

## **CAPITULO 4**

---

# **ANÁLISIS COSTO BENEFICIO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU**

---

## CAPITULO 4: ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU

En un proceso de recuperación mejorada se tiene una serie de variables involucradas las cuales son muy importantes para que se pueda lograr un diseño óptimo del proceso lo cual a su vez se vea reflejado en resultados económicos importantes y favorables para la industria petrolera. En este capítulo se va a dar a conocer cuales son las variables más importantes involucradas en el diseño del proceso de combustión in situ así como cual sería el impacto económico que esto tendría en la industria petrolera.

### 4.1 Diseño de un Proyecto de Combustión In Situ Convencional

.El procedimiento a seguir para el diseño de un proceso de combustión in situ en campo es el siguiente<sup>2</sup> (ver anexo 1):

- a. Determinar las variables  $m$ ,  $n$ ,  $Y$  y  $C_m$  del experimento en el laboratorio con el tubo de combustión.
- b. Calcular el aire total requerido (MMPCN) para la combustión, en base al volumen del patrón de pozos  $V_p$ , y a la eficiencia volumétrica de barrido  $E_v$ :
- c. Determinar el gasto de inyección de aire máximo,  $i_a$  y el tiempo requerido para alcanzar  $t_1$ , en base a la máxima presión disponible para inyectar.
- d. Determinar el gasto de flujo de aire mínimo,  $u_{min}$ , por unidad de área seccional, requerido para mantener la combustión. Determinar también el radio de extinción. Si el límite de extinción es menor que la distancia del pozo inyector al pozo productor, se debe reducir el tamaño del arreglo o aumentar el gasto de inyección máximo, lo cual implica una mayor presión de inyección.
- e. Determinar el volumen de aceite producible por acre-pie de yacimiento  $(\frac{Bl}{acre - pie})$ .
- f. Determinar el volumen de agua producible  $(\frac{Bl}{acre - pie})$ , en base al agua inicialmente en el yacimiento y a la originada por la combustión.

- g. Determinar el gasto de producción de aceite y agua en base a los MMPCN de aire inyectado ( $\frac{Bl}{MMPCN}$ ).

## 4.2 Casos Históricos de la Aplicación del Proceso de Combustión In Situ en Campos Petroleros

Los datos resultantes de la aplicación del proceso de combustión in situ en campo petroleros pueden ser muy importantes para el futuro de la economía de algunos países que son dependientes de la industria petrolera y también son muy útiles para saber si el proceso es económicamente factible en tiempo y forma, aunque esto podría variar dependiendo de la situación en la que se encuentre la industria petrolera en el momento que se aplique el proceso.

### 4.2.1 Campo Suplacu Barcau

El Campo Suplacu Barcau es un campo explotado por la compañía Petrom que contiene aceite pesado, el cual se encuentra situado en la parte noroeste de Rumania en la depresión Pannonian<sup>31</sup>. En la Tabla 4.1 se encuentran las condiciones iniciales del campo antes de iniciar su producción. El total de reservas probadas es de aproximadamente 130 millones de barriles.

Tabla 4.1 Condiciones Iniciales del Campo Suplacu Barcau  
(Tomada de artículo SPE 100346)

Esesor Neto (m)	4-24
Presión inicial de yacimiento (bar)	4-22
Temperatura inicial de yacimiento (°C)	18
Porosidad (%)	32
Saturación inicial de aceite (%)	85
Permeabilidad absoluta (mD)	2000
Viscosidad dinámica del aceite (cp)	2000
Densidad de Aceite (Kg/m <sup>3</sup> )	960
°API	16
Producción Inicial por Pozo (bl/día)	12.5-31.5

Inicio su producción en 1960 con gastos que iban desde los 12.5 bl/día a 31.5 bl/día aproximadamente por pozo, pero fueron disminuyendo rápidamente con el paso del tiempo hasta llegar a gastos de 0.6 bl/día por pozo, por tal razón en 1961

se hicieron pruebas de combustión in situ en algunos pozos del campo para ver si era satisfactorio poner en marcha un proyecto que involucrara a este mecanismo de recuperación, pero todo esto fue puesto en marcha hasta el año de 1970.

Hasta finales de 2005 casi 800 pozos tenían una producción total de aproximadamente 8202 bl/día de aceite. El aceite acumulado durante 35 años que se llevo a cabo el proceso era de aproximadamente 17.8 millones de toneladas que corresponde a un factor de recuperación de 44.8%, lo cual es equivalente a aproximadamente. 58, 240,000 barriles de aceite recuperados por medio de este proceso.

A finales de 2005 el precio del petróleo rondaba en 63.91 dólares por barril<sup>32</sup>, por lo tanto en este año la compañía Petrom tuvo ganancias económicas cercanas a los 524,189.82 dólares por día. En la tabla 4.2 se encuentran resumidos los resultados obtenidos con la implementación del proceso de combustión in situ

**Tabla 4.2 Condiciones Resultantes del Proceso de Combustión In Situ**  
(Tomada de artículo SPE 100346)

Temperatura Máxima Alcanzada por Combustión In Situ (°C)	600
Producción Alcanzada por Combustión In Situ (bl/día)	8202
Producción recuperada (bl)	58,240,000
Factor de Recuperación (%)	44.8
Ganancia (dólares/día)	524,189.82

### 4.2.2 Campo West Hackbeny

El Campo West Hackbeny se encuentra localizado en el suroeste de Louisiana, en el cual se explota aceite ligero por parte de la compañía Amoco. Fue descubierto en el año de 1950 con las siguientes condiciones (Tabla 4.3)<sup>33</sup>:

**Tabla 4.3: Condiciones Iniciales del Campo West Hackbeny  
(Tomada de artículo SPE 38848)**

Porosidad (%)	28
Saturación Inicial de agua (%)	19
Permeabilidad (mD)	300
°API	30
Presión inicial de yacimiento (psi)	4100
Producción Inicial por Pozo(bl/día)	66-234
Densidad del Aceite (Kg/m <sup>3</sup> )	874.4
Temperatura Inicial (°C)	174

Cabe mencionar que este proyecto fue dividido en dos yacimientos, por tal situación fueron nombrados como yacimiento A y B, en los cuales se probaron diferentes tipos de gases como fueron el oxígeno, gas natural, dióxido de carbono, nitrógeno y gases de combustión.

La inyección de aire comenzó en Julio de 1996 en el yacimiento A. En este yacimiento seis meses antes de la inyección de gas se tenía una producción de aceite de 234 bl/día, pero después de la inyección de aire los gastos de aceite aumentaron a 315 bl/día.

En el yacimiento B la inyección de aire comenzó en Diciembre de 1996. La producción de aceite en el yacimiento B incremento de 66 bl/día a 109 bl/día.

Para Mayo de 1997 la inyección de aire incremento la producción de aceite a 150 bl/día con un factor de recuperación del 60%, esta cifra fue la suma del aumento de la producción de los dos yacimientos y no es la producción total que se tenía en esta fecha. La producción total de aceite que se tuvo por los dos yacimientos en Mayo de 1997 fue de 450 bl/día.

En Mayo de 1997 el precio del barril oscilaba entre 19.47 dólares<sup>34</sup>, por lo que la compañía Amoco tuvo ganancias cercanas a 8761.5 dólares por día únicamente por la explotación de estos dos yacimientos.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados que se obtuvieron con la implementación del proceso de combustión in situ.

## Análisis Costo Beneficio del Proceso de Combustión In Situ

**Tabla 4.4 Condiciones Resultantes del Proceso de Combustión In Situ**  
(Tomada de artículo SPE 38848)

Temperatura Máxima Alcanzada por Combustión In Situ (°C)	200
Producción Alcanzada por Combustión In Situ (bl/día)	450
Gasto de Inyección (MMPCD)	4
Factor de Recuperación (%)	60
Ganancia (dólares/día)	8761.5

### 4.2.3 Campo Balol

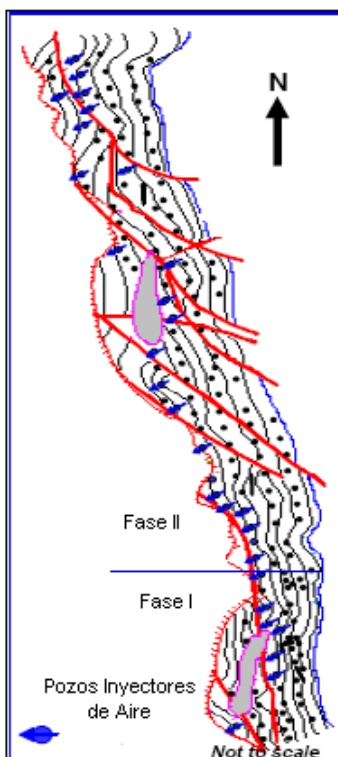
El Campo Balol es uno de los campos de aceite pesado de ONCG que esta localizado en el estado de Gujarat, India. Este campo fue descubierto en 1970 y puesto a producción en 1985 a través de pozos verticales<sup>35</sup>. Las condiciones iniciales de este campo se muestran en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.4: Condiciones Iniciales del Campo Balol**  
(Tomada de Artículo SPE 126241)

Porosidad (%)	28 a 30
Permeabilidad (D)	8
Temperatura Inicial de Yacimiento (°C)	70
Presión Inicial de Yacimiento (Kg/cm <sup>2</sup> )	105
°API	15
Viscosidad del Aceite (cp)	150 a 1000
Saturación de Aceite Inicial (%)	77

La implementación del proceso de combustión in situ húmeda normal fue hecha en dos fases: fase I y fase II. La fase I cubrió la parte sur del campo Balol, fue iniciada en Octubre de 1997 con la ignición artificial en un pozo. En cuatro pozos más se realizo una ignición artificial en Junio de 1999.

El proceso fue extendido para todo el resto del campo (Fase II) en Mayo de 2000 con el inicio de la ignición en un pozo. Algunos de los pozos productores fueron convertidos en pozos inyectores (Fig. 20).



**Figura 20: Localización del Campo Balol**  
(Tomada de Artículo SPE 126241)

En Octubre de 1997 se tenía una producción de  $60 \text{ m}^3/\text{día}$  con un corte de agua de 80%. Con el inicio de la inyección de aire en la fase I, la producción de aceite incremento y se estabilizo en aproximadamente  $260 \text{ m}^3/\text{día}$  reduciendo el corte de agua a 40%.

La producción de aceite durante la fase I vario casi linealmente con la inyección de aire. La recuperación de aceite en la fase I se acerca al 50%. Con la Inyección de  $540 \text{ MMSm}^3$  de aire, la recuperación de aceite incremento en alrededor del 30% en diez años.

Al iniciar la fase II (Mayo de 2000) de la inyección de aire, la producción de aceite era de  $150 \text{ m}^3/\text{día}$ . Con el inicio de la combustión In situ, el corte de agua declino de 80% a 60% en 2004. El gasto de aceite incremento de  $150 \text{ m}^3/\text{día}$  a  $500 \text{ m}^3/\text{día}$ .

En la fase II, el gasto de producción de aceite se incremento linealmente con el gasto de inyección de aire. Cerca de 960 MMm<sup>3</sup> han sido inyectados hasta el momento, rindiendo 0.63 MMm<sup>3</sup> de aceite incremental.

Con el inicio del proceso de combustión in situ, la producción de aceite incremento de 350 m<sup>3</sup>/día en Octubre de 1997 a 700 m<sup>3</sup>/día en 2004. Con los nuevos pozos que se están perforando desde finales de 2010 se espera que para el 2012 se tenga una producción de 800 m<sup>3</sup>/día. Hasta inicios del 2010 cerca de 3.85 MMm<sup>3</sup> habían sido explotados del Campo Balol.

### 4.3 Análisis Costo Beneficio del Proceso de Combustión In Situ en Campos Petroleros

El análisis costo beneficio es muy importante para determinar si se va a implantar o no un proceso de recuperación mejorada, por tal motivo en este subtema se hará un estudio detallado de cual sería el costo y el beneficio que se tendría al implementar el proceso de combustión in situ a un campo terrestre.

#### 4.3.1 Proyección Económica

La proyección económica se aplicara en un campo terrestre productor de aceite hipotético. La información con la que se cuenta para realizar el estudio en este campo es la siguiente (Tabla 4.5):

Tabla 4.5: Propiedades del Fluido en el Campo Hielo

Temperatura del Yacimiento (°C)	92
Presión Inicial (Kg/cm <sup>2</sup> )	220
Presión de Saturación (Kg/cm <sup>2</sup> )	149
Presión Actual (Kg/cm <sup>2</sup> )	215
Factor de Volumen de Aceite a Pb (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	1.25
RGA inicial (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	81
°API	18.3
Viscosidad de Aceite es Pb (cp)	7
Volumen Original de Aceite (MMBLS)	2607.7
Volumen Acumulado de Aceite (MMBLS)	265.6



## Análisis Costo Beneficio del Proceso de Combustión In Situ

---

Para poder realizar el análisis costo beneficio se debe determinar en primer lugar el volumen de aceite residual ( $V_{or}$ ) del Campo.

Para calcular el volumen de aceite residual se utilizara la ecuación 4.1<sup>36</sup>:

$$V_{or} = (N - Np)B_o \quad (4.1)$$

Donde  $V_{or}$  es el volumen de aceite remanente,  $N$  es el volumen original de aceite,  $Np$  es el volumen acumulado de aceite y  $B_o$  es el factor de volumen de aceite.

$$V_{or} = (2607.7MMbls - 265.6MMbls) * 1.25 \frac{m^3}{m^3} = 2927.625 MMbls$$

Si se sabe que el proceso de combustión in situ puede llegar a recuperar entre el 10% y el 20% del volumen de aceite residual que puede contener un yacimiento. En este caso se utilizara un factor de recuperación de 5 y 10% para calcular el volumen de aceite que se podría recuperar:

$$V_{op} = V_{or} X Fr \quad (4.2)$$

$$\text{Para un Fr} = 5\%: \quad V_{op} = (2927.625 MMbls)(0.05) = 146.38125 MMbls$$

$$\text{Para un Fr} = 10\%: \quad V_{op} = (2927.625 MMbls)(0.10) = 292.7625 MMbls$$

Después de haber calculado el volumen de aceite recuperado por el proceso, a continuación se calculara cual seria el costo que se tendría al implementar dicho proceso. Si el costo por implementar el proceso va de 15 a 20 dólares por barril<sup>35</sup>, por lo tanto el costo final que se tendría al implementar el proceso de combustión in situ en este campo de aceite llegaría a ser de aproximadamente:

$$\text{Costo} = V_{op} X \text{Costo por barril del proceso} \quad (4.3)$$

$$\text{Costo} = (146.38125 \times 10^6 \text{ bls})(20 \text{ dólares}) = 2927.625 \text{ millones de dólares}$$

$$\text{Costo} = (292.7625 \times 10^6 \text{ bls})(20 \text{ dólares}) = 5855.25 \text{ millones de dólares}$$

## Análisis Costo Beneficio del Proceso de Combustión In Situ

Si el precio del petróleo actual es de 103.03 dólares por barril<sup>37</sup> la ganancia que se podría obtener al implementar este proceso en este campo sería de aproximadamente:

$$Ganancia = (V_{op} \times \text{Precio del barril actual}) - \text{Costo} \quad (4.4)$$

$$Ganancia = [(146.38125 \times 10^6 \text{ bls})(103.03 \text{ dólares})] - 2927625000 \text{ dólares}$$

$$Ganancia = 12154.035 \text{ millones de dólares}$$

$$Ganancia = [(292.7625 \times 10^6 \text{ bls})(103.03 \text{ dólares})] - 5855250000 \text{ dólares}$$

$$Ganancia = 24308.07 \text{ millones de dólares}$$

Y el beneficio que se tendría al aplicar este proceso en dicho campo oscilaría alrededor de:

$$Beneficio = \frac{V_{op}}{(\text{Costo por barril del proceso} \times \text{Precio del barril actual})} \quad (4.5)$$

$$Beneficio = \frac{146.38125 \times 10^6 \text{ bls}}{(20 \text{ dólares} \times 103.03 \text{ dólares})} = 71038.16849 \text{ bls/dólar}$$

$$Beneficio = \frac{292.7625 \times 10^6 \text{ bls}}{(20 \text{ dólares} \times 103.03 \text{ dólares})} = 142076.337 \text{ bls/dólar}$$

En la tabla 4.6 se resumen los resultados obtenidos de la proyección económica con el proceso de combustión in situ.

**Tabla 4.6: Resultados Obtenidos con el Proceso de Combustión In Situ**

	Fr = 5%	Fr = 10%
<b>Volumen de Aceite Producido (MMbls)</b>	146.38125	292.7625
<b>Costo (Millones de Dólares)</b>	2927.625	5855.25
<b>Ganancia (Millones de Dólares)</b>	12154.035	24308.07
<b>Beneficio (bls/dólar)</b>	71038.16849	142076.337

Al analizar la ganancia y el beneficio que se obtendría al poner en marcha un proyecto de combustión in situ en un campo petrolero, se ve claramente que dicho proyecto sería muy rentable económicamente para recuperar el aceite de este campo que todavía se encuentra entrampado.

Desafortunadamente no se cuenta con la información necesaria para realizar un análisis costo beneficio de una forma adecuada debido a que mucha de esta información es confidencial. Sin embargo, para poder realizar el análisis costo beneficio en este trabajo se recurrió a aplicaciones que se han llevado a cabo a nivel mundial en las cuales se dan a conocer algunos costos del proceso.