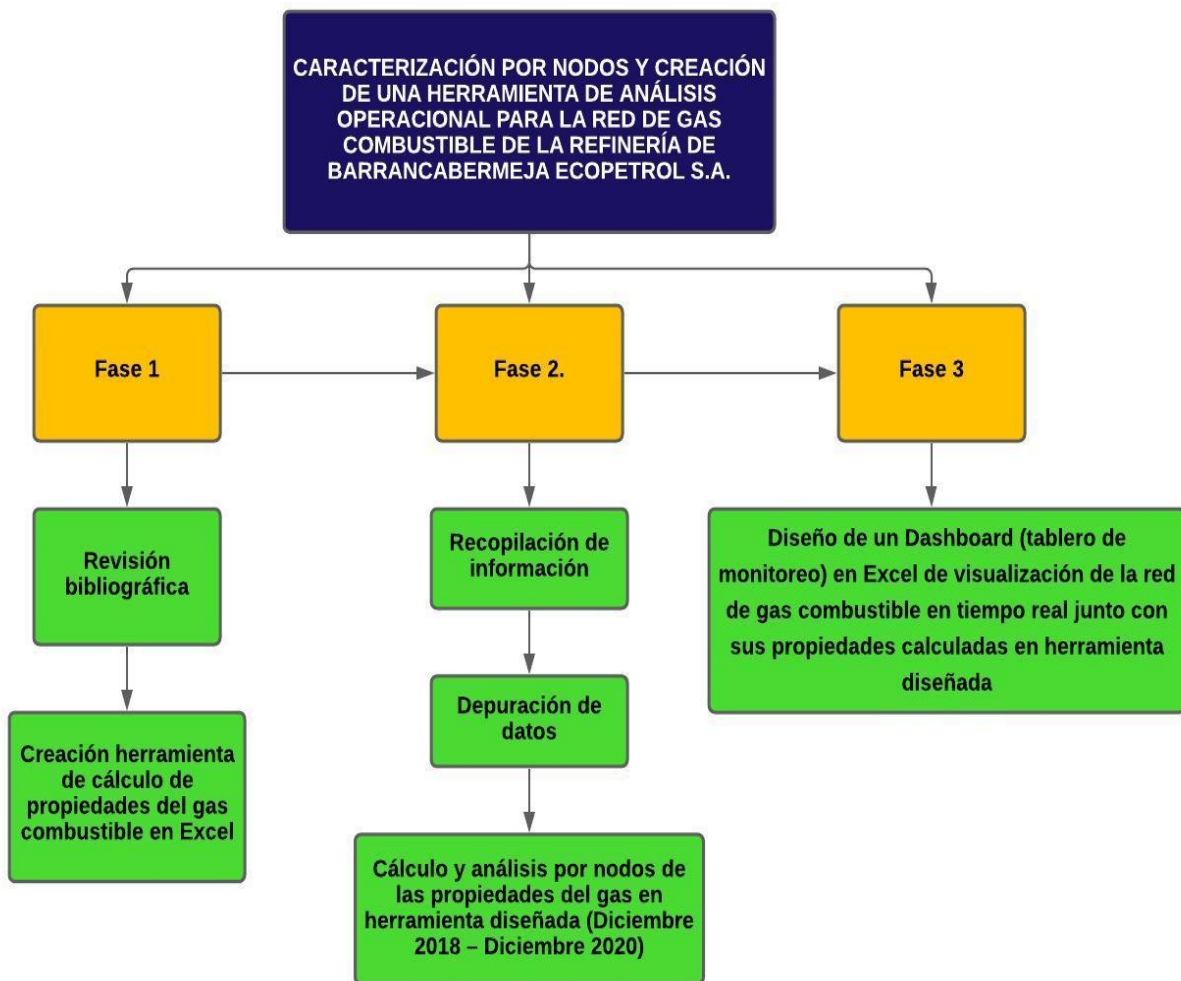
- Diseñar una herramienta de cálculo para la temperatura adiabática de llama, poder calorífico, índice de Wobbe inferior y demás propiedades del gas combustible.
- Construir base de datos histórica con las cromatografías del 2018-2020 de la red de gas combustible del sector refinería y usar los datos obtenidos en la herramienta diseñada, para analizar comportamiento de cada nodo (drum) de la red de gas combustible sector refinería.
- Crear una tabla de monitoreo en Excel (Dashboard), el cual permita visualizar las corrientes de la red de gas combustible en tiempo real con sus respectivas composiciones, poder calorífico, temperatura adiabática de llama, índice de Wobbe inferior y demás propiedades del gas.

3. Metodología

En la Figura 2, se presenta el diagrama de flujo del esquema metodológico del proyecto.

Figura 2.

Esquema metodológico del proyecto de práctica empresarial.



Se creó una herramienta de cálculo en Microsoft Excel, a la cual se ingresan los valores de composición del gas combustible (tomados de la base de datos histórica de procesos de la refinería, software PI Datalink), y esta inmediatamente realiza el cálculo de las diferentes propiedades del gas, las cuales son: poder calorífico inferior, temperatura adiabática de llama, humos húmedos,

humos secos, % máximo de dióxido de carbono, relación aire combustible, emisiones GEI, índice de Wobbe inferior y número de metanos.

Fase 2: Construcción de Base de Datos Histórica de las Cromatografías de las Unidades en las Cuales se Monitorea la Calidad del Gas. D-958, D-940, D-2421 y V-5102 y Aplicación de estos en Herramienta de Cálculo

Actividad 2.1. Recopilación de Información

Se realizó la recopilación de los datos históricos de las cromatografías analizadas en el laboratorio de la GRB mediante muestras tomadas en los puntos en los cuales se tiene medición del gas combustible, estos datos serán tomados del software PI Datalink.

Actividad 2.2. Depuración de Datos

La base de datos obtenida en la actividad 2.1. fue tratada empleando 4 criterios de depuración. Empezando por la eliminación por defecto, en esta se identificaron datos con valores nulos, negativos, o vacíos. Continuando con la identificación de eventos tipos *shutdown*, donde se encuentran datos erróneos por fallas o paradas de planta. El tercer criterio fue el de puntos críticos de control, donde a través de guías y ventanas operativas son definidos los límites para el valor de las variables a seguir. Por último, a través de un análisis estadístico se procedió a la eliminación de datos atípicos a través de diagrama de caja y bigotes.

Actividad 2.3. Cálculo y Análisis por Nodos de las Propiedades del Gas en Herramienta Diseñada (diciembre 2018 – diciembre 2020)

Los datos obtenidos en la actividad 2.2. se ingresaron en la herramienta de cálculo diseñada previamente con el fin de obtener los valores para las propiedades calculadas en cada uno de estos

datos, seguidamente, se procedió a graficar el comportamiento de estas a lo largo de los 2 años analizados y se arrojaron conclusiones y recomendaciones.

Fase 3: Creación Dashboard en Excel, el cual permita visualizar las corrientes de la red de gas combustible en tiempo real con sus respectivas composiciones, y propiedades calculadas en la herramienta de cálculo diseñada

Actividad 3.1. Diseño de un Dashboard en Excel de visualización de la red de gas combustible en tiempo real junto con sus propiedades calculadas en herramienta diseñada

Se procedió al diseño de un tablero de monitoreo en Microsoft Excel, el cual se acoplo con el software de PI Datalink, dicho tablero de monitoreo toma los datos cargados a la red de Ecopetrol del valor actual o ultimo de las cromatografías realizadas, y complementado con la herramienta de cálculo se presentan también en tiempo real las propiedades del gas combustible para las diferentes unidades de la red (D-958, D-940, D-2421 y V-5102)

Actividades desarrolladas durante la práctica empresarial en Ecopetrol S.A.**Tabla 3.***Actividades desarrolladas durante la practica empresaria en Ecopetrol S.A.*

Temática	Actividades realizadas
<p style="text-align: center;">FASE I</p> <p>Diseño herramienta de cálculo de diferentes propiedades del gas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Revisión bibliográfica. ● Creación herramienta de cálculo de propiedades en Excel.
<p style="text-align: center;">FASE 2</p> <p>Construcción de base de datos histórica de las cromatografías de las unidades en las cuales se monitorea la calidad del gas</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Recopilación de información ● Depuración de datos ● Cálculo y análisis por nodos de las propiedades del gas en herramienta diseñada
<p style="text-align: center;">FASE 3</p> <p>Creación dashboard en Excel (tablero de monitoreo)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Diseño de un Dashboard (tablero de monitoreo) en Excel de visualización de la red de gas combustible en tiempo real junto con sus propiedades calculadas en herramienta diseñada.
<p>Actividades complementarias</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Inducción a la práctica empresarial. ● Capacitación y evaluación practica en el software PI DataLink. ● Cursos de formación: HSE, Covid-19, Aprendiendo con Ecopetrol, Ética y cumplimiento. ● Investigación problema desviación coagulante PAC en clarificadores. ● Elaboración análisis flujos de trenes de RO vs cambio de filtros.

4. Resultados

4.1 Diseño herramienta de cálculo de diferentes propiedades del gas combustible

Para iniciar la creación de la herramienta de cálculo para obtener diferentes propiedades del gas combustible fue necesario llevar a cabo un proceso de revisión bibliográfica a través de la cual, como primera instancia se conoció el funcionamiento de la red de gas combustible del sector refinera, seguido de investigar a través de libros, artículos, y proyectos de grado, sobre que propiedades se pueden calcular a través de los datos obtenidos en la refinera y cuáles de ellas pueden aportar un valor al análisis operacional del departamento.

El departamento PSI, al ser el responsable del gas combustible usado como servicio industrial en diversas unidades a lo largo del sector refinera, cuenta día a día con el apoyo del laboratorio de la GRB, el cual se encarga de tomar muestras cada 3 días del gas en diferentes partes de la red, donde posteriormente a través de cromatografía de gases se obtiene la composición y el poder calorífico del gas combustible, información que es cargada a través de la red de Ecopetrol a la plataforma C.D Lab y que pueden ser tomados mediante el software de PI Datalink como recurso de Excel.

Teniendo en cuenta la información obtenida gracias al laboratorio de Ecopetrol y a través de un trabajo integrado con el codirector de la práctica, se decidieron cuales iban a ser las propiedades del gas que se iban a calcular con los datos de composición del gas y que pueden ser de gran utilidad para el departamento, las cuales fueron: % Máximo de CO₂, relación aire/combustible, emisiones de gas efecto invernadero, temperatura adiabática de llama, índice de Wobbe inferior y número de metanos.

A continuación en la Figura 3 se presenta la herramienta de cálculo en Excel diseñada para calcular distintas propiedades de la red de gas combustible, a la cual se ingresan los datos de composición del gas a la izquierda, y se obtienen los resultados en la derecha.

Figura 3.

Herramienta de cálculo de propiedades del gas combustible

GRB GAS															
Componente	% vol	Molar	racion Molar												
HIDROGENO	2.447	2	0,0244685	H2	4,893302	BAL CARBONO	1,0812389							11,066	
OXIGENO	0.464	32	0,0046433	O2	14,85883	BAL HIDROGENO	2,0424128							9,023	
NITROGENO	2.893	28,0134	0,0289309	N2	81,04523	BAL OXIGENO	0,0126857							11,983	
CO	0.000	28	0	CO	0	BAL NITROGENO	7,5778618							15,954	
CO2	0.170	44,01	0,0016996	CO2	7,47972	X	1,0812389	CO2						2,627	
METANO	86.836	16,04	0,8683631	CH4	1392,854	Y	2,0424128	H2O						960,360	
ETANO	3.171	30,07	0,0317087	C2H6	95,34797	at	2,0961024							1922,126	
ETILENO	0.147	28,05	0,0014699	C2H4	4,122986	Z	7,3419812	N2						1215,131	
PROPANO	1.791	44,1	0,0179132	C3H8	78,99739								3,74514171		
PROPILENO	0.004	42,08	3,348E-05	C3H6	0,161924								78,74894235		
ISO-BUTANO	0.952	58,12	0,0055178	C4H10	32,06351										
N-BUTANO	0.666	58,12	0,0066614	C4H10	38,71611										
ISO-PENTANO	0.824	72,15	0,0082427	C5H12	59,47137										
OLEFINAS	0.034	42,08	0,0003445	C3H6	1,449483										
H2S	0.000	34,08	0	H2S	0										
					1811,468										
						PODER CALORIFI	960,96								
						TEMPERATURA DE LL	1922,13								
						INDICE DE WOBBI	1215,1308								
PCI del gas con temperatura de reactivos a 20°C															
h _{TS} - 25= -5															
Producto	h _f (MIST) kJ/kmol	h _{TS} (MIST) kJ/kmol	Ni	N _i (h _{f,i} + (h _T - h _f)) _{base}	Cp (kJ/kgK)	Masa Molar (kg/kmol)	Densidad relativa	Cp@Tprom							
CO2	-393520	-181,361	1,0812389	-425685,881	0,827	44,01		36,33627							
H2O	-241830	-167,85	2,0424128	-434259,507	1,865	18		33,57							
N2	0	-144,829	7,3419812	-1150,23227	1,034	28,0134		28,365856							
					-921095,6										
Reactivo							kg/m3		T LLAMA						
H2	-142,4	0,02447	-3,484031	14,24	2		28,48		-3,484031						
CH4	-160,711	0,86836	-64,936,863	2,254	16,04	0,657	36,15416		-64,936,863						
C2H6	-265,518	0,03171	-2671,34748	1,786	30,07	1,282	53,10362		-2671,34748						
C2H4	-215,4	0,00147	-17,4406321	1,536	28,05	1,18	43,08		-17,4406321						
C3H8	-370,22	0,01791	-1882,14808	1,679	44,1	1,83	74,0439		-1882,14808						
C3H6	-204,10	-323,05	0,00004	-0,73780776	1,535	42,08	1,74	64,61	-0,73780776						
C4H10	-134,200	-485,75	0,00552	-743,170376	1,672	58,12	2,51	97,15	-743,170376						
C4H10	-134,200	-485,75	0,00666	-897,196366	1,672	58,12	2,51	97,15	-897,196366						
C5H12	-146,800	-603,1	0,00824	-1215,00543	1,672	72,15	2,5	120,62	-1215,00543						
C3H6	-204,10	-323,05	0,00034	-7,14168577	1,535	42,08	1,74	64,61	-7,14168577						
H2S	-206,00	0	0,00000	0	0	34,08		0	0						
CO	-110,530	-146,72	0,00000	0	1,048	28		28,344	0						
										PESO MOLECULAR PROMEDIO G	18,11468				
										PESO MOLECULAR AIRE	28,3645				
										DENSIDAD RELATIVA	0,62541				
										INDICE DE WOBBE INFERI	1215,131				
										RHCR	3,745142				
										NÚMERO DE METANO	78,74894				
											67,50403	5,5			

4.2 Caracterización por nodos de la red de gas combustible sector refinera (diciembre 2018 – diciembre 2020)

En este estudio, el objetivo fue caracterizar el comportamiento que tuvo la red de gas a lo largo de los 2 años de análisis; entiéndase como nodo a cada drum que hace parte de la red de gas del sector refinera, los cuales son D-940, D-958, D-2421 y V-5102, cuya ventaja es que permite a la empresa poder entender a profundidad el funcionamiento, la calidad y las propiedades que ha tenido el gas en los diferentes sectores de la red (nodos).

El procedimiento usado para la obtención de la base de datos fue el mencionado en el apartado metodología en la Actividad 2.1, donde mediante el software usado por Ecopetrol llamado PI Datalink, se recopilaron los datos automáticamente usando la función Compressed Data para obtener 1 dato por cada día de estudio, obteniéndose un total de 730 datos de cromatografías para cada nodo en estudio.

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de eliminación de datos, según los 4 criterios mencionados en la Actividad 2.2, donde en todos los criterios se eliminaron datos excepto en el tercero de eventos tipo shutdown, ya que, esta red de gas no tuvo paradas en los dos años de estudio, obteniéndose así una base de datos que constaba de aproximadamente 500 cromatografías para cada nodo de la red.

Por último, cada uno de estos datos de las cromatografías fueron ingresados a la herramienta de cálculo previamente creada con el fin de obtener los valores de las propiedades del gas combustible de cada nodo y poder realizar un estudio más a profundidad; para llevar a cabo este proceso fue creada una macro en Excel la cual tomaba e ingresaba automáticamente los datos a la calculadora de propiedades y los devolvía a la hoja de la base de datos.

Teniendo la base de datos compilada, se realizó el estudio de caracterización por nodos de la red de gas combustible, comparando sus comportamientos para cada propiedad calculada en la herramienta de cálculo y finalizando con una caracterización del gas combustible de cada nodo de la red.

4.3 Caracterización del gas combustible para cada nodo del sector refinera

En la Tabla 4 se presentan los resultados de la caracterización del gas combustible del sector refinera desde diciembre del 2018 hasta diciembre del 2020.

Tabla 4.*Caracterización por nodos gas combustible sector refinería*

NODO	D-958	D-2421	D-940	V-5102
% Metano	28,33 – 55,51	64,59 – 72,19	25,04 – 34,14	88,26 – 91,84
% Hidrogeno	21,78 – 36,86	12,97 – 17,12	37,34 – 43,83	0,00 – 0,26
% Etano	6,55 – 9,31	3,54 – 6,87	5,50 – 10,32	3,90 – 5,45
% Propano	3,07 – 4,80	1,17 – 2,07	3,88 – 4,74	1,31 – 1,74
% Propileno	0,67 – 5,43	0,24 – 2,38	0,17 – 5,05	0,00 – 0,01
% Etileno	1,52 – 4,88	1,50 – 3,13	1,16 – 3,70	0,00 – 0,12
% Nitrógeno	1,68 – 3,67	2,58 – 4,16	1,30 – 3,65	0,83 – 1,33
% Total olefinas	0,09 – 3,22	0,02 – 0,33	1,63 – 4,37	0,00 – 0,01
% Iso-butano	0,87 – 2,02	0,23 – 0,43	1,23 – 2,53	0,27 – 0,38
% N-butano	0,76 – 1,48	0,25 – 0,41	1,27 – 2,09	0,30 – 0,44
% Iso-pentano	0,68 – 1,30	0,19 – 0,41	0,99 – 2,05	0,25 – 0,44
% CO	0,19 0,80	0,32 – 0,68	0,02 – 0,59	0,00 – 0,00
% CO₂	0,12 – 0,55	0,05 – 1,02	0,05 – 0,44	0,07 – 1,62
% Oxígeno	0,03 – 0,27	0,04 – 0,35	0,03 – 0,50	0,01 – 0,10
% H₂S	0,00 – 0,00	0,00 – 0,00	0,00 – 0,13	0,00 – 0,00

4.4 Poder calorífico inferior sector refinería

Esta propiedad es una de las más representativas respecto al proceso de combustión, y una de las más tenidas en cuenta en la refinería.

Las fuentes de gas de la refinería son gas de Campos y gas Guajira, sin embargo, los gases de desvío también entran a ser parte de la red de gas en el sector refinería, aportando entre un 20 a un 30% del total del gas.

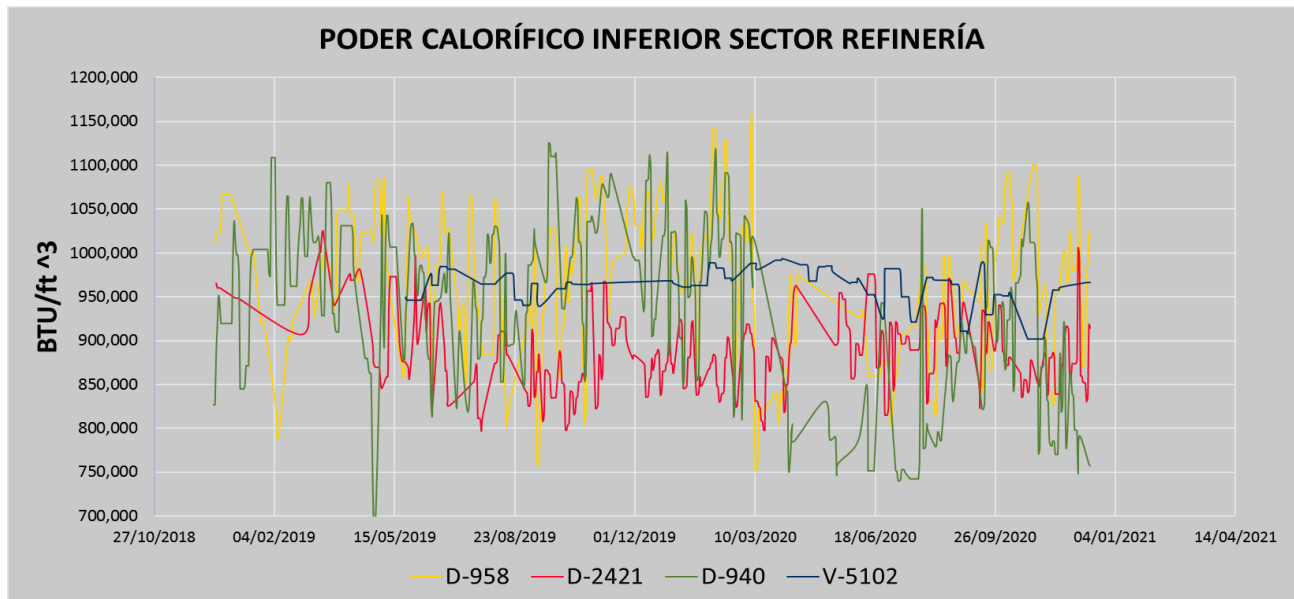
A partir del estudio del PCI de los últimos 2 años podemos deducir que:

- La V-5102 presentó el comportamiento más estable de los 4 nodos en estudio, esto debido a que es la única que no recibe desvíos, esto quiere decir que su gas consta de una mezcla de gas Guajira y gas de Campos, dando lugar a una mezcla mucho más constante y con un PCI más estable.
- Se puede notar el gran impacto que tuvieron los desvíos sobre las variaciones del PCI en los nodos 958, 940 y 2421, donde dichos desvíos elevaron sus concentraciones en

hidrogeno (12 a 43 %), junto con trazas de etileno y propileno (0,5 a 5,4 %), compuestos que tienen un gran impacto sobre el valor del PCI.

Figura 4.

Poder calorífico inferior sector refinería.



4.5 Índice de Wobbe inferior sector refinería

El índice de Wobbe inferior es un parámetro de cálculo rápido y de gran utilidad para obtener información acerca de la intercambiabilidad de un gas, el cual de tenerse en cuenta puede evitar algunos problemas relacionados con fenómenos de combustión.

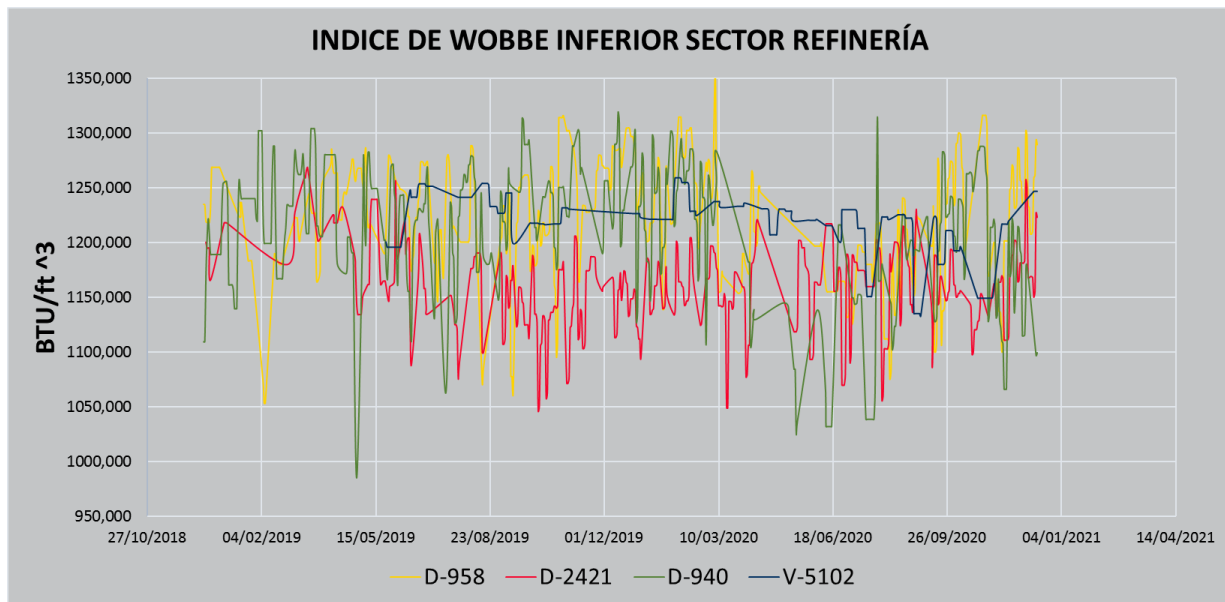
A partir del análisis del IWI de los últimos 2 años se puede concluir que:

- Las calderas B-5100 y B-5120, unidades usuarias del V-5102 fueron aquellas que en menor medida pudieron presentar problemas relacionados con intercambiabilidad de gases ya que en promedio el IWI del 5102 tiene una variación del 1,5%, ya que según la bibliografía los equipos permiten un cambio del IWI hasta del 5%.

- A pesar de presentar fluctuaciones más elevadas, el drum 2421 tuvo variaciones dentro del límite superior del rango sugerido para el IWI con un 4,4 %.
- Puede notarse la estrecha relación entre el PCI y el IWI, ya que, tanto en el D-940 como en el 958, sus variaciones fueron las más elevadas dentro del tiempo de estudio, con fluctuaciones del 6,4 y 6,8% respectivamente, lo cual permite sugerir un mantenimiento más frecuente en sus unidades usuarias.

Figura 5.

Índice de Wobbe inferior sector refinería.



4.6 Temperatura adiabática de llama sector refinería

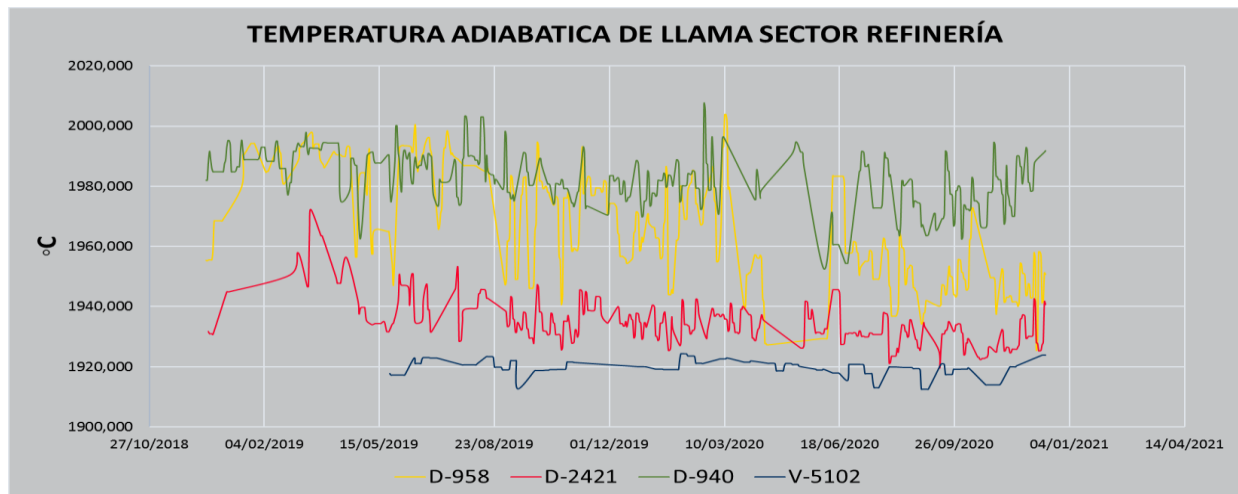
Se ha demostrado que temperaturas elevadas en los procesos petroquímicos son la causa principal que genera fallas en los tubos, dando lugar a corrosión a alta temperatura pues se genera oxidación, carburación, sulfidación y polvo metálico (Cala, et al, 2014) este no es el único problema generado debido a las altas temperaturas adiabáticas de llama, ya que esta está directamente relacionada con la vida útil de los hornos y con la generación de NOx.

Como resultado del análisis por nodos de los últimos 2 años podemos notar que:

- Los nodos D-958 y D-940 presentaron valores desde 1955°C a 2000°C y 1925°C a 2000°C respectivamente, siendo estos quienes presentaron valores más elevados, esto debido a su dominante composición en hidrógeno e hidrocarburos pesados.
- Los nodos D-2421 y V-5102 presentaron valores desde 1922°C a 1948°C y 1915°C a 1924°C, los cuales en contraste con los dos nodos mencionados anteriormente presentan valores entre 50°C y 70°C inferiores, esto se traduce en que las unidades usuarias del gas del D-958 y 940 puedan presentar mayores problemas en tuberías y además sean aquellas que generen mayor cantidad de emisiones de NOx. .

Figura 6.

Temperatura adiabática de llama sector refinería



4.7 Emisiones gas efecto invernadero sector refinería

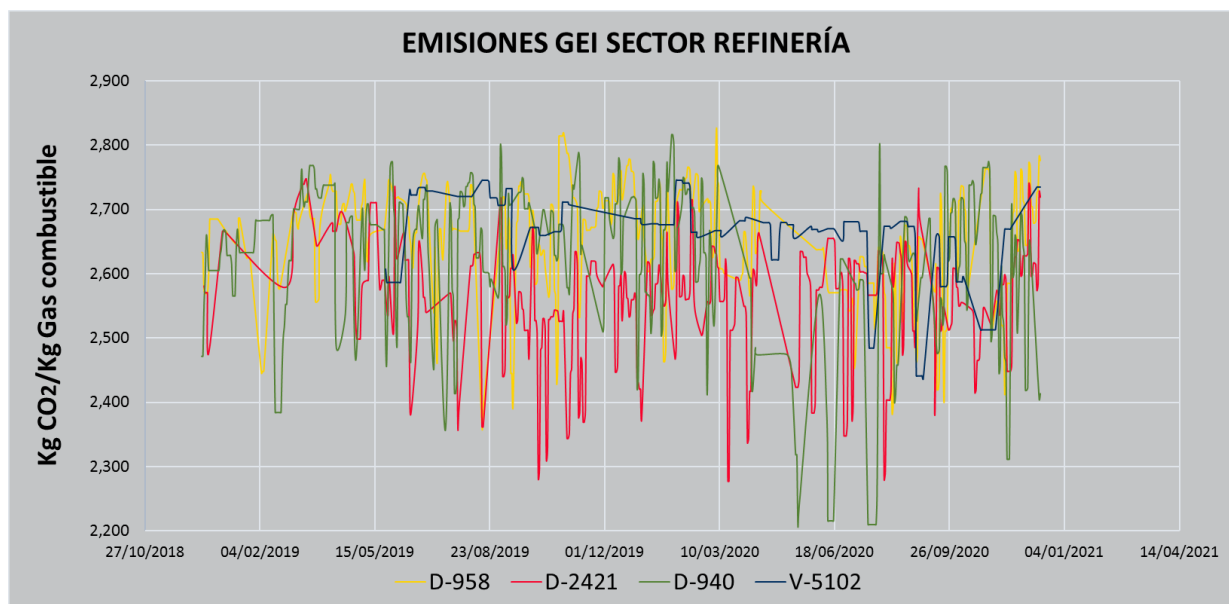
Este parámetro fue agregado a la herramienta de cálculo del gas combustible con el fin de tener un conocimiento de las emisiones de CO₂ por cada Kg de gas combustible, esto con el fin de tener un control sobre las emisiones al medio ambiente.

Según el estudio de caracterización por nodos podemos concluir que:

- Las emisiones de GEI en el sector refinería se encontraron entre los 2,40 y 2,80 Kg CO₂/Kg gas combustible.
- Elevadas concentraciones en propano y n-butano se asocian con aumento en las emisiones de CO₂, esto debido a la estequiometría de sus reacciones donde generan 3 y 4 veces más CO₂ que el metano, como sucede con el D-958 y el 940.
- Gases combustibles en presencia de hidrocarburos de mayor peso molecular requieren de mayor cantidad de aire para asegurar combustión completa, y de ese modo se corre el riesgo de presentarse combustión incompleta, lo cual incrementa las emisiones de GEI. (Cala, et al, 2014)

Figura 7.

Emisiones gas efecto invernadero sector refinería.



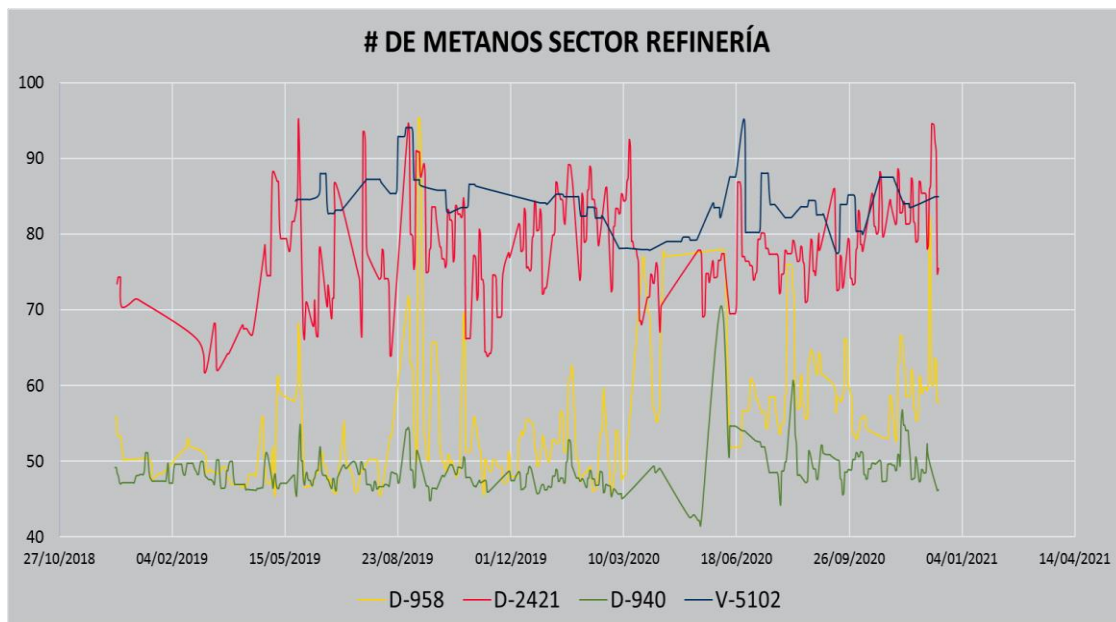
4.8 Número de metanos sector refinería

El estudio del número de metanos para el sector refinería nos permite concluir que:

- El nodo 940 es aquel que presentó el número de metanos más bajo, con un valor promedio de 48,5 para los 2 años de estudio, valor que se encuentra muy por debajo de lo sugerido según la bibliografía, con valores entre 80 y 120. (Saavedra, et al, 2014)
- De igual manera el D-958 a pesar de tener un NM promedio un poco mayor (54) sigue estando también por debajo de los márgenes sugeridos, esto nos permite deducir que estos gases son mucho más propensos a fenómenos de autoignición, fenómenos que son asociados con problemas en degradación de materiales y corrosión, que pueden causar problemas de seguridad operacional.
- Los nodos 2421 y 5102, fueron aquellos que presentaron valores considerablemente más elevados con 78 y 84 en promedio, valor que se encuentra para el 2421 muy próximo al rango óptimo y el del 5102 cumpliendo dentro del rango deseado, valores que permiten concluir que su gas no sufrió problemas de autoignición, y que según la bibliografía generó menores emisiones y un menor consumo de combustible. (Kuczynski, et al, 2020)

Figura 8.

Número de metanos sector refinería



4.9 Relación aire - combustible sector refinería

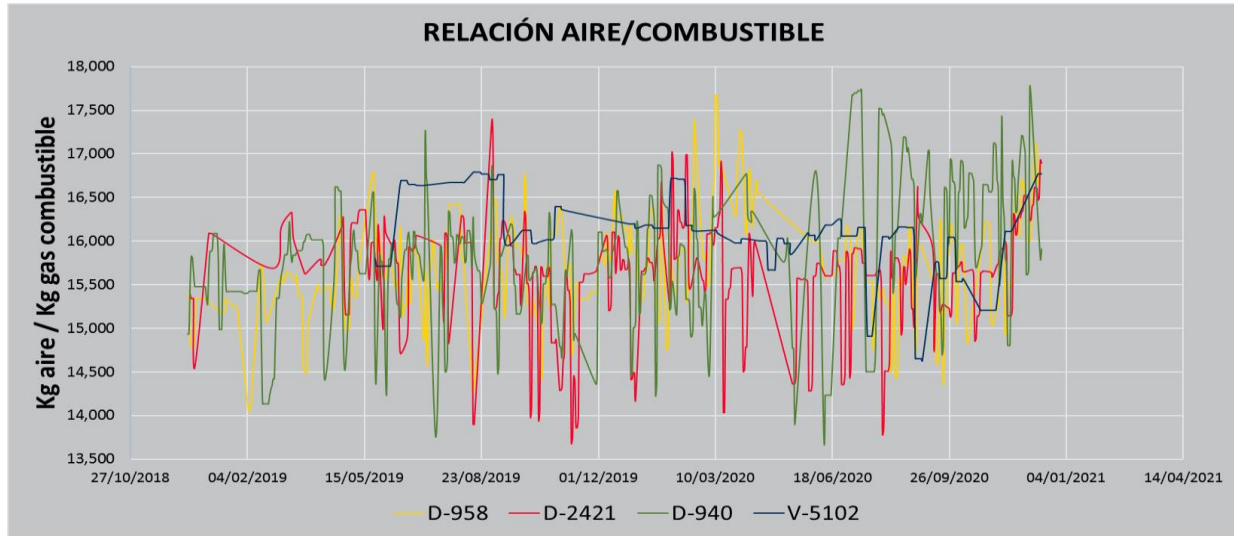
La relación aire-combustible se puede definir como la relación necesaria de aire para que todo su oxígeno reaccione con el combustible (metano, etano, etc.) generando combustión completa, es decir, sin quedar hidrocarburos sin quemar.

El seguimiento del comportamiento de los nodos sector refinería para la relación aire combustible nos permite concluir que:

- El consumo de aire depende directamente de la composición del gas, notándose claramente en el nodo 5102 ya que su consumo fue el más constante a lo largo de los 2 años, entre 15,97 y 16,56 Kg aire/Kg gas combustible, siendo a la vez, el nodo que mayor consumo tuvo de aire.
- Se puede notar que el consumo de aire del D-940 fue el más bajo con un promedio de 15,8 Kg aire/Kg gas combustible, esto se debió en gran parte a que el gas de esta unidad fue aquel que tuvo la mayor concentración en H₂ (40,9% en volumen), esto se ve reflejado en la estequiometría de la reacción de combustión, ya que el hidrógeno requiere solo 0,5 mol de oxígeno por mol de combustible.
- Se sugiere empezar investigación para una implementación futura de utilizar aire enriquecido con oxígeno, ya que puede traer numerosos beneficios como disminución de combustible de hasta el 15%, reducción de emisiones de CO₂ en un 25% e incrementos en eficiencia energética de un 20%. (Cacua y Herrera, 2013)

Figura 9.

Relación aire - combustible sector refinería.



4.10 Tablero de monitoreo red de gas combustible sector refinería

Ecopetrol S.A. es una empresa que día a día busca innovar, y en la GRB es una gran necesidad el optimizar procesos, lo cual se traduzca en un mayor beneficio económico y ambiental para la empresa, usando como medio diversos recursos tecnológicos para llevar a cabo estos procesos, como viene siendo en los últimos años el uso de los softwares de PI Datalink, PI Vision y Microsoft Excel los cuales son muy útiles para el diseño de Dashboards o tableros de monitoreo los cuales permitan tener una visualización sencilla y en tiempo real de los procesos que se llevan a cabo en los diferentes sectores de la refinería.

El departamento de servicios industriales refinería es el responsable de la red de gas combustible de la cual son usuarios diversos departamentos de la GRB y por lo mismo gran cantidad de unidades se ven afectadas por la calidad del gas de esta; una de las necesidades que actualmente tiene el departamento PSI, es la de una herramienta en la que sea posible conocer rápidamente el estado de la red de gas combustible (composición, poder calorífico, temperatura de

llama, etc.) la cual permita brindar una rápida respuesta a los encargados de las unidades usuarias en el momento de presentar fallas en su operación debido al gas combustible suministrado, es por esto que se decidió crear este Dashboard de la red de gas combustible en el que se puede conocer el comportamiento y propiedades del gas en tiempo real.

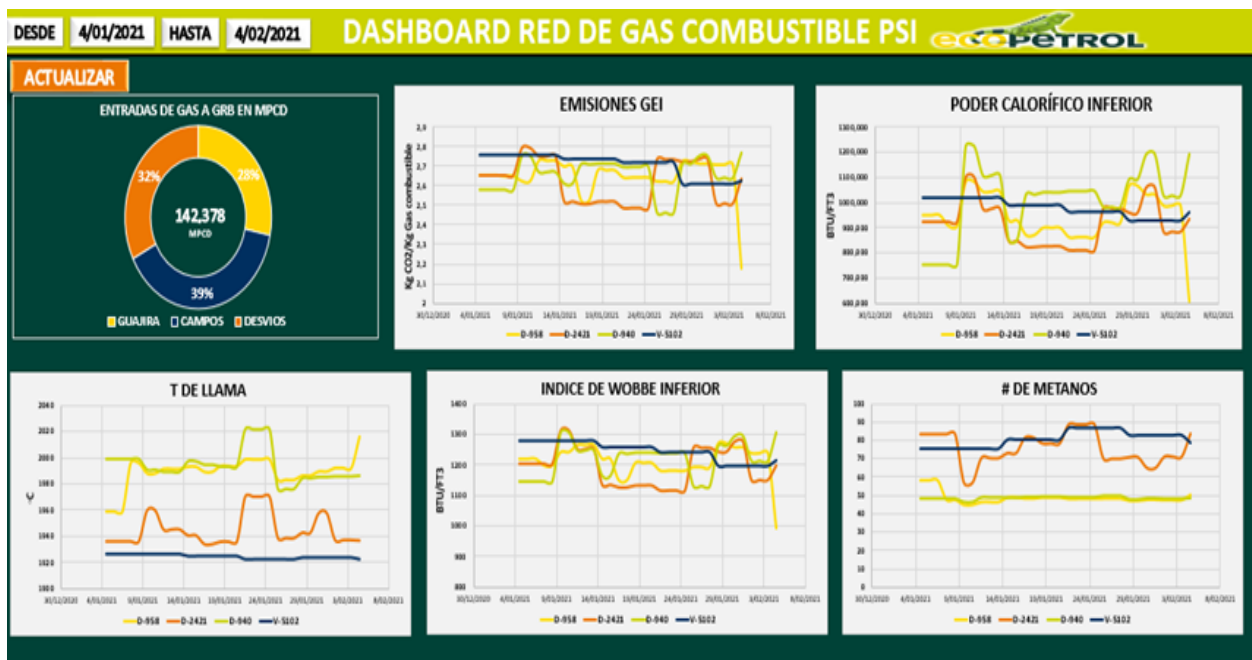
Para la creación de este panel de monitoreo fue necesario el uso de PI Datalink, herramienta que fue programada con las funciones archive value o current value, según fuese el caso, de tal manera que cada vez que el Dashboard sea abierto, esta cargue los últimos datos subidos por el laboratorio de la refinería a la página CD Lab; también la herramienta de cálculo que fue diseñada para las diferentes propiedades de la red de gas combustible mencionada en el apartado 8.2 fue acoplada a este Dashboard para brindar un análisis más completo para el departamento y a la GRB.

4.11 Panel principal del tablero de monitoreo.

En la Figura 10, se presenta la hoja principal del Dashboard creado.

Figura 10.

Dashboard red de gas combustible departamento PSI.



Esta primera hoja del Dashboard, la cual es la hoja principal, fue creada partiendo del uso de la función archive value de PI Datalink, la cual se programó para que presente los últimos 31 datos de las cromatografías desde la fecha de apertura de la hoja terminando 31 días atrás, luego, mediante el uso de macros de Excel, estos datos son enviados automáticamente a la herramienta de cálculo de propiedades de gas, la cual ya fue previamente instalada en otra hoja del Excel, generándose así, una base de datos del último mes con todas las propiedades calculadas.

Seguidamente, se procedió con el diseño del Dashboard, creando una pantalla la cual usa la mayoría de los colores de la compañía, y que toma la base de datos para graficar el comportamiento de cada propiedad en el último mes de la red de gas.

El objetivo del panel principal es obtener una visión general de comparación de los 4 nodos de la red de gas para el último mes desde que se abre el Dashboard, en el que se presentan en la

parte superior izquierda las fechas del análisis, donde también se cuenta con un botón de actualización en dado caso que la hoja no se haya cerrado por más de 24 horas, también se incluyó un balance de masa en las hojas de cálculo que permite conocer las entradas de gas a la GRB en MPCD y en qué porcentaje aporta cada uno (Campos, Guajira y Desvíos), seguido de las gráficas del último mes de las emisiones de gas efecto invernadero, poder calorífico inferior, temperatura adiabática de llama, índice de Wobbe inferior y número de metanos.

4.12 Paneles secundarios del tablero de monitoreo

Además de la creación del panel principal, también se diseñaron 4 paneles adicionales, los cuales también son tableros de monitoreo, y en los que cada uno corresponde a cada nodo del sector refinería (D-940, D-958, D-2421 y V-5102), pero que en este caso se presentan los datos actuales y no del último mes como en el tablero principal.

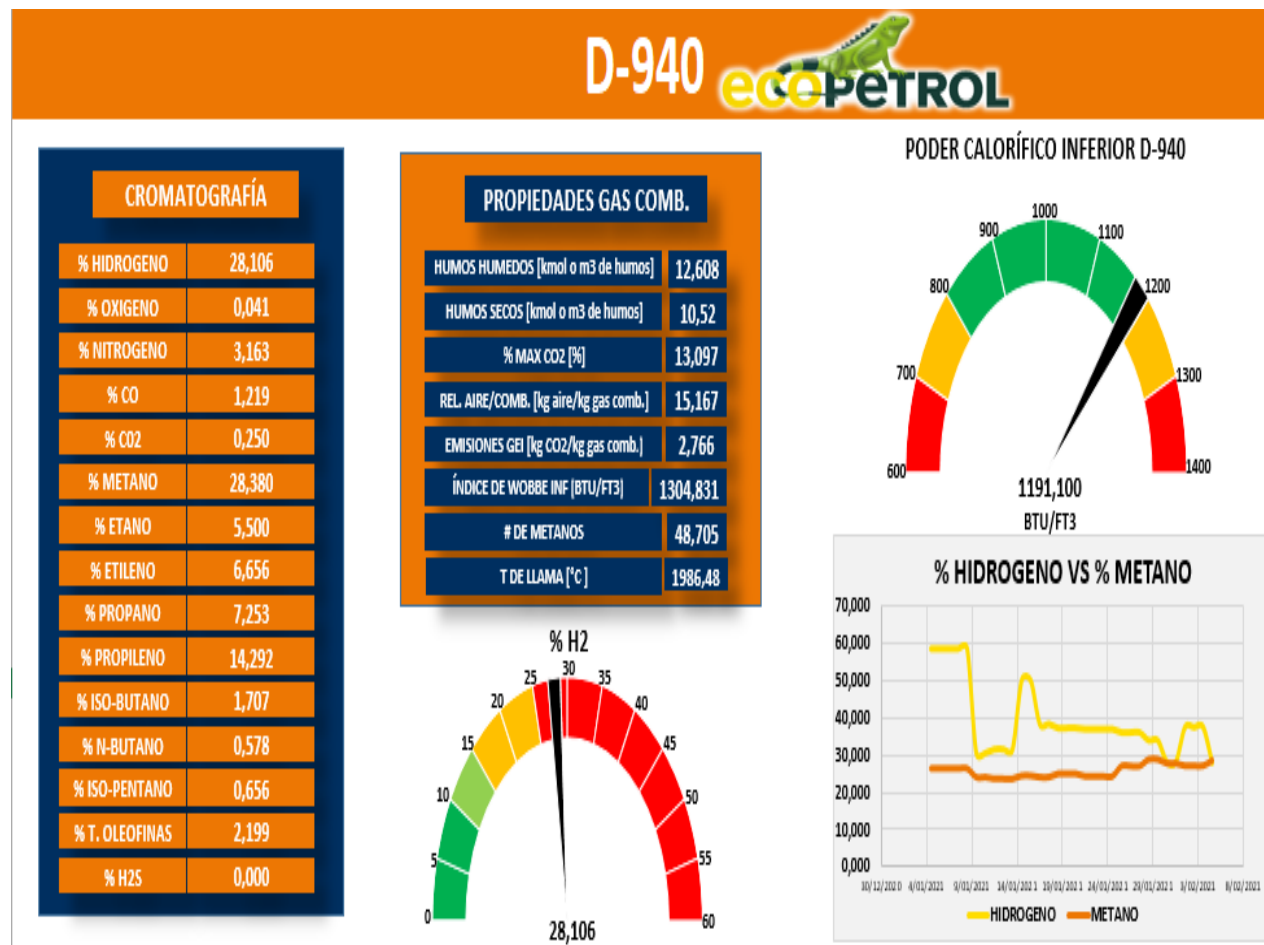
El diseño de estos paneles de monitoreo partió de la función llamada Current Value de PI Datalink, el cual presenta el último dato cargado a CD Lab de las cromatografías del gas combustible (este dato puede ser de 1 a máximo 3 días anteriores a la apertura del archivo), luego mediante macros en Excel estos datos son enviados a la herramienta de cálculo de propiedades del gas para que los resultados sean presentados en el Dashboard.

El diseño de estos paneles de monitoreo también se hizo teniendo en cuenta la paleta de colores de la empresa, diferenciando en la parte superior con el nombre de cada unidad.

En la Figura 11, se presenta uno de los 4 Dashboards diseñados para cada nodo de la red de gas combustible (para consultar los demás Dashboards ir a Anexos en las figuras F, G y H)

Figura 11.

Dashboard D-940 departamento PSI.



El diseño de estos paneles consta de 6 partes: una tabla en la cual se presentan los resultados de la última cromatografía, esta permite conocer si existen algunas concentraciones indeseadas en el gas combustible que puedan afectar propiedades como el poder calorífico; la siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en la herramienta de cálculo de propiedades del gas, que tiene como ventaja conocer propiedades relevantes a la intercambiabilidad de gases como el índice de Wobbe inferior y también conocer los niveles de emisiones que se están generando.

También se diseñaron dos marcadores estilo velocímetro, los cuales indican, el poder calorífico inferior, donde se referencian con colores verdes los niveles óptimos para la refinería

(800 a 1200 BTU/FT³) y con colores amarillos y rojos los valores que se encuentran por fuera de las guías de control y pueden presentar riesgos operacionales; el segundo marcador presenta el porcentaje de H₂ en el gas combustible, el cual es uno de los compuestos a los que más se le hace seguimiento ya que, este tiene una incidencia directa con el poder calorífico del gas, también se demarcan con rojo los valores que se encuentran por fuera de las guías de control, lo cual sirve como un sistema de alerta. Por último, en la parte inferior derecha, se presenta una gráfica que relaciona el % en volumen del metano vs hidrógeno para el último mes.

El diseño de este Dashboard es de gran impacto para el departamento PSI y en términos generales para la GRB, puesto que es una herramienta de análisis operacional, la cual permite conocer en tiempo real las composiciones, poder calorífico, temperatura de llama, entre otras propiedades de la red de gas combustible del sector refinería, también a su vez, presenta indicadores los cuales funcionan como alerta, lo cual permite anticiparse a eventos operativos inesperados, prevenir daños tempranos de los activos, como pueden ser problemas en los procesos de combustión de las unidades usuarias (autoignición, fenómenos de retroceso o apagado de llama, etc), también presenta datos que pueden ser usados para el análisis de emisiones ambientales, permitiendo así soportar la toma de decisiones para mejorar la eficiencia de los procesos.

5. Conclusiones

- Se logró diseñar una herramienta para el cálculo de propiedades para la red de gas combustible a cargo del departamento PSI y será de gran utilidad ya que permite el reconocimiento de propiedades que antes no se tenían en cuenta, aumentando la base de datos y el comportamiento de las variables que intervienen en la intercambiabilidad de gases, evitando daños a activos de la empresa, y brindando información adicional sobre la gestión ambiental a través del cálculo de los gases efecto invernadero.
- Mediante este proyecto, se pudo realizar un estudio de caracterización del comportamiento del gas combustible a través de los drums del sector refinería de la GRB, entre el periodo comprendido entre diciembre del 2018 y diciembre del 2020 (2 años), este estudio permitió conocer a profundidad las propiedades del gas que pasa por las diferentes unidades, conocer cuales unidades usuarias deberían tener una mayor frecuencia en mantenimiento de equipos, y tener un soporte para comparar y establecer objetivos para años posteriores.
- Se analizaron otros parámetros tales como el IWI o el número de metanos para la intercambiabilidad de gases, permitiendo entender que el PCI no es una medida adecuada para la intercambiabilidad de un gas si se analiza por si sola.
- Se consiguió diseñar un Dashboard en Excel, el cual usa la calculadora de propiedades de gas combustible para brindar información sobre el estado actual (tiempo real) de la red de gas combustible sector refinería, esta herramienta es de gran provecho para la empresa ya que va a funcionar como un soporte para la toma de decisiones en el departamento PSI, decisiones que van a permitir prolongar la vida útil de los equipos y disminuir a largo plazo las emisiones de gases efecto invernadero.

6. Recomendaciones

- Realizar simulación de la red de gas combustible sector refinería, herramienta la cual permita predecir el comportamiento y propiedades del gas, evitando esperar resultados del laboratorio de la refinería.
- Complementar la herramienta de cálculo de propiedades del gas combustible, agregando otros cálculos de propiedades las cuales pueden ser de mucho valor como los índices de Weaver, y algún método gráfico como el de Dutton, el cual permita, a través de parámetros como el IWI y el número de metanos, establecer unos límites para la intercambiabilidad de gases en la refinería.
- Integrar distintas propiedades al Dashboard de la red de gas combustible del sector refinería, como presión del gas, temperatura, quema de gas en TEAS, y otras variables que permitan tener un mayor conocimiento de la red, facilitando la toma de decisiones de análisis operacional.

Referencias Bibliográficas

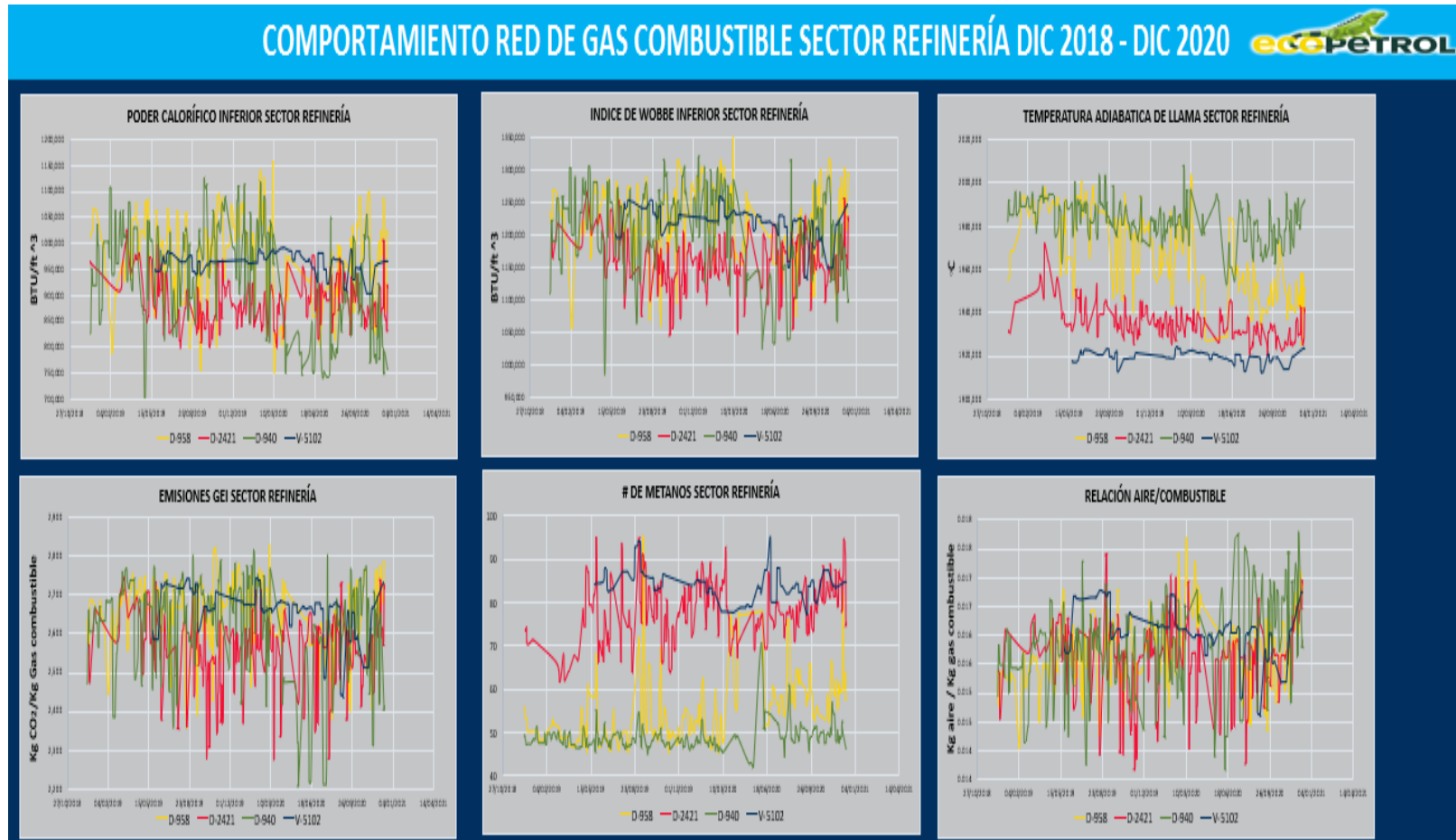
- Cacua, K. y Herrera, B. (2013) Revisión de la Combustión con Aire Enriquecido con Oxígeno como Estrategia para Incrementar la Eficiencia Energética. *SciELO*, 17(2), 463 - 482.
Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262013000200012
- Cala, O., Meriño, L., Kafarov, V., & Saavedra, J. Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión. *Revista Ingenierías*, 12(23), 101-112.
DOI: <https://doi.org/10.22395/rium.v12n23a8>
- Collados R., & Hernandez E.(2013). *Propuesta de Análisis Operacional y Planteamiento de un Método Eficiente de Trabajo para Mejorar el Proceso Productivo de la Línea 3 en el Pantalón Perry Ellis*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.
- Exploración (2021, 13 mayo). *Ecopetrol*. Recuperado de:
<https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/NuestraEmpresa/QueHacemos/Exploracion>
- Fernandez, J. (s.f.). *Poder Calorífico de Combustibles Industriales*. Universidad Tecnológica Nacional.
- Fundamentos de Proceso y Logística de la GRB (s.f.) [Diapositiva de Power Point] Ecopetrol.
- Ganancias de Ecopetrol bajaron 71,6% en el tercer trimestre. (2020, 27 octubre). *Revista Semana*. Disponible en: <https://www.semana.com/inversionistas/articulo/ganancias-de-ecopetrol-en-tercer-trimestre-de-2020/304930/>
- Kuczynski, S., Łaciak, M., Szurlej, A., y Włodek, T. (2020) Impact of Liquefied Natural Gas

- Composition Changes on Methane Number as a Fuel Quality Requirement, *Energies*, vol. 13(19), 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195060>
- Mann, M. (2019, 19 marzo). *Greenhouse Gas / Definition, Emissions, & Greenhouse Effect*. Encyclopedia Britannica. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/greenhouse-gas>
- Oil & Gas 50. (2020). Brand Finance. Recuperado de: <https://brandirectory.com/download-report/brand-finance-oil-and-gas-50-2020-preview.pdf>
- Ortíz, J. (2014). Fundamentos de la Intercambiabilidad del Gas Natural. *Ciencia*. (pp. 6–15) Polygon Energy.
- Poellnitz, H. A Review of the NGC+ Interchangeability Work Group’s ‘White Paper on Natural Gas Interchangeability and Non-Combustion end use. (2005) AGA. Oper.
- Saavedra, J., Gómez, M., Merino, L., y Kafarov, V. (2014). Combustion Optimization Using Methane Number and Wobbe Index as Evaluation Criteria. *Revista Iteckne*. vol. 11(1), 76–83. DOI: <https://doi.org/10.15332/iteckne.v11i1.528>
- Turner, D. (2021, 17 marzo). *Gas Chromatography – How a Gas Chromatography Machine Works, How To Read a Chromatograph and GCxGC*. Analysis & Separations. Disponible en: <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/gas-chromatography-how-a-gas-chromatography-machine-works-how-to-read-a-chromatograph-and-gcxgc-335168>

Anexos

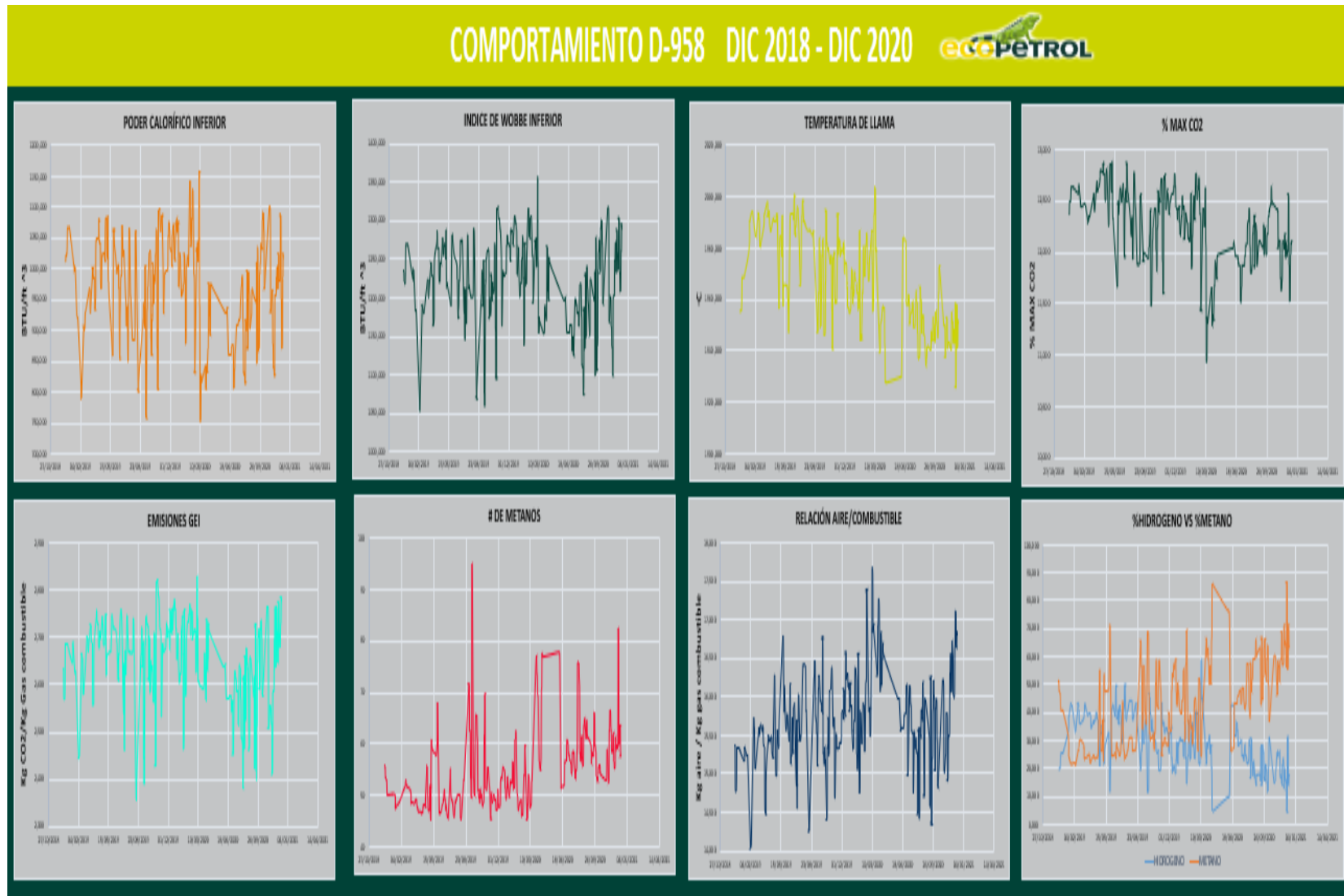
Anexo A.

Comportamiento red de gas combustible sector refinera



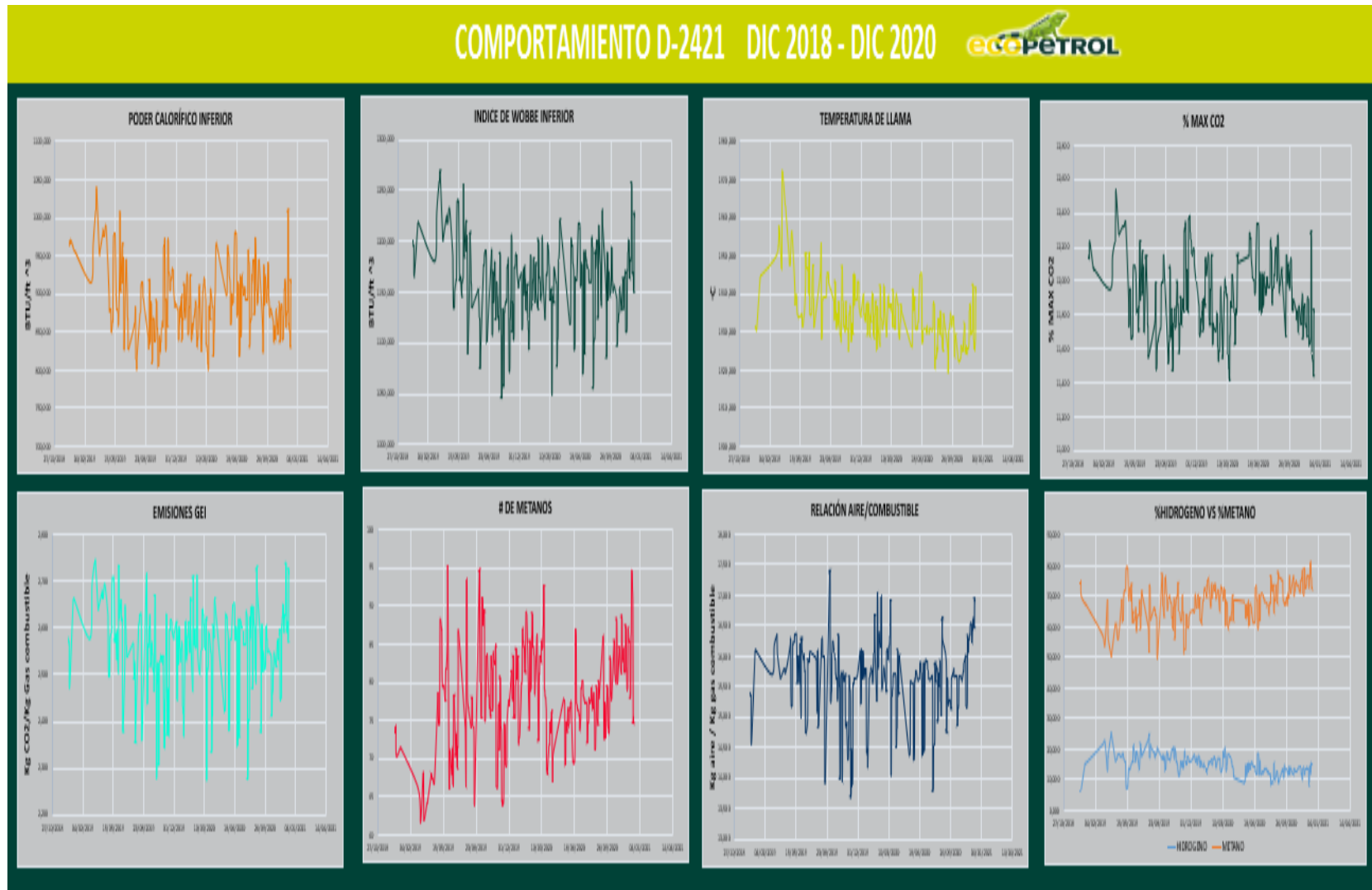
Anexo B.

Comportamiento D-958 2018-2020



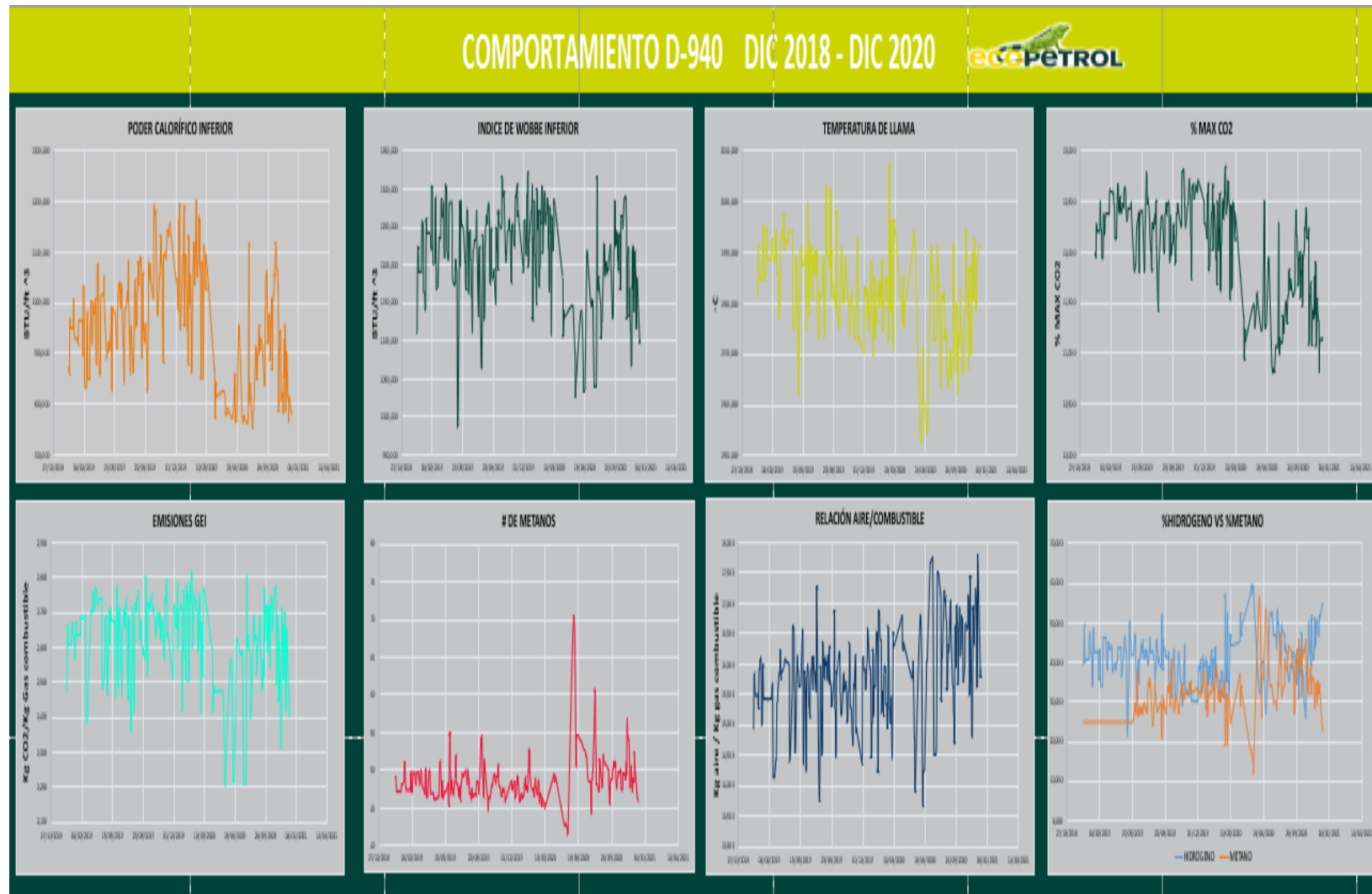
Anexo C.

Comportamiento D-2421 2018-2020



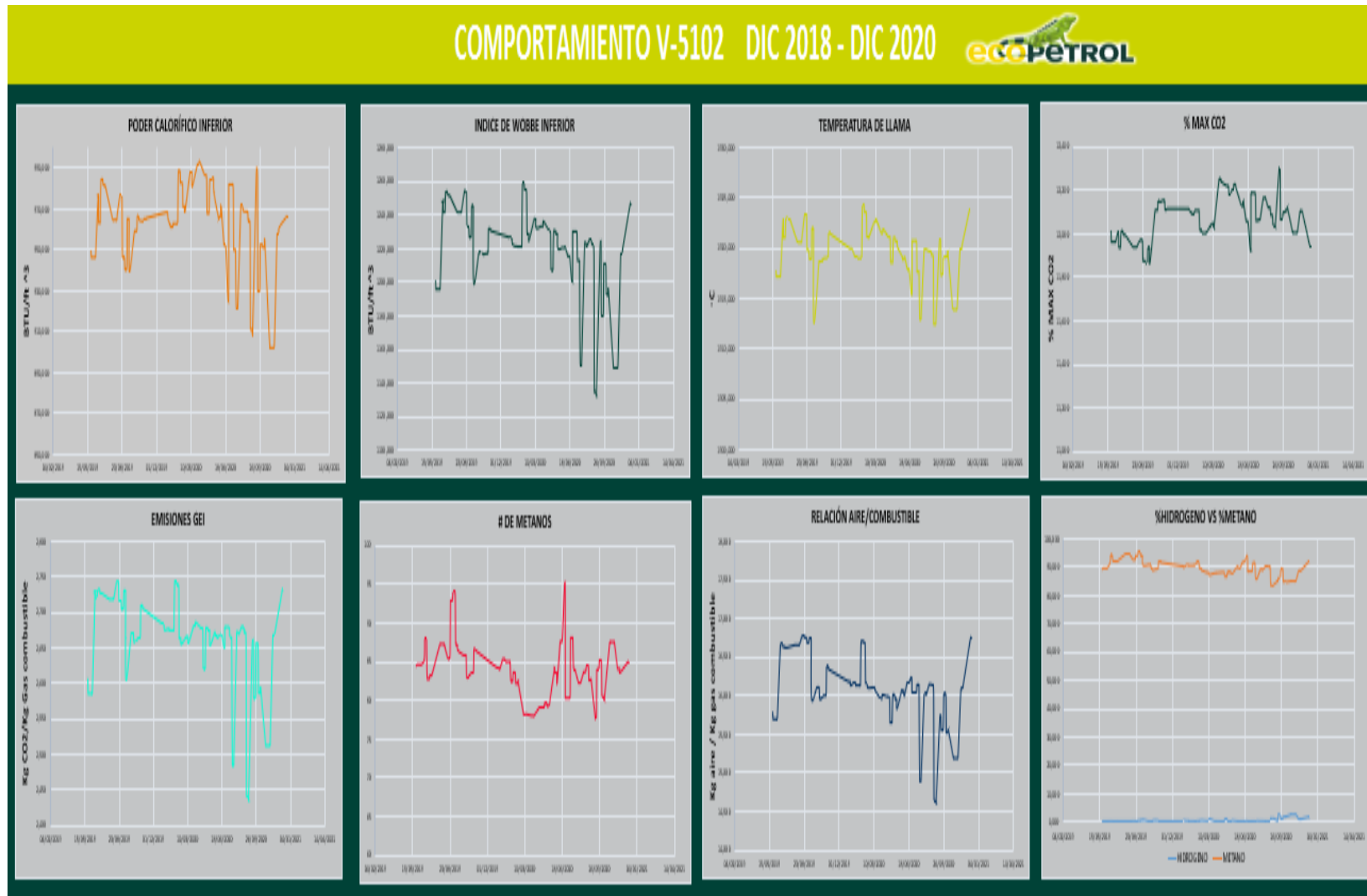
Anexo D.

Comportamiento D-940 2018-2020



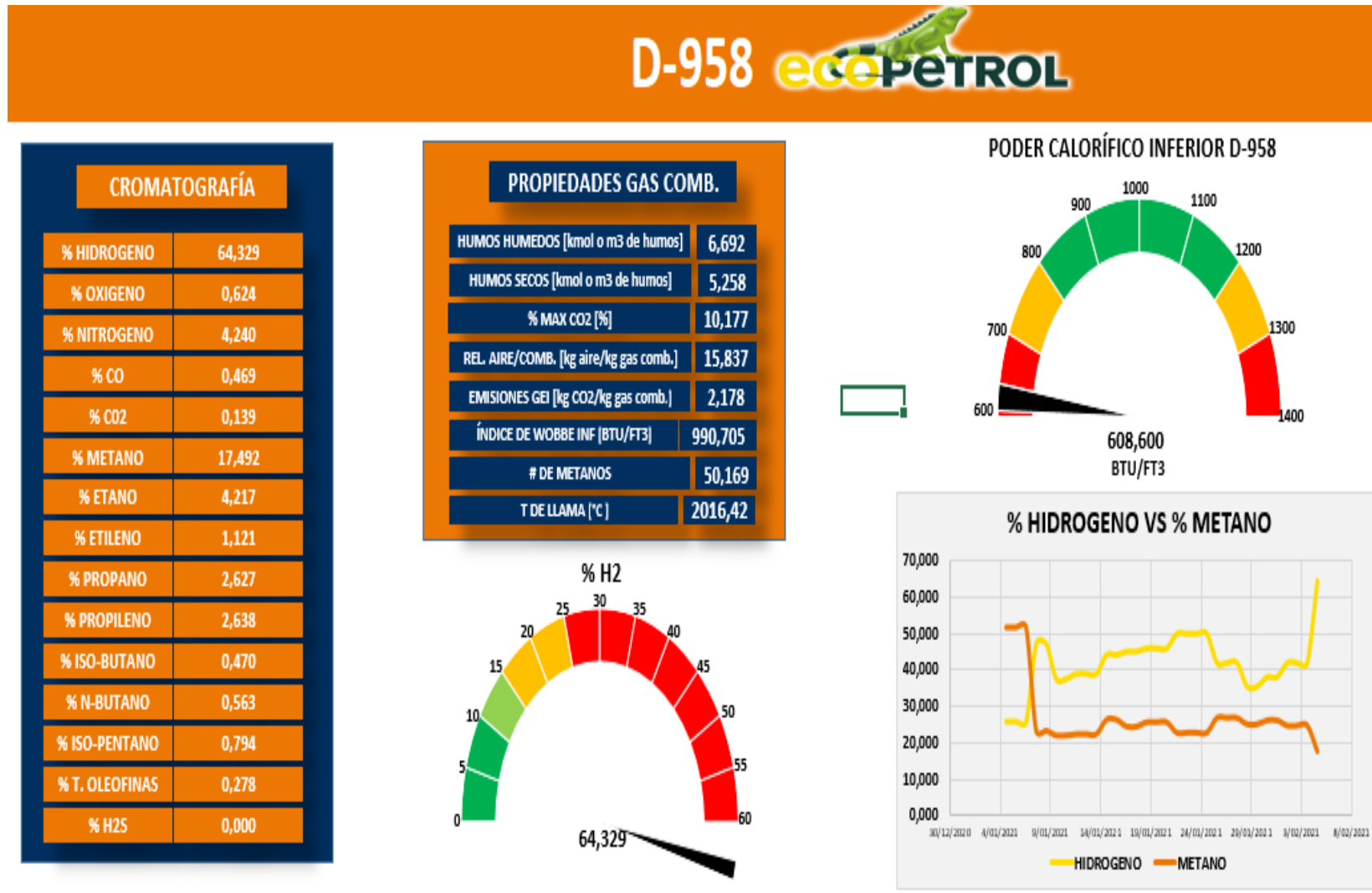
Anexo E.

Comportamiento V-5102 2018-2020



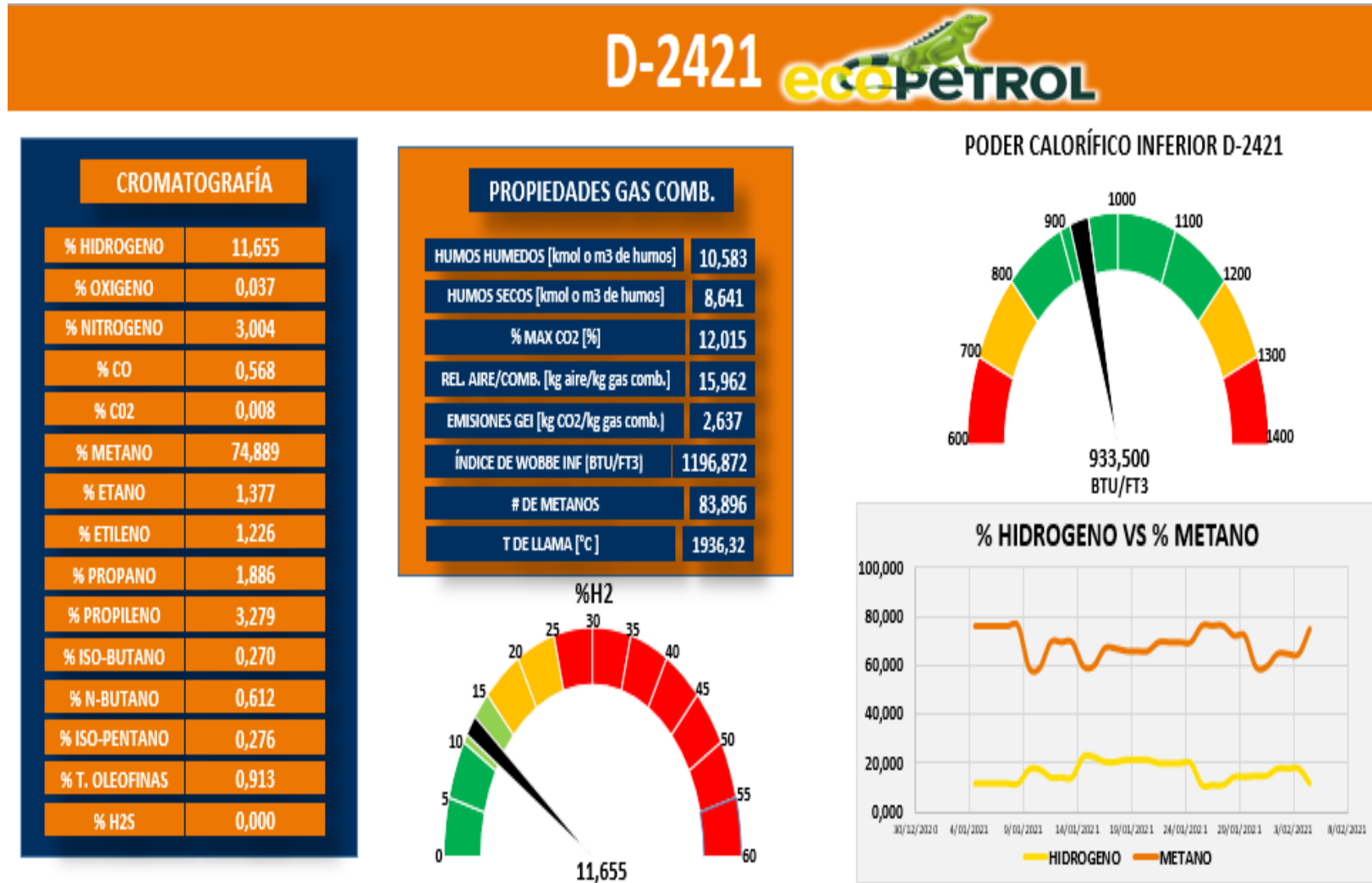
Anexo F.

Dashboard D- 958 departamentos PSI



Anexo G.

Dashboard D-2421 departamento PSI.



Anexo H.

Dashboard V-5102 departamento PSI

V-5102 

CROMATOGRAFÍA	
% HIDROGENO	2,447
% OXIGENO	0,464
% NITROGENO	2,893
% CO	0,000
% CO2	0,170
% METANO	86,836
% ETANO	3,171
% ETILENO	0,147
% PROPANO	1,791
% PROPILENO	0,004
% ISO-BUTANO	0,552
% N-BUTANO	0,666
% ISO-PENTANO	0,824
% T. OLEOFINAS	0,034
% H2S	0,000

PROPIEDADES GAS COMB.	
HUMOS HUMEDOS [kmol o m3 de humos]	11,066
HUMOS SECOS [kmol o m3 de humos]	9,023
% MAX CO2 [%]	11,983
REL. AIRE/COMB. [kg aire/kg gas comb.]	15,954
EMISIONES GEI [kg CO2/kg gas comb.]	2,627
ÍNDICE DE WOBBE INF [BTU/FT3]	1215,131
# DE METANOS	78,749
T DE LLAMA [°C]	1922,13

PODER CALORÍFICO INFERIOR V-5102

