
ANEXO

ANEXO

Formulación de Parámetros Para el Diseño de un Proceso de Combustión In Situ

1.- Contenido de Combustible

$$\begin{aligned} \text{Moles totales producidos} &= \text{Moles de CO}_2 + \text{Moles de CO} + \text{Moles de N}_2 + \text{Moles de O}_2 \quad (\text{A.1}) \\ \text{Por mol de combustible} & \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores de: $\left(\frac{m}{m+1}\right)$, $\left(\frac{1}{m+1}\right)$, $\left(\frac{79}{21}\right)\frac{1}{Y}\left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right)$, $\left(\frac{1-Y}{Y}\right)\left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right)$, para los moles de CO₂, CO, N₂ y O₂ respectivamente, se

obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Moles totales producidos} &= 1 + \left(\frac{4,761-Y}{Y}\right)\left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right) \quad (\text{A.2}) \\ &\text{por mol de combustible} \end{aligned}$$

Entonces, el porcentaje de O₂ con respecto a los moles del gas producido es:

$$\%O_2 = \frac{100 \times \text{Mol}O_2}{\text{MolTotales}} = \frac{\left(\frac{1-Y}{Y}\right)\left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right)}{1 + \left(\frac{4,761-Y}{Y}\right)\left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right)} \times 100 \quad (\text{A.3})$$

Entonces, la fracción del oxígeno utilizado Y, viene dada por:

$$Y = \frac{100 - 4,761 \times \%O_2}{100 - \%O_2 - \frac{\%O_2}{R}} \quad (\text{A.4})$$

donde, $R = \left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right)$

y el porcentaje en exceso de aire será:

$$\% \text{ exceso de aire} = \frac{1-Y}{Y} \times 100 \quad (\text{A.5})$$

c.- Número de átomos de hidrógeno a átomos de carbono (n).

El porcentaje de CO₂ con respecto a los moles del gas producido es:

$$\%CO_2 = \frac{\left(\frac{m}{m+1}\right)}{1 + \left(\frac{4,761 - Y}{Y}\right)\left(\frac{2m+1}{2m+2} + \frac{n}{4}\right)} \times 100 \quad (A.6)$$

donde, al sustituir, m y Y, se obtiene:

$$n = \frac{106,3 + 2x\%CO - 5,06x(\%O_2 + \%CO + \%CO_2)}{\%CO_2 + \%CO} \quad (A.7)$$

una vez determinadas las variables m, n y Y, una expresión para el contenido de combustible, C_m ($\frac{lb}{pie^3}$), puede obtenerse como sigue:

- Sea W_c, las lb de carbono por pie³ de gas producido, luego:

$$W_c = \frac{12}{379 \times 100} (\%CO_2 + \%CO) \quad (A.8)$$

- Sea W_H, las lb de hidrógeno/pie³ normal de gas producido, luego:

$$W_H = \frac{2}{379 \times 100} \times 2x \left(\frac{21}{79} \%N_2 - \%O_2 - \%CO_2 - \frac{1}{2} \%CO \right) \quad (A.9)$$

Entonces, el peso total de combustible (lb de combustible/pie³ normal del gas producido) será:

$$W = W_c + W_H \quad (A.10)$$

Dado que el volumen de gas producido en el experimento, V_g (pie³ normales de gas) es conocido, entonces el peso del combustible quemado (lb de combustible) será:

$$W_F = V_g \times (W_c + W_H) \quad (A.11)$$

Luego, el contenido de combustible viene dado por:

$$C_m = \frac{V_g \times (W_c + W_H)}{(VolumenTotaldeFormaciónQuemada)} \quad (A.12) \quad \text{ó,}$$

$$C_m = \frac{4V_g}{379 \times 100 V_b} \left(\frac{21}{79} \%N_2 - \%O_2 + 2\%CO_2 + \frac{5}{2} \%CO \right) \quad (A.13)$$

donde, V_b es el volumen de la arena empacada en el tubo de combustión, pie³.

2.- Requerimientos de Aire

El requerimiento de aire, a , en PCN/pie³ de roca, se obtiene a partir de los datos del análisis seco y viene dado por:

$$a = \frac{379}{21Y} x \frac{100C_m}{(12+n)} R = C_m F_{aF} \quad (\text{A.14})$$

donde, F_{aF} es la relación aire inyectado/combustible en PCN/lb de combustible.

Entonces, la relación aire inyectado/aceite desplazado viene dada por:

$$F_{ao} = \frac{(5,615)a}{(S_{oi} - S_r)\phi_R} \quad (\text{A.15})$$

donde, S_{oi} es la saturación inicial de aceite, fracción, ϕ_R es la porosidad de la formación, fracción, y S_r es la saturación de aceite consumida como combustible, fracción, dada por:

$$S_r = \frac{C_m}{\rho_f \phi} \quad (\text{A.16})$$

siendo ρ_f la densidad del combustible en lb/pie³.

3.- Velocidad del Frente de Combustión

La velocidad del frente de combustión, pie/día, viene dada por:

$$V_f = \frac{dr_f}{dt} = \frac{U}{r_f} \quad (\text{A.17})$$

$$\text{siendo, } U = \frac{i_a}{2\pi h a} \quad (\text{A.18})$$

donde, t es el tiempo en días, h es el espesor de la formación en pies.

De la ecuación (5.26), se puede escribir:

$$r_f^2 = 2Ut \quad (\text{A.19})$$

la cual puede ser usada para calcular la posición del frente de combustión a cualquier tiempo t .

La ecuación (5.26) puede escribirse de la forma:

$$V_f = \frac{u_a}{a} \quad (\text{A.20})$$

donde, u_a es el flujo local de aire. PCN/pie²xdía, dado por:

$$u_a = \frac{i_a}{2\pi r_f h} \quad (\text{A.21})$$

Así, si se quiere tener una velocidad del frente de combustión constante, el flujo local de aire u_a , tiene que irse aumentando en función del tiempo, o sea, en función de la posición del frente.

4.- Calor de Combustión

En general se expresa en BTU/lb de combustible consumido y se determina mediante:

$$\Delta H = \frac{174.000m}{(m+1)(n+12)} + \frac{52.500}{(m+1)(n+12)} + \frac{61.500n}{(n+12)} \quad (\text{A.22})$$

Donde, el primer término del lado derecho representa el calor de combustión del carbono a dióxido de carbono, el segundo término representa el calor de combustión del carbono a monóxido de carbono, y el tercer término representa el calor de combustión del hidrógeno a vapor de agua.

5.- Cantidad de Agua Formada por la Combustión

En la reacción química de algún combustible con oxígeno se forma una cierta cantidad de agua, la cual se denomina agua producto de la combustión. En general se expresa en bls/PCN de gases producto de la combustión, y se determina por:

$$V_w = \frac{36}{379 \times 350 \times 100} \left(\frac{21}{79} \%N_2 - \%O_2 - \%CO_2 - \frac{1}{2} \%CO \right) \quad (\text{A.23})$$

en base a los resultados del análisis seco.

6.- Ignición

Un parámetro importante referente a la ignición espontánea, es el tiempo requerido para que esta ocurra. De acuerdo a Tadema y Weijdema, el tiempo de ignición espontáneo puede ser calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$t_i = \frac{MT^2 \left(1 + \frac{R}{T}\right) \frac{B}{T}}{\phi S_o \rho_o H_R A_o p_x^n B} x e^{\frac{B}{T}} \quad (\text{A.24})$$

donde:

t_i : tiempo de ignición, días

T_R : temperatura original del yacimiento, °R

M : capacidad calorífica de la formación, $\frac{BTU}{pie^3 - F}$.

ϕ : porosidad de la formación fracción

ρ_o : densidad del petróleo, $\frac{lb}{pie^3}$.

S_o : saturación de petróleo, fracción

H_R : calor de oxidación del petróleo, BTU/lb de O₂

p_x : presión parcial del oxígeno, lpc ($p_x = 0,209 p$ donde p es la presión de inyección del vapor en lpc)

A_o : constante, $lpc^{-n}d^{-1}$.

B : constante, °R

n : exponente de la presión, adimensional

Las constantes A_o , B y n se determinan por la medición de las tasas de oxidación de diferentes mezclas de crudos a diferentes presiones y temperaturas. La tasa de oxidación K (lb de oxígeno/lb de petróleo-día) se relaciona a la presión parcial del oxígeno p_x , y a la temperatura original del yacimiento T_R^* por medio de la siguiente ecuación del tipo Arrhenius:

$$K = A_o p_x^n e^{\frac{-B}{T}} \quad (\text{A.25})$$

7.- Gasto de Inyección de Aire

En ausencia de datos de campo, la tasa de inyección de aire se puede estimar mediante la siguiente ecuación:

$$P_i = P_w^2 + \frac{i_a \mu_a T_R}{0,703 k_g h} x \left(\ln \frac{d^2}{r_w V_b t_1} - 1,238 \right) \quad (\text{A.26})$$

donde:

P_i : presión del pozo de inyección, lpcá

P_w : presión del pozo de producción, lpcá

μ_a : viscosidad del aire, cps

k_g : permeabilidad efectiva al aire, md

r_w : radio de los pozos, pies

d : distancia del pozo inyector al pozo productor, pies

V_b : velocidad del frente de combustión, pie/día

T_R : temperatura del yacimiento, °R

h : espesor de la formación, pies

i_a : tasa de inyección de aire máxima, PCN/día

t_1 : tiempo requerido para alcanzar la tasa de inyección de aire máxima, días.

El valor t_1 se puede estimar mediante la siguiente relación:

$$t_1 = \frac{i_a}{2\pi h V_b^2 a} \quad (\text{A.27})$$

donde, a es el requerimiento de aire en $\frac{\text{PCN}}{\text{pie}^3 \text{roca}}$.

Sustituyendo t_1 de la ecuación (5.3) en la ecuación (5.2), se obtiene una ecuación con i_a como única incógnita, la cual requiere resolverse iterativamente.

Frecuentemente, la tasa de inyección de aire es estimada (si datos previos son disponibles) por medio de una relación del tipo:

$$i_a = G(P_i^2 - P_w^2) \quad (\text{A.28})$$

donde, G es una función de las propiedades del aire y de las rocas y de la geometría del yacimiento.

8.- Radio de Extinción

El radio de extinción se define como la distancia radial (a partir del pozo de inyección) r_{ext} , pies, a la cual ya no es posible mantener la combustión. Esta distancia se relaciona al gasto mínimo de flujo de aire (necesaria para mantener la combustión) u_{min} , $\frac{PCN}{d - pie^2}$, y al gasto de inyección de aire i_a , $\frac{PCN}{d}$, mediante la siguiente ecuación:

$$u_{min} = \frac{i_a}{2\pi r_{ext} h} \quad (A.29)$$

Selig y Couch, presentan una correlación gráfica para estimar el radio de extinción del frente de combustión radial (conectivo-convectivo). Este gráfico se presenta en la Figura A.1 con algunas modificaciones, y correlaciona las siguientes variables:

$$\frac{U}{2\alpha v} = \frac{M}{c_a \rho_a a} v S \frac{v h}{2r_{ext}} = \frac{c_a \rho_a h u_{min}}{4k_h} \quad (A.30)$$

para valores de 0,5 y 0,7 de la temperatura adimensional, $\frac{T_c - T_R}{T_a - T_R}$

donde:

T_c : temperatura de ignición, F

T_R : temperatura original del yacimiento, F

$T_a - T_R$, es el incremento adiabático de temperatura, F y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T_a - T_R = \frac{C_m \Delta H}{M} \quad (\text{A.31})$$

donde:

ΔH : calor de combustión, $\frac{BTU}{lb}$

C_m : contenido de combustible, lb/pie³ de roca.

M : capacidad calorífica de la formación, $\frac{BTU}{pie^3 - F}$

y:

$$v = \frac{c_a \rho_a i_a}{4\pi K_h h} \quad (\text{A.32})$$

donde:

c_a : calor específico del gas (aire) inyectado, medido a condiciones

normales, $\frac{BTU}{lb - F}$.

ρ_a : densidad del gas (aire) inyectado, medido a condiciones normales,
lb/pie³.

i_a : gasto de inyección de gas (aire), PCN/día.

K_h : conductividad térmica de las formaciones adyacentes, $\frac{BTU}{d - pie - F}$

h : espesor de la formación, pies.

La temperatura de ignición T_c , se estima igual a 600 F en la mayoría de los casos, debido a que la combustión del hidrógeno comienza alrededor de los 400 F, mientras que la del carbono se completa alrededor de los 700 F.

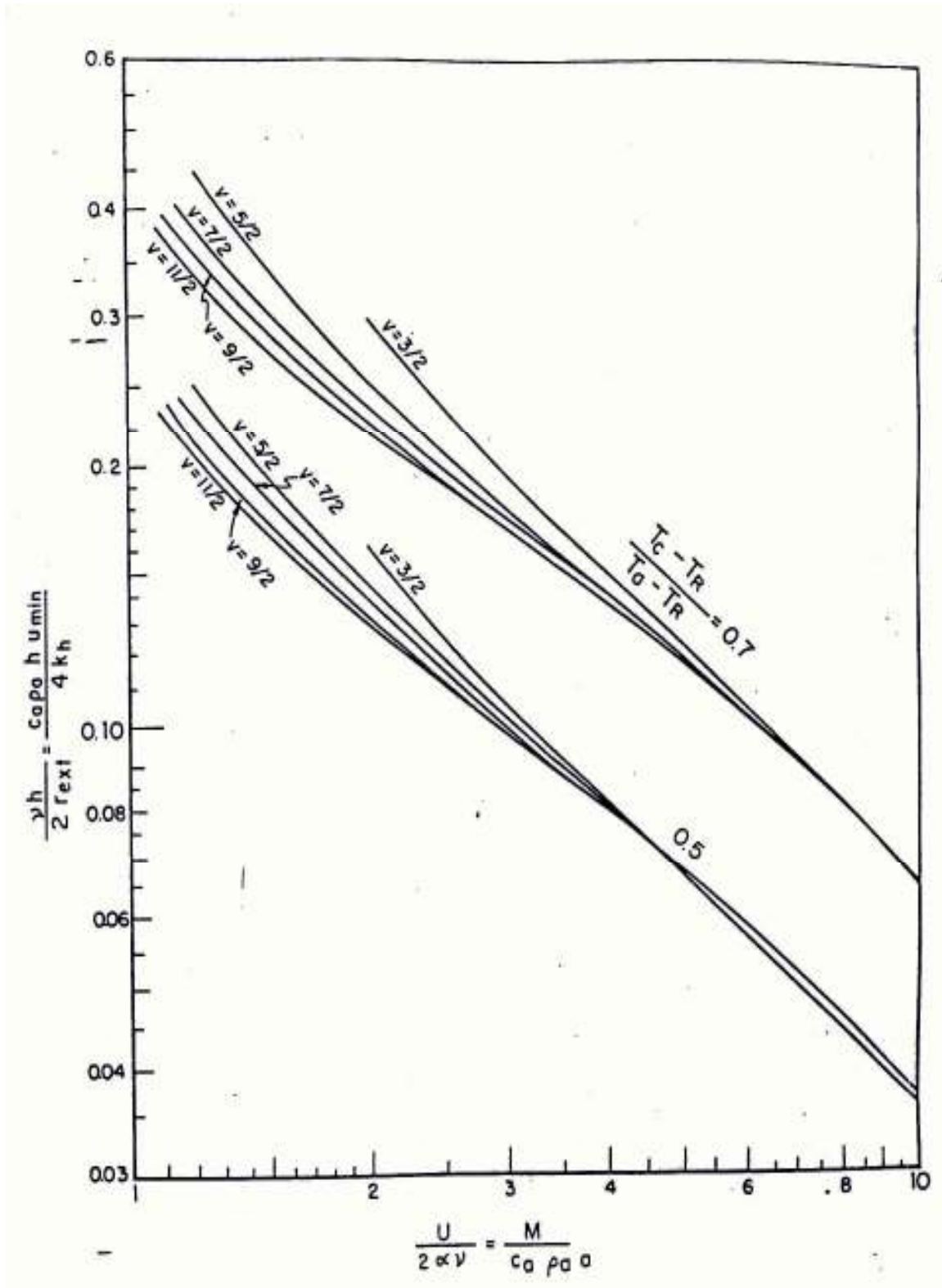


Figura A.1 – Correlación gráfica de Selig y Couch para determinar el radio de extinción

(Sarathi S. Parta, In situ Combustión Handbook, 1999)

9.- Eficiencia Volumétrica

La eficiencia volumétrica, definida como el producto de la eficiencia areal por la eficiencia vertical:

$$E_v = E_A \times E_1 \quad (A.33)$$

ha sido reportada en el rango de 30% a 100%.

10.- Volumen de Aceite Producible

$$Np = 7758 \left[\left(\frac{\phi S_{oi} E_v}{B_{oi}} - \frac{C_m F}{\rho_f} \right) + (1 - E_v)(0,40) \frac{\phi S_{oi}}{B_{oi}} \right] \quad (A.34)$$

donde:

ϕ : porosidad de la formación, fracción

ρ_f : densidad del combustible quemado (coque), $\frac{lb}{pie^3}$.

S_{oi} : saturación inicial de aceite, fracción

B_{oi} : factor volumétrico del aceite , BY/BN

C_m : contenido de combustible, $\frac{lb}{pie^3}$.

F : factor de corrección, adimensional

El factor de corrección F , está dado por:

$$F = \frac{(1 - \phi)}{(1 - \phi_p)} \quad (A.35)$$

donde, ϕ_p es la porosidad del empaque de arena en el tubo de combustión, fracción.

11.- Volumen de Agua Producible

$$W_p = 7758 \left(\frac{\phi S_{wi} E_v}{B_{wi}} + \frac{C_m V_w F}{\rho_w} \right) \quad (A.36)$$

donde:

V_w : volumen de agua formada por la combustión, $\frac{Bl}{PCN}$.

ρ_w : densidad del agua, $\frac{lb}{pie^3}$

B_{wi} : factor volumétrico del agua, $\frac{BY}{BN}$.

S_{wi} : saturación inicial de agua, fracción

12.- El Gasto de Producción de Aceite y Agua en Base a los MMPCN de Aire Inyectado

$$N_p' = \frac{N_p}{a_T} \quad (A.37)$$

$$W_p' = \frac{W_p}{a_T} \quad (A.38)$$