

Manual de Usuario y Documentación Técnica:
Analizador de Gas Natural — Especificaciones RUT Colombia

Herramienta de diagnóstico y recomendación de tratamiento

Versión: 1.0

Tecnología: Python 3 + Streamlit

Fuentes técnicas: Kohl & Nielsen (1997); Kidnay et al. (2019); Stewart (2018)

Arquitectura de la Aplicación

La aplicación está estructurada en tres capas principales: la capa de interfaz de usuario (Streamlit), la capa de cálculo (funciones Python) y la capa de presentación de resultados.

1.1 Módulos del Código

Los módulos principales de la aplicación se describen en la Tabla 1.

Tabla 1

Módulo	Descripción
Conversión de unidades	Funciones <code>a_bara()</code> , <code>a_celsius()</code> , <code>a_mmescfd()</code> y sus inversas. Toda la lógica interna opera en bara, grados Celsius y MMSCFD.
Constantes termodinámicas	Diccionarios <code>HHV_COMPONENT</code> (poder calorífico superior por componente, BTU/scf) y <code>GRAVITY_COMPONENT</code> (gravedad específica relativa al aire) para 13 componentes.
<code>calcular propiedades()</code>	Calcula PCS, PCI, gravedad específica, índice de Wobbe, puntos de rocío de agua (ecuación de Buck) e hidrocarburos (aproximación empírica) a presión de operación y de entrega.
<code>evaluar cumplimiento()</code>	Compara las propiedades calculadas contra los 10 límites de la norma RUT y genera una lista de verificación con estado CUMPLE / INCUMPLE para cada parámetro.

generar recomendaciones()	Motor de recomendaciones inteligentes. Evalúa cada incumplimiento y selecciona tecnologías de tratamiento filtrando por valores reales de CO ₂ %, H ₂ S ppm, flujo (MMSCFD), presión parcial (psia), delta P disponible, contenido de C ₃ + y temperatura.
analizar presiones()	Diagnostica la relación entre presión de entrada y presión de entrega: detecta necesidad de compresión, caída severa/moderada/normal y riesgo de efecto Joule-Thomson.
Interfaz Streamlit	Sidebar de condiciones, pestañas de ingreso (manual y archivo), visualización de resultados con tarjetas de semáforo, expanders de recomendaciones y botones de exportación.

Nota. Los módulos se ejecutan en secuencia al presionar el botón Analizar composición.

2. Flujo de Uso Paso a Paso

Paso 1 — Configurar Condiciones en la Barra Lateral

Al abrir la aplicación todos los campos están en blanco (sin valores por defecto). El usuario debe configurar los siguientes parámetros:

- Temperatura: seleccionar unidad (°C, °F o K) e ingresar el valor.
- Presión de operación: seleccionar unidad (bara, barg, psia, psig, kPa, MPa) e ingresar el valor.

- Presión de entrega: campo independiente con las mismas opciones de unidad. Representa el punto de medición o entrega del gas.
- Flujo del gas: seleccionar unidad (MMSCFD, MSCFD, m³/día o m³/h) e ingresar el valor.
- La barra lateral muestra en tiempo real las equivalencias calculadas en todas las unidades. Al final hay una casilla de verificación para indicar si los puntos de rocío deben evaluarse a la presión de entrega (recomendado) o a la de operación.

Paso 2 — Ingresar la Composición del Gas

Existen dos formas de ingresar la composición, accesibles mediante pestañas:

- Pestaña 1 — Ingreso manual: se ingresan los porcentajes molares de 13 componentes (CH₄, C₂H₆, C₃H₈, iC₄, nC₄, iC₅, nC₅, C₆⁺, CO₂, H₂S, N₂, H₂O, O₂). No es necesario que sumen exactamente 100%; la aplicación normaliza automáticamente a fracción molar.
- Pestaña 2 — Cargar archivo: permite subir un archivo CSV o Excel con dos columnas: Componente y Porcentaje_mol. La aplicación detecta automáticamente los nombres de columnas. Se puede descargar una plantilla vacía en formato CSV.

Paso 3 — Ejecutar el Análisis

Al presionar el botón Analizar composición, la aplicación ejecuta en orden los siguientes procesos:

- Normalización de la composición a fracción molar (suma = 1).
- Conversión de todas las unidades a la base interna (bara, °C, MMSCFD).
- Cálculo de las propiedades fisicoquímicas del gas.
- Evaluación de cumplimiento contra los 10 parámetros RUT.
- Generación de recomendaciones de tratamiento (solo si hay incumplimientos).

- Diagnóstico de presiones inlet vs. outlet.

Paso 4 — Interpretar los Resultados

La sección de resultados presenta la información en los siguientes bloques:

- Banner de estado general: verde (APTO), rojo con lista de parámetros incumplidos (REQUIERE TRATAMIENTO / NO APTO).
- Diez tarjetas de semáforo: cada parámetro muestra su valor medido, el rango normativo y su estado en color verde (cumple) o rojo (incumple).
- Seis métricas clave: PCS, PCI, Wobbe, Gravedad específica, Rocío de agua y Rocío de HC, con sus valores calculados.
- Tabla de flujo equivalente en cuatro unidades.
- Recomendaciones de tratamiento: tecnologías clasificadas como RECOMENDADA, ALTERNATIVA, PRECAUCIÓN o NO APLICA, con el criterio exacto de selección visible en cada tarjeta.
- Análisis de presiones: diagnóstico del diferencial P_{entrada} vs. P_{entrega} con recomendaciones específicas.

Paso 5 — Exportar

Los resultados pueden descargarse en dos formatos:

- CSV: tabla de cumplimiento RUT con valores y estados.
- Excel (.xlsx): archivo con tres hojas — Cumplimiento RUT, Composición y Condiciones.

3. Metodología de Cálculo

3.1 Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI)

El PCS se calcula como la suma ponderada de los poderes caloríficos superiores de cada componente por su fracción molar, según la Ecuación 1:

$$PCS = \sum(y_i \cdot HHV_i) \quad (1)$$

donde y_i es la fracción molar del componente i y HHV_i su poder calorífico superior (BTU/scf).

El PCI se estima como $PCI = PCS \times 0.90$ (factor de condensación del agua aproximado). Los valores de referencia HHV utilizados son: $CH_4 = 1012$, $C_2H_6 = 1773$, $C_3H_8 = 2523.2$, $C_4 = 3262/3270$, $C_5 = 4001/4009$, $C_6^+ = 4756$ BTU/scf.

3.2 Gravedad Específica e Índice de Wobbe

La gravedad específica (GE) se calcula como suma ponderada de las gravedades de cada componente relativas al aire ($GE_{\text{aire}} = 1.0$) como lo muestra la ecuación 2. El Índice de Wobbe (IW) se obtiene dividiendo el PCS entre la raíz cuadrada de la GE como se muestra en la ecuación 3:

$$GE = \sum(y_i \cdot SG_i) \quad (2)$$

$$IW = \frac{PCS}{\sqrt{GE}} \quad (3)$$

3.3 Punto de Rocío del Agua

Se utiliza la ecuación de Buck para calcular el punto de rocío a partir de la presión parcial del agua en el gas. El punto de rocío del agua es la temperatura a la cual el vapor de agua presente en el gas comienza a condensarse cuando se enfría a presión constante. Su control es esencial para evitar: corrosión interna, formación de hidratos, bloqueo de líneas, fallas en válvulas y reguladores.

En Colombia, el Reglamento Único de Transporte (RUT) exige un punto de rocío máximo de -10°C a la presión de entrega.

Para estimaciones rápidas, se utiliza la ecuación de Buck (5), una correlación empírica ampliamente empleada para calcular la temperatura de saturación del vapor de agua:

$$p_{H_2O} = y_{H_2O} \cdot P_{bara} \cdot 100 \quad (4)$$

$$T_{dew} = \frac{243.04 \cdot \ln\left(\frac{p_{H_2O}}{0.61078}\right)}{17.625 - \ln\left(\frac{p_{H_2O}}{0.61078}\right)} \quad (5)$$

El cálculo se realiza tanto a la presión de operación como a la presión de entrega si el usuario activa la opción correspondiente.

3.4 Punto de Rocío de Hidrocarburos

El punto de rocío de hidrocarburos es la temperatura a la cual los hidrocarburos pesados (C3+, C4+, C5+) comienzan a condensarse. Este parámetro es crítico para evitar: formación de líquidos en tuberías, problemas en estaciones de regulación, fallas en medidores y riesgo de arrastre de líquidos.

Para diagnósticos preliminares se emplean correlaciones empíricas como se muestra en la ecuación 6:

$$T_{dew,HC} = \min(-50 + 200y_{C3+} + 50 \ln(P_{bara} + 1), 60) \quad (6)$$

Nota. Esta es una aproximación para diagnóstico preliminar. Para diseño de plantas de tratamiento se recomienda utilizar simuladores como HYSYS, ProMax o UNISIM con ecuaciones de estado como Peng-Robinson.

3.5 Presiones Parciales

Las presiones parciales de CO₂ y H₂S se calculan para utilizarlas como criterio de selección de tecnologías de endulzamiento:

$$pp_i = y_i \cdot P_{total} \quad (7)$$

La presión parcial determina la capacidad de absorción en aminas, la selección entre solventes físicos y químicos, la viabilidad de membranas y el riesgo de corrosión.

4. Especificaciones RUT Colombia (CREG 050/2018)

La norma RUT establece los límites indicados en la Tabla 2 para el gas transportado en los gasoductos de Colombia.

Tabla 2

Parámetro	Límite normativo
Poder Calorífico Superior (PCS)	900 a 1150 BTU/scf
Poder Calorífico Inferior (PCI)	Mínimo 810 BTU/scf
Índice de Wobbe	1279 a 1385 BTU/scf
Dióxido de carbono (CO ₂)	Máximo 2.0 % mol
Ácido sulfhídrico (H ₂ S)	Máximo 4.0 ppm
Azufre total	Máximo 20 ppm
Nitrógeno (N ₂)	Máximo 3.0 % mol
Inertes totales (N ₂ + CO ₂)	Máximo 4.0 % mol
Oxígeno (O ₂)	Máximo 0.2 % mol
Gravedad específica	Máximo 0.70 (relativa al aire)
Punto de rocío — agua	Máximo –10 °C (a presión de entrega)
Punto de rocío — hidrocarburos	Máximo –10 °C (a presión de entrega)

Nota. Resolución CREG 050/2018 (Reglamento Único de Transporte de Gas Natural, Colombia).

5. Motor de Recomendaciones de Tratamiento

El motor de recomendaciones es el núcleo diferencial de la aplicación. A diferencia de un listado estático de tecnologías, evalúa cada incumplimiento considerando los valores reales del gas y filtra o prioriza cada tecnología con base en criterios técnicos validados.

5.1 Variables de Entrada al Motor

Las variables que alimentan el motor de decisión son las siguientes:

- CO₂ (% mol) y presión parcial de CO₂ (psia).
- H₂S (ppm) y presión parcial de H₂S (psia).
- Flujo del gas (MMSCFD).
- Punto de rocío de agua y de HC (°C).
- Delta P disponible = P_operación – P_entrega (bar) — para JT/turboexpansor.
- Contenido de C₃⁺ (% mol) — para lean oil y criogénico HC.
- Temperatura de operación (°C) — para CaCl₂ y condensación.
- Presión de operación (psig) — para membranas, PSA, TSA.

5.2 Clasificación de Tecnologías

Cada tecnología evaluada recibe una de las cuatro clasificaciones descritas en la Tabla 3.

Tabla 3

Clasificación Tecnologías

Clasificación	Criterio de asignación
RECOMENDADA	La tecnología cumple todos los criterios de rango (Q, concentración, P) de forma óptima para las condiciones del gas.
ALTERNATIVA	La tecnología puede operar, pero uno o más parámetros están en el límite del rango óptimo o hay una opción más eficiente disponible.
PRECAUCIÓN	La tecnología funciona, pero con restricciones importantes que deben evaluarse antes de implementarla.
NO APLICA	La tecnología queda descartada porque el gas incumple un criterio de exclusión estricto (p. ej., $\text{H}_2\text{S} > 10$ ppm para tamices moleculares, $\text{CO}_2 \geq 2$ % para criogénico HC).

Nota. La clasificación se asigna automáticamente según los valores reales del gas analizado.

5.3 Tecnologías Evaluadas por Módulo***Endulzamiento de CO_2 (seis tecnologías)***

- Aminas (MEA/DEA/MDEA): CO_2 1–20 %, presión parcial 10–100 psia, Q 5–500 MMSCFD. Tipo seleccionado según concentración de CO_2 .
- Solventes físicos (Selexol/Rectisol): $\text{CO}_2 > 10$ %, presión parcial > 100 psia, Q > 50 MMSCFD.

- Solventes mixtos (Sulfinol/MDEA+PZ): CO_2 1–20 %, $\text{H}_2\text{S} \geq 100$ ppm, presión parcial 10–150 psia, Q 10–500 MMSCFD.
- K_2CO_3 (carbonato de potasio): $\text{CO}_2 > 5$ %, $\text{H}_2\text{S} < 1$ %, presión parcial > 50 psia, Q > 50 MMSCFD.
- Membranas de permeación: CO_2 5–50 %, $\text{H}_2\text{S} < 500$ ppm, Q < 20 MMSCFD.
- PSA/TSA (pulido final): $\text{CO}_2 < 5$ %, $\text{H}_2\text{S} < 10$ ppm, Q < 10 MMSCFD. Solo como complemento.

Endulzamiento de H_2S (cinco tecnologías)

- Scavengers (triazinas): $\text{H}_2\text{S} < 50$ ppm, Q < 5 MMSCFD.
- LO-CAT / Sulferox: H_2S 300–5000 ppm, Q 0.5–20 MMSCFD. Produce azufre elemental.
- Aminas MDEA selectiva: $\text{H}_2\text{S} \geq 10$ ppm, Q 5–500 MMSCFD, presión parcial H_2S 10–100 psia.
- Aminas + Planta Claus: $\text{H}_2\text{S} > 1000$ ppm, Q > 20 MMSCFD. Estándar industrial para H_2S alto.
- Solventes mixtos: cuando CO_2 y H_2S están presentes simultáneamente.

Deshidratación (siete tecnologías)

- Condensación por refrigeración: rocío 5–30 °C, Q 10–500 MMSCFD, $\text{H}_2\text{S} < 100$ ppm. Requiere $\Delta T \geq 20$ °C.
- TEG (trietilenglicol): rocío –10 a 30 °C, Q 10–200 MMSCFD, $\text{H}_2\text{S} < 300$ ppm. Tecnología estándar continua.
- Alúmina activada / sílica gel: rocío –30 a 10 °C, Q 1–300 MMSCFD. Excluida si $\text{H}_2\text{S} > 10$ ppm.

- Tamices moleculares TSA: rocío ≤ -10 °C, $Q > 160$ MMSCFD. Excluida si $\text{CO}_2 \geq 2$ % (riesgo de coadsorción).
- PSA deshidratación: $Q < 10$ MMSCFD, $\text{H}_2\text{S} < 50$ ppm, $P < 300$ psig.
- CaCl_2 : rocío $5-10$ °C, $Q < 10$ MMSCFD, $T < 65$ °C. No regenerable.
- Criogénica: rocío < -50 °C, Q 20–1000 MMSCFD.

Punto de Rocío de Hidrocarburos (cuatro tecnologías)

- Refrigeración mecánica: estándar para flujos ≥ 0.5 MMSCFD. Requiere deshidratación previa.
- Válvula JT / Turboexpansor: requiere $\Delta P \geq 8$ bar. Enfriamiento JT = 0.45 °C/bar.
- Lean oil: $Q > 10$ MMSCFD y $\text{C}_3^+ > 3$ %. No apto para gas pobre.
- Criogénico (SCORE/GSP): $\text{HCDP} < -40$ °C. Excluido si $\text{CO}_2 \geq 2$ % (riesgo de congelación).

Remoción de N_2 (tres tecnologías)

- PSA con zeolitas (NRU): $Q < 2$ MMSCFD. Selectivo para N_2 . Requiere gas seco.
- NRU criogénica: $Q \geq 10$ MMSCFD. Única tecnología robusta a escala industrial.
- Blending: corrección comercial donde exista disponibilidad de gas rico.

6. Análisis de Presiones Inlet vs. Outlet

La aplicación diagnostica automáticamente la relación entre la presión de operación (P_{entrada}) y la presión de entrega (P_{salida}), calculando el ratio y el porcentaje de caída. Los escenarios posibles se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4

Condición	Diagnóstico y acción recomendada
ratio > 1.05 (P _{out} > P _{in})	Compresión requerida. El gas no fluye naturalmente. Se evalúa tipo de compresor según Q y ratio.
ratio 1.0 a 1.05	Diferencia marginal. Posible error de medición o contrapresión de válvula.
delta% > 60 %	Caída severa. Riesgo alto de condensación y efecto Joule-Thomson. Regulación en dos etapas.
delta% 30–60 %	Caída moderada. Se recomienda válvula reguladora (PCV) y separador aguas abajo.
delta% 5–30 %	Normal. Diferencial típico de transporte y regulación.
delta% < 5 %	Presiones prácticamente iguales. Verificar medición.
delta% > 20 % y delta > 5 bar	Riesgo Joule-Thomson. Enfriamiento estimado: $\text{delta_bar} \times 0.45 \text{ }^{\circ}\text{C}.$

Nota. El coeficiente Joule-Thomson utilizado es 0.45 °C/bar, valor representativo para gas natural típico.

7. Limitaciones y Consideraciones Técnicas

Advertencia. Los cálculos de la aplicación son aproximaciones para diagnóstico preliminar. Para diseño de ingeniería de detalle, dimensionamiento de equipos y estudios de factibilidad, se sugiere el uso de simuladores rigurosos como

HYSYS, ProMax, UNISIM o VMGSim con ecuaciones de estado adecuadas (Peng-Robinson, SRK).

- El punto de rocío de hidrocarburos es una aproximación empírica. No reemplaza un cálculo con composición detallada C_7^+ y simulación termodinámica rigurosa.
- El PCI se estima como el 90 % del PCS. En rigor depende de la humedad del gas y la temperatura de referencia.
- El coeficiente Joule-Thomson de 0.45 °C/bar es una aproximación para gas natural típico. Varía con la composición y las condiciones de operación.
- Las recomendaciones de tratamiento son orientativas. La selección final requiere ingeniería de proceso, estudios de factibilidad económica y consideraciones operativas locales.
- La aplicación no calcula CAPEX ni OPEX. Solo orienta la selección tecnológica.

8. Diagrama de Flujo de la Aplicación

La Figura 1 ilustra el flujo completo de ejecución de la aplicación, desde el ingreso de datos hasta la exportación de resultados.

Resolución CREG 071/1999. | Herramienta de diagnóstico y recomendación de tratamiento

