

UNIVERSIDAD DE CÁDIZ

PROYECTO OPENCOURSEWARE (OCW)

SOLUCIONARIO

Casos de Ejemplo Detallados y Rúbricas de Evaluación

Prof. José Joaquín González Cortés

Asignatura: Tecnologías del Petróleo y Petroquímica

1. Introducción al Solucionario

Este documento se publica como **solución tipo** para facilitar el aprendizaje autónomo. Dado que los simuladores del *Laboratorio Virtual* en Streamlit generan variables de partida aleatorias para cada estudiante mediante el uso de `st.session_state`, no existe una única solución numérica universal.

El objetivo de esta guía es proporcionar un **Caso Base Resuelto Paso a Paso** para cada una de las tres prácticas, exponiendo el desarrollo matemático exacto que el simulador exige internamente. Asimismo, se establecen **Rúbricas de Evaluación** cualitativas para que el estudiante pueda autoevaluar y contrastar sus propios informes técnicos finales.

2. Práctica 1: Caracterización de Crudos (Crude Oil Assay)

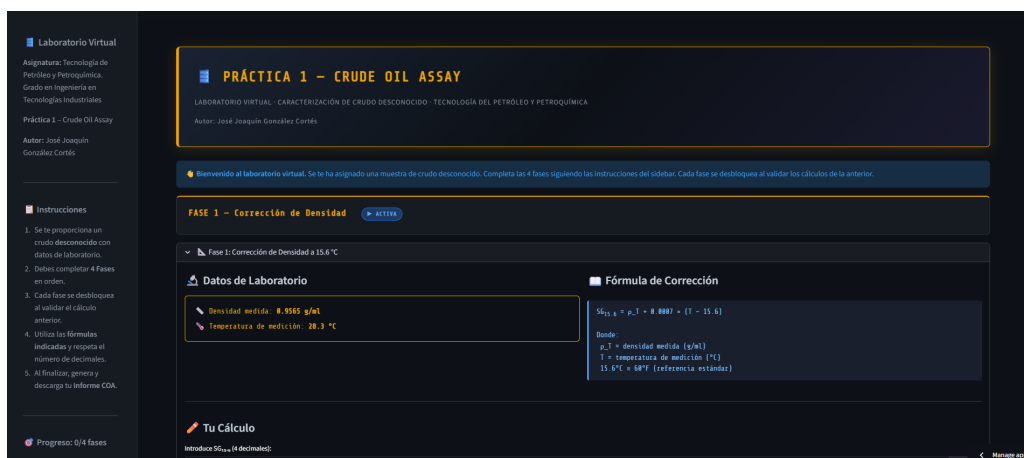


Figura 1: Interfaz principal del simulador de Caracterización de Crudos.

2.1. Caso Base de Ejemplo Resuelto

Supongamos que al iniciar la aplicación, el sistema le asigna a un alumno la siguiente "Muestra Desconocida" (variables aleatorias):

- Densidad medida en laboratorio: $\rho_T = 0,855 \text{ g/mL}$
- Temperatura de la muestra en laboratorio: $T = 25 \text{ °C}$
- Ensayo de destilación: $T_{10} = 110 \text{ °C}$, $T_{50} = 270 \text{ °C}$, $T_{90} = 480 \text{ °C}$
- Contenido en Azufre: $1,5 \text{ \% S}$

Paso 1: Corrección de Densidad a $15,6 \text{ °C}$

El primer desafío del alumno es seleccionar el coeficiente de expansión (α) correcto de la tabla suministrada en su manual. Para una densidad inicial de $0,855$, el coeficiente α preliminar es $0,00070$.

$$\begin{aligned}\rho_{15,6} &= \rho_T + \alpha \cdot (T - 15,6) \\ \rho_{15,6} &= 0,855 + 0,00070 \cdot (25 - 15,6) \\ \rho_{15,6} &= 0,855 + 0,00658 = \mathbf{0,86158 \text{ g/mL}}\end{aligned}$$

Comprobación: El resultado 0,861 sigue estando en el rango $[0,850 - 0,899]$, por lo que el coeficiente elegido era correcto. Asumimos Gravedad Específica $SG \approx 0,862$.

Paso 2: Cálculo y Clasificación de Grados API

Aplicando la fórmula estándar de la industria:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{0,862} - 131,5 = 164,15 - 131,5 = \mathbf{32,65^{\circ}\text{API}}$$

Con este valor, el alumno debe clasificarlo. Estando por encima de $31,1^{\circ}\text{API}$, el crudo se considera **Ligero**.

Paso 3: Cálculo de TMP y Factor K_{UOP}

Primero, se calcula la Temperatura Media Ponderada volumétrica en grados Celsius:

$$TMP(^{\circ}\text{C}) = \frac{T_{10} + 2 \cdot T_{50} + T_{90}}{4} = \frac{110 + 2(270) + 480}{4} = \frac{1130}{4} = 282,5^{\circ}\text{C}$$

A continuación, es imperativo transformarla a escala absoluta (Kelvin) para aplicar la fórmula empírica de UOP:

$$TMP(\text{K}) = 282,5 + 273,15 = \mathbf{555,65\text{ K}}$$
$$K_{UOP} = \frac{\sqrt[3]{1,8 \cdot TMP(\text{K})}}{SG} = \frac{\sqrt[3]{1,8 \cdot 555,65}}{0,862} = \frac{\sqrt[3]{1000,17}}{0,862} = \frac{10,0}{0,862} = \mathbf{11,6}$$

Según el manual, un K_{UOP} de 11,6 se sitúa en el rango $[11,5 - 12,1)$, lo que indica una **Base Mixta**.

2.2. Análisis Didáctico

Errores Frecuentes del Alumnado

Al revisar los informes generados por la app, es importante prestar atención a los siguientes errores matemáticos típicos:

- **El error iterativo de densidad:** Si al alumno le toca una densidad aleatoria de ej. 0,849 a 30°C , y usa $\alpha = 0,00080$, obtendrá un $SG \approx 0,860$. Este nuevo valor entra en la categoría de crudos más pesados ($\alpha = 0,00070$). Un alumno excelente se dará cuenta y recalculará iterativamente.
- **Falta de conversión de unidades térmicas:** Es muy común que apliquen la fórmula de K_{UOP} introduciendo el TMP directamente en $^{\circ}\text{C}$. El resultado carecerá de sentido físico.

2.3. Evaluación del Informe Final

La aplicación genera un archivo `.txt` donde el estudiante argumenta sobre la viabilidad de la muestra.

Rúbrica de Evaluación / Criterios de Corrección

Pregunta 1: Clasificación por Azufre e Impacto Económico

- **Excelente (100 %):** Identifica correctamente que un 1,5% de S lo clasifica como *Crudo Agrio (Sour)*. Explica explícitamente que esto penaliza el margen de refino porque requiere un mayor gasto en hidrógeno para las unidades de Hidrodesulfuración (HDS) y requiere metalurgia especial anticorrosión en la torre atmosférica.
- **Aceptable (50 %):** Identifica que es agrio, pero no detalla los motivos técnicos del aumento de coste operativo.

Pregunta 2 y 3: Base Constitutiva y Predicción de Rendimientos

- **Excelente (100 %):** Concluye que es de *Base Mixta* ($K_{UOP} = 11,6$). Argumenta que, al tener una gravedad API moderadamente alta ($> 30^\circ$ API) y no ser de base puramente asfáltica, generará un buen volumen de destilados intermedios (naftas, diésel) y no presentará un exceso de residuo de vacío problemático.
- **Insuficiente (0 %):** Clasifica erróneamente la base debido a un fallo previo en el cálculo del K_{UOP} y no percibe la incoherencia.

3. Práctica 2: Destilación de Crudo (Curva TBP y Rendimientos)

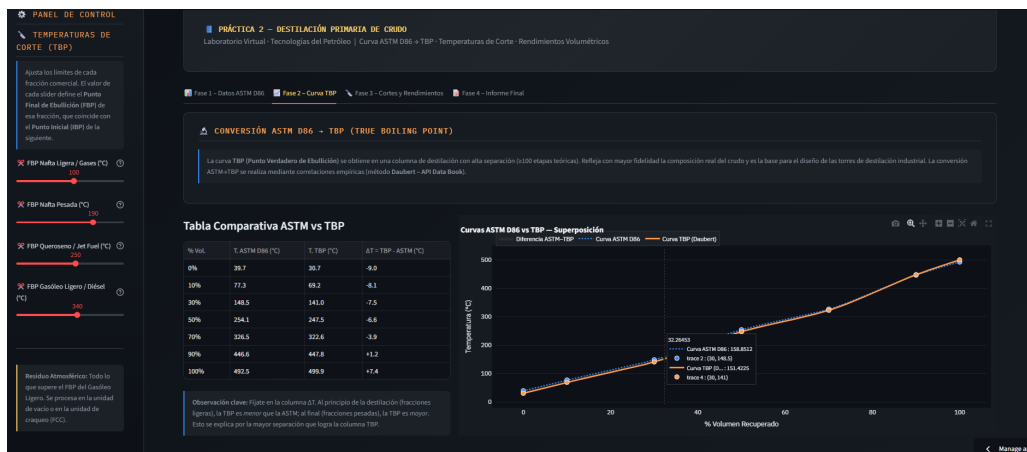


Figura 2: Gráfica interactiva de destilación ASTM vs TBP.

3.1. Caso Base de Ejemplo y Lógica del Simulador

A diferencia de la Práctica 1, esta simulación es puramente gráfica e iterativa. El simulador carga una curva ASTM D86 y aplica internamente correlaciones matemáticas (interpolación y métodos empíricos) para generar la curva de Punto de Ebullición Verdadero (TBP).

El alumno interactúa con los *Cut Points* (Temperaturas de Corte). Supongamos el siguiente escenario base de optimización:

- **Cortes por defecto:** Nafta (hasta 190°C), Queroseno ($190\text{--}250^\circ\text{C}$), Diésel ($250\text{--}340^\circ\text{C}$), Residuo ($> 340^\circ\text{C}$).

- **Rendimientos obtenidos (Ejemplo):** Nafta (25 %), Queroseno (15 %), Diésel (20 %), Residuo Atmosférico (40 %).

Si el mercado demanda más Diésel (mayor rentabilidad), el alumno debe desplazar el punto final (FBP) del Queroseno hacia la izquierda (ej. 230 °C) y el punto final del Diésel hacia la derecha (ej. 360 °C). Esto aumentará el área bajo la curva TBP para la rebanada del Diésel, subiendo su rendimiento a costa de sacrificar volumen de Queroseno y Residuo.

3.2. Análisis Didáctico

Errores Frecuentes del Alumnado

- **Confusión entre alimentación a FCC y Destilación Atmosférica:** Muchos alumnos responden erróneamente que el residuo atmosférico va directo al reactor FCC. Deben recordar que enviar residuo directo al FCC envenena el catalizador por metales y genera demasiado coque. El paso intermedio obligatorio es la Destilación a Vacío.
- **Cortes irracionales:** A veces los alumnos solapan las temperaturas en los *sliders* (ej. poniendo el fin de la Nafta a 200 °C y el fin del Queroseno a 180 °C), lo cual físicamente es imposible. Es fundamental verificar siempre que las temperaturas guarden un orden ascendente estricto en el informe.

3.3. Evaluación del Informe Final (Rúbrica de las 6 Preguntas)

El archivo .txt generado por la app incluirá las respuestas del estudiante a 6 cuestiones fundamentales.

Rúbrica de Evaluación / Criterios de Corrección

Pregunta 1: Diferencia térmica entre TBP y ASTM

- **Excelente (100 %):** Explica que la TBP (al tener mucho reflujo y platos) separa casi perfectamente. Por tanto, los componentes más ligeros hierven antes (menor IBP) y los pesados después (mayor FBP). La ASTM no tiene reflujo; los componentes pesados arrastran a los ligeros (subiendo el IBP) y los ligeros facilitan la evaporación de los pesados (bajando el FBP).
- **Insuficiente (0 %):** Solo describe visualmente la gráfica sin justificar el fenómeno de separación/reflujo.

Pregunta 2: Optimización económica de los puntos de corte

- **Excelente (100 %):** Describe cómo movió los *sliders*. Para maximizar un producto valioso (ej. Diésel), se debe reducir la temperatura final de la fracción anterior (Queroseno) y aumentar la temperatura final de corte del propio Diésel, *robando* volumen a las fracciones adyacentes.

Pregunta 3: Alimentación a la unidad de FCC

- **Excelente (100 %):** Responde que la fracción de la torre atmosférica que termina en el FCC es el **Residuo Atmosférico**, pero aclara que primero debe pasar por la Torre de Vacío para extraer el **Gasóleo de Vacío (VGO)**, que es la verdadera alimentación del FCC.

Pregunta 4: Caracterización rápida del crudo

- **Aceptable (100 %):** Basándose en los porcentajes obtenidos en su gráfica circular, si el residuo atmosférico es muy pequeño ($< 20\%$) y abundan las naftas, concluye que es un crudo ligero (tipo Brent). Si el residuo es masivo ($> 50\%$), concluye que es un crudo pesado (tipo Maya).

Pregunta 5: Límites termodinámicos y Destilación a Vacío

- **Excelente (100 %):** Justifica que no se puede seguir destilando a presión atmosférica más allá de los $350 - 370\text{ °C}$ porque los hidrocarburos pesados sufren **craqueo térmico**. Se rompen las moléculas, se genera coque que ensucia los hornos y se arruina el producto. Para evitarlo y seguir separando, se reduce la presión (Vacío).

Pregunta 6: Separación Real vs. Teórica (Gap y Overlap)

- **Excelente (100 %):** Entiende que la curva TBP que ha cortado en la app asume cortes "perfectos". En una torre real, la separación no es exacta: siempre hay moléculas pesadas que escapan por arriba (*overlap*) y moléculas ligeras que caen por abajo, requiriendo operaciones de *stripping* (arrastre con vapor) en las extracciones laterales.

4. Práctica 3: Craqueo Catalítico (FCC) y Blending

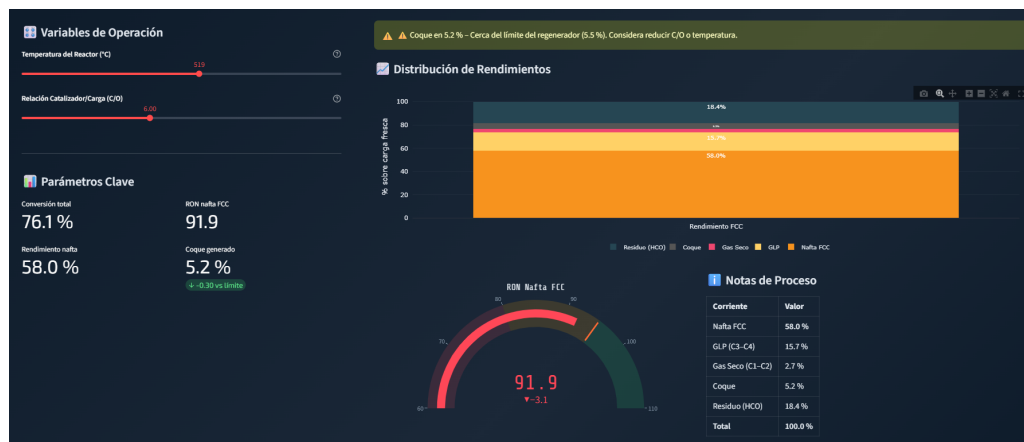


Figura 3: Panel de control de la unidad de Craqueo Catalítico Fluido (FCC).

4.1. Caso Base de Ejemplo y Lógica del Simulador

Esta práctica es la más compleja, ya que acopla dos unidades interdependientes. Los resultados de la Fase 1 (FCC) condicionan el éxito y el margen económico de la Fase 2 (Blending).

Fase 1: El Reactor FCC

El simulador penaliza los extremos térmicos. Supongamos que el alumno ensaya con tres temperaturas manteniendo constante la relación Catalizador/Aceite ($C/O = 6$):

- **A 490 °C:** El RON de la nafta es bajo (≈ 88), pero se produce mucha nafta líquida y poco gas. No hay riesgo de coque excesivo.
- **A 525 °C: Operación óptima.** Se maximiza el volumen de nafta líquida ($\approx 50\%$) y se obtiene un buen RON (≈ 93).
- **A 550 °C (Sobrecraqueo):** El RON es altísimo (≈ 96), pero las moléculas de nafta se rompen formando gas seco y GLP. El rendimiento líquido cae drásticamente y el coque se dispara, arriesgando superar el límite metalúrgico del regenerador ($> 5,5\%$).

Fase 2: El Blending de Gasolinas

El objetivo es lograr un $RON \geq 95$ al menor coste. El algoritmo calcula el octanaje de forma lineal:

$$RON_{mezcla} = x_{fcc} \cdot RON_{fcc} + x_{ligera} \cdot 70 + x_{alq} \cdot 97 + x_{ref} \cdot 100$$

Si el alumno trajo del FCC una nafta pobre ($RON = 88$), necesitará inyectar muchísimo Reformado Catalítico (muy caro) para compensar la Nafta Ligeras ($RON = 70$), disparando el coste del barril por encima de los 100\$. Si trajo un buen $RON = 93$ del FCC, una receta económicamente ganadora sería: 50% Nafta FCC + 15% Nafta Ligeras + 35% Reformado $\rightarrow RON \approx 95,5$ con un coste muy ajustado.

4.2. Análisis Didáctico

Errores Frecuentes del Alumnado

- **El error del "Todo al verde":** Muchos alumnos se centran únicamente en que el medidor de RON de la app se ponga en verde (≥ 95) y formulan recetas perezosas con un 60 % de Reformado Catalítico y un 40 % de Alquilato. Logran $RON = 98$, pero el coste de producción arruinaría a la refinería. Se consideran erróneas y deben evitarse aquellas recetas que no minimicen el coste acercándose lo máximo posible al límite legal de 95.
- **Ignorar el Límite de Coque:** Si el alumno opera a $550\text{ }^\circ\text{C}$ y $C/O = 8$, generará $\approx 7\%$ de coque. El simulador lanzará una alerta roja y el rendimiento pasará a cero. Si el alumno ignora esto y avanza al Blending sin corregirlo, se encontrará con sus tanques de Nafta FCC vacíos.

4.3. Evaluación del Informe Final (Rúbrica de las 3 Preguntas)

El archivo .txt descargado por el alumno recogerá los parámetros fijados en ambas unidades y sus justificaciones teóricas.

Rúbrica de Evaluación / Criterios de Corrección

Pregunta 1: Temperatura del FCC y producción de nafta/gas

- **Excelente (100 %):** Explica correctamente el fenómeno del **craqueo térmico secundario (sobrecraqueo)**. Justifica que eligió una temperatura intermedia (ej. $520 - 530\text{ }^\circ\text{C}$) porque si subía la temperatura al máximo para ganar octanaje, las moléculas de la banda de ebullición de la nafta se rompían (craqueaban) de nuevo para dar gases ligeros, perdiendo valioso volumen de gasolina líquida.
- **Insuficiente (0 %):** Indica que eligió una temperatura sin notar la relación inversa entre el octanaje extremo y la caída del volumen líquido recuperado.

Pregunta 2: Receta de Blending y limitaciones del RON

- **Excelente (100 %):** Presenta su receta final confirmando que suma el 100 %. Argumenta matemáticamente que es imposible fabricar gasolina 95 solo con Nafta Ligera ($RON \approx 70$) y Nafta de FCC ($RON \approx 90 - 93$) porque ninguna de las dos corrientes alcanza la especificación legal de 95 por sí misma. Obligatoriamente se necesita un *booster* de octanaje como el Reformado o el Alquilato.

Pregunta 3: Optimización económica del proceso global

- **Excelente (100 %):** Comprende la interdependencia de la refinería. Concluye que para abaratar costes en el *Blending* (evitando comprar demasiado Reformado Catalítico), hay que operar el FCC exprimiendo el máximo octanaje posible sin que salte la alarma del regenerador. Cada punto extra de RON en el FCC ahorra muchísimo dinero en la formulación final.
- **Aceptable (50 %):** Explica cómo abarató el coste moviendo los *sliders* en el Blending, pero no lo relaciona con la operación previa del FCC.