

# APÉNDICE I

## CÁLCULOS TIPOS

A continuación se presentan los cálculos tipos correspondientes a las pruebas de Combustión En Sitio.

### 1- Permeabilidad al nitrógeno

$$K_{N_2} = \frac{m * L * \mu_{N_2}}{A} \quad (\text{Ec.1})$$

Donde:

$K_{N_2}$  : Permeabilidad al nitrógeno (Darcy)

$m$  : Pendiente de la recta (cc/s\*atm)

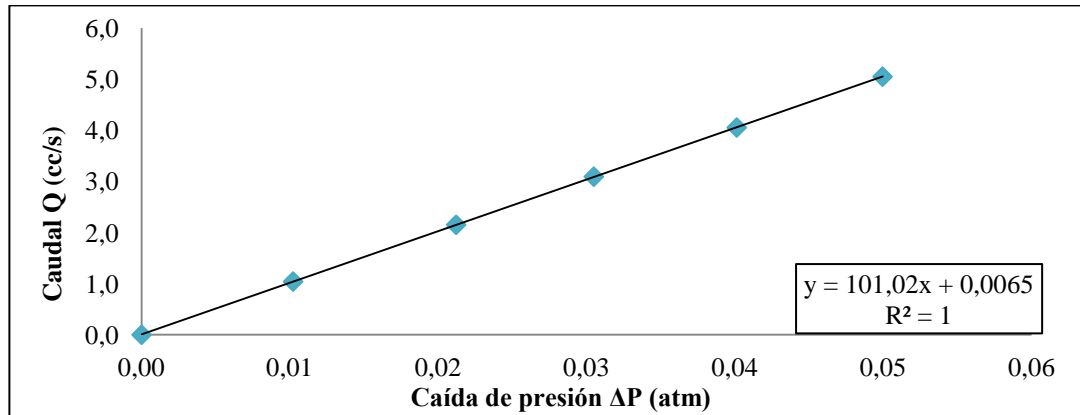
$L$  : Longitud de la celda (cm)

$\mu_{N_2}$  : Viscosidad del nitrógeno (cP)

$A$ : Área de la celda (cm<sup>2</sup>)

Para determinar la pendiente de la recta, se grafican los valores de caudales (Q) de nitrógeno en función de las caídas de presión ( $\Delta P$ ).

A continuación se presenta la gráfica correspondiente a dichas mediciones:



**Figura N°48.** Permeabilidad al nitrógeno.

Una vez obtenida la pendiente de la recta, se procede a determinar la permeabilidad al nitrógeno por medio de la (Ec.1).

$$K_{N_2} = \frac{101,020 \frac{cc}{s * atm} * 30 \text{ cm} * 0,0178 \text{ cp}}{\frac{\pi * (3,76 \text{ cm})^2}{4}} = 4,87 \text{ Darcy}$$

## 2- Permeabilidad al agua.

$$K_{H_2O} = \frac{m * L * \mu_{H_2O}}{A} \quad (\text{Ec.2})$$

Donde:

$K_{H_2O}$ : Permeabilidad al agua (darcies)

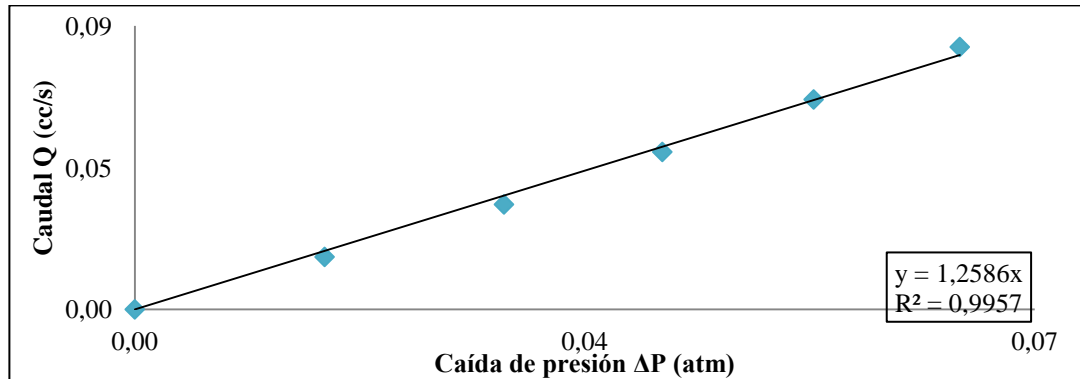
$m$ : Pendiente de la recta (cc/s\*atm)

$L$  : Longitud de la celda (cm)

$\mu_{H_2O}$ : Viscosidad del agua (cP)

$A$ : Área de la celda (cm<sup>2</sup>)

Para determinar la permeabilidad al agua se requiere de la pendiente de la recta, la cual se obtiene graficando los valores de caudales de agua en función de las caídas de presión. La gráfica correspondiente se presenta a continuación:



**Figura N°49.** Permeabilidad al agua.

Obtenida la pendiente de la recta, se procede a determinar la permeabilidad al agua de la siguiente forma:

$$K_{H_2O} = \frac{1,258 \frac{cc}{s * atm} * 30 cm * 1,020 cp}{\frac{\pi * (3,76 cm)^2}{4}} = 3,470 \text{ Darcy}$$

### 3- Saturación con crudo

Para determinar la saturación con crudo, se requiere de ciertos datos que serán suministrados a continuación:

$$\%Sc = \frac{Mc}{Mt} \quad (\text{Ec.3})$$

$$Mc = Vci * \rho c - Mcsal - Mcc - Mct - Mcs \quad (\text{Ec.4})$$

Donde:

$Mc$ : Masa de crudo en la celda (g)

$Vci$ : Volumen de crudo inyectado (ml)

$\rho c$ : Densidad del crudo (g/ml)

$Mcsal$ : Masa de crudo en la salchicha (g)

$M_{cc}$ : Masa de crudo en las conexiones (g)

$M_{ct}$ : Masa de crudo en las tapas (g)

$M_{cs}$ : Masa de crudo en las servilletas (g)

Para determinar la masa de crudo en la salchicha, se realiza de la siguiente forma:

$$M_{csal} = M_{sca} - M_{sv} - M_a \quad (\text{Ec.5})$$

Donde:

$M_{sca}$ : Masa de salchicha + crudo+ agua (g)

$M_{sv}$ : Masa de salchicha vacía (g)

$M_a$ : Masa de agua en la salchicha (g)

$$M_{csal} = 1510,75 \text{ g} - 1184 \text{ g} - 322,13 \text{ g} = 4,62$$

Finalmente se procede a calcular la masa de crudo en la celda:

$$MC = (478,34 \text{ ml} - 344,89 \text{ ml}) * 0,9987 \frac{\text{g}}{\text{ml}} - 4,62 \text{ g} - (115,21 \text{ g} - 99,62 \text{ g}) - 7,29 \text{ g} - (9,19 \text{ g} - 8,77 \text{ g})$$

$$MC = 105,363 \text{ g}$$

Obtenida la masa de crudo, se determina el porcentaje de saturación con crudo:

$$\%Sc = \frac{105,363 \text{ g}}{115 \text{ g}} * 100\% = 91,62\%$$

La masa total corresponde al volumen poroso de la celda, el cual fue determinado al saturar la celda con agua. El cálculo respectivo se muestra a continuación:

$$M_{ac} = M_{aac} - M \quad (\text{Ec.6})$$

Donde:

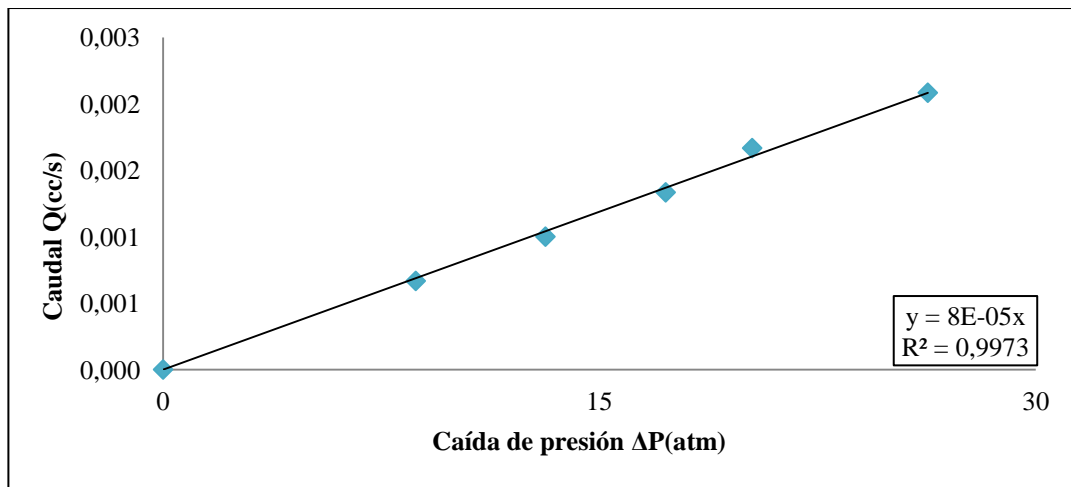
$M_{ac}$ : Masa de agua en la celda (g)

$M_{ac}$ : Masa de la celda+ agua+ arena (g)

$M$ : Masa de la celda + arena (g)

$$M_{ac} = 6585 \text{ g} - 6470 \text{ g} = 115 \text{ g}$$

Una vez saturada la celda con crudo, se procede a determinar la permeabilidad al crudo, midiendo la caída de presión en función del caudal para obtener el valor de la pendiente de la recta.



**Figura N°50.** Permeabilidad al crudo.

Una vez graficado, se determina la permeabilidad al crudo, resultando:

$$K_c = \frac{m * L * \mu_c}{A} = 3,391 \text{ darcies}$$

#### **4- Velocidad del frente de combustión**

$$V = \frac{X}{\Delta t} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde:

V: Velocidad del frente de combustión (cm/h)

X: Distancia entre termopares (cm)

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo que tarda el frente de combustión en pasar por el termopar  
(h)

$$V = \frac{5 \text{ cm}}{3,37 \text{ h} - 2,9 \text{ h}} = 10,7 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

De la misma forma se determinaron las demás velocidades correspondientes a la prueba

### 5- Velocidad promedio del frente de combustión

$$\bar{V} = \frac{\Sigma Vi}{N} \quad (\text{Ec.8})$$

Donde:

$\bar{V}$ : Velocidad promedio del frente de combustión (cm/h)

$N$ : Número total de velocidades (adim)

$$\bar{V} = \frac{10,7 \frac{\text{cm}}{\text{h}} + 12,5 \frac{\text{cm}}{\text{h}} + 17,6 \frac{\text{cm}}{\text{h}}}{3} = 13,2 \frac{\text{cm}}{\text{h}}$$

### 6- Cálculo del volumen de gas acumulado en la prueba

$$Vli = \dot{V}li * t \quad (\text{Ec.9})$$

Donde:

$Vli$ : Volumen del gas (l)

$\dot{V}li$ : Flujo volumétrico a condiciones del laboratorio (l/min)

$t$ : Tiempo(min)

$$Vli = 0,717 \frac{\text{l}}{\text{min}} * 1 \text{ min} = 0,717 \text{ l}$$

De la misma forma se determinaron los volúmenes restantes.

$$Vl = \Sigma Vli \quad (\text{Ec.10})$$

$$Vl = (0,717 + 0,356 + 0,373 + 0,364 + 0,363 + 0,368 + 0,369 + 0,367 + 0,370 + 0,366 + 0,385 + 0,382)l = 4,786 l$$

## 7- Determinación de Oxígeno, Hidrógeno, Dióxido de carbono, Monóxido de carbono y Nitrógeno

- **Oxígeno**

$$Vli_{O_2} = Xi_{O_2} * Vl \quad (\text{Ec.11})$$

Donde:

$Vli_{O_2}$ : Volumen de oxígeno correspondiente a la bolsa i (l)

$Xi_{O_2}$ : Fracción volumétrica del oxígeno correspondiente a la muestra i (adim)

$$Vli_{O_2} = 0,005 * 4,786l = 0,0239 l$$

De la misma forma se calcularon los volúmenes restantes correspondientes a cada corte i.

$$Vl_{O_2} = \Sigma Vli_{O_2} \quad (\text{Ec.12})$$

$$Vl_{O_2} = 1,029l$$

- **Hidrógeno**

$$Vli_{H_2} = Xi_{H_2} * Vl \quad (\text{Ec.13})$$

Donde:

$Vli_{H_2}$ : Volumen de hidrógeno correspondiente a la bolsa i (l)

$Xi_{H_2}$ : Fracción volumétrica del hidrógeno correspondiente a la muestra i (adim)

$$Vl_{H_2} = 0,00032 * 4,786 l = 0,002 l$$

Se procede a determinar el volumen total de hidrógeno en todas las bolsas.

$$Vl_{H_2} = \Sigma Vl_{H_2} \quad (\text{Ec.14})$$

$$Vl_{H_2} = 0,067 l$$

- **Dióxido de carbono**

$$Vl_{CO_2} = Xi_{CO_2} * Vl \quad (\text{Ec.15})$$

Donde:

$Vl_{CO_2}$ : Volumen de dióxido de carbono correspondiente a la bolsa i (l)

$Xi_{CO_2}$ : Fracción volumétrica del dióxido de carbono correspondiente a la muestra i (adim)

$$Vl_{CO_2} = 0,113 * 4,786 l = 0,542 l$$

Se procede a determinar el volumen total de dióxido de carbono en todas las bolsas.

$$Vl_{CO_2} = \Sigma Vl_{CO_2} \quad (\text{Ec.16})$$

$$Vl_{CO_2} = 13,9219 l$$

- **Monóxido de carbono**

$$Vl_{CO} = Xi_{CO} * Vl \quad (\text{Ec.17})$$

Donde:

$Vl_{CO}$ : Volumen de monóxido de carbono correspondiente a la bolsa i (l)



$Xi_{CO}$ : Fracción volumétrica del monóxido de carbono correspondiente a la muestra i (adim).

$$Vli_{CO} = 0,027 * 4,786 l = 0,130 l$$

Se procede a determinar el volumen total de monóxido de carbono en todas las bolsas.

$$Vl_{CO} = \Sigma Vli_{CO} \quad (\text{Ec.18})$$

$$Vl_{CO} = 2,375 l$$

- **Nitrógeno**

$$Vli_{N_2} = Xi_{N_2} * Vl \quad (\text{Ec.19})$$

Donde:

$Vli_{N_2}$ : Volumen de nitrógeno correspondiente a la bolsa i (l)

$Xi_{N_2}$ : Fracción volumétrica del nitrógeno correspondiente a la muestra i (adim)

$$Vli_{N_2} = 0,848 * 4,876 l = 4,061 l$$

Se procede a determinar el volumen total de nitrógeno en todas las bolsas.

$$Vl_{N_2} = \Sigma Vli_{N_2} \quad (\text{Ec.20})$$

$$Vl_{N_2} = 75,125l$$

## **8- Determinación del agua y crudo producido**

$$Mcat = Mfca - Mfv \quad (\text{Ec.21})$$

Donde:

Mzv: Masa de la zanahoria vacía (g)

Mzca (i): Masa de zanahoria+crudo+agua de la muestra i (g)

Mfv: Masa de los frascos vacíos (g)

Mfca (i): Masa de los frascos+crudo+agua de la muestra i (g)

Mfcaf (i): Masa residual de crudo +agua en los frascos de la muestra i,luego de vaciarlos (g)

Mcat (i): Masa de crudo más agua total recuperada de la muestra i (g)

Md (i): Masa disponible, luego de medir la densidad (g)

Mnd (i): Masa necesaria para medir la densidad (g)

Ma(i): Masa de agua de la muestra i (g)

Mcp(i): Masa de crudo producido de la muestra i (g)

Mcpt: Masa de crudo total producido (g)

$$Mcat(i) = 100,930 \text{ g} - 89,639 \text{ g} = 11,290 \text{ g}$$

- **Para la primera centrifugación de las muestras**

Se observaron los volúmenes de agua libre, por separación de fases en las zanahorias.

Val<sub>1</sub> (i): Volumen de agua libre de la muestra i luego de la primera centrifugación (ml)

Val (i): 0,3ml

$$Md(i) = Mcat(i) - Mnd(i) \quad (\text{Ec.22})$$

$$Md(i) = 11,290 \text{ g} - 4,080 \text{ g} = 7,21 \text{ g}$$

- **Para la segunda centrifugación de las muestras**

Se observaron los volúmenes de agua libre, por separación de fases en las zanahorias

$Val_2(i)$ : Volumen de agua libre de la muestra i luego de la segunda centrifugación (ml).

$Val_2(i)$ : 0,4ml

$$\%W_i = \frac{(Val_2(i) - Val_1(i)) * \rho_{H_2O}}{Mcat(i) - Val_1(i) * \rho_{H_2O}} * 100\% \quad (Ec.23)$$

Donde:

$W_i$ : Porcentaje de emulsión de agua de la muestra i (%)

$\rho_{H_2O}$ : Densidad del agua de formación (g/ml)

$$\%W_i = \frac{(0,4 \text{ ml} - 0,3 \text{ ml}) * 1,005 \frac{g}{ml}}{11,29 \text{ g} - 0,3 \text{ ml} * 1,005 \frac{g}{ml}} * 100\% = 0,92\% \quad (Ec.23)$$

- **Masa de agua total para la muestra i**

$$Ma(i) = Val_2(i) * \rho_{H_2O}(i) \quad (Ec.24)$$

$$Ma(i) = 0,4 \text{ ml} * 1,005 \frac{g}{ml} = 0,402 \text{ g}$$

- **Masa de agua presente en la muestra correspondiente a la densidad**

$$Mad(i) = \frac{\%W_i * Mnd(i)}{100\%} \quad (Ec.25)$$

$$Mad(i) = \frac{0,92\% * 4,08g}{100\%} = 0,037g$$

- **Masa de agua total en la prueba**

$$Mat = \Sigma Ma(i) + \Sigma Mad(i) \quad (Ec.26)$$

$$Mat = 17,356 \text{ g}$$

- **Masa de crudo producido para la muestra i**

$$M_{cp}(i) = M_{cat}(i) - M_a(i) \quad (\text{Ec.27})$$

$$M_{cp}(i) = 11,290 \text{ g} - 0,402 \text{ g} = 10,888 \text{ g}$$

- **Masa de crudo total de producido**

$$M_{cpt} = \Sigma M_{cp}(i) \quad (\text{Ec.28})$$

$$M_{cpt} = 100,303 \text{ g}$$

### 9- Porcentaje de recobro de crudo.

$$\%R_{ci} = \frac{M_{cp}(i) * \rho_c}{M_c * \rho_{cp}(i)} * 100\% \quad (\text{Ec.29})$$

Donde:

$\%R_{ci}$ : Porcentaje de recuperación volumétrico del corte i(%)

$\rho_c$ : Densidad del crudo en la celda (g/ml)

$\rho_{cp}(i)$ : Densidad de la muestra i (g/ml)

$$\%R_{ci} = \frac{10,888 \text{ g} *}{105,363 \text{ g} *} * 100\% = 10,22\%$$

### 10- Crudo recuperado

$$C_{rec} = M_{cp} + M_{rc} + M_{re} \quad (\text{Ec.30})$$

Donde:

$C_{rec}$ : Crudo recuperado (g)

$M_{rc}$ : Masa de crudo recuperado por combustión (g)

*Mre*: Masa de crudo recuperada por expansión (g)

$$Crec = 10,888 \text{ g} + 69,178 \text{ g} + 20,237 \text{ g} = 100,303 \text{ g}$$

### 11- Crudo quemado

$$Cq = Mc - (Crec + Cnr) \quad (\text{Ec.31})$$

Donde:

*Cq*: Masa de crudo quemado (g)

*Cnr*: Crudo no recuperado (g)

Para determinar el crudo no recuperado se toma en cuenta la diferencia de peso entre el dedal con crudo, arena, coque, y el dedal con arena y coque. El Proceso de impregnado se realiza con tolueno

$$Cq = 105,363 \text{ g} - (100,303 \text{ g} + (15,780 \text{ g} - 13,970 \text{ g})) = 3,25 \text{ g}$$

### 12- Masa de carbono consumida

Se procede a determinar los moles de carbono consumidos para el dióxido y monóxido de carbono.

$$n_{CO_2} = \frac{Plab * Vl_{CO_2}}{R * Tlab} \quad (\text{Ec.32})$$

$$n_{CO_2} = \frac{667 \text{ mmHg} * 13,921 \text{ l}}{760 \text{ mmHg} * 0,082 \frac{\text{l} * \text{atm}}{\text{K} * \text{mol}} * 294 \text{ K}}$$

$$n_{CO_2} = 0,507 \text{ mol}$$

$$n_{CO} = \frac{Plab * Vl_{CO}}{R * Tlab} \quad (\text{Ec.33})$$

$$n_{CO} = \frac{667 \text{ mmHg} * 2,375 \text{ l}}{760 \text{ mmHg} * 0,082 \frac{\text{l} * \text{atm}}{\text{K} * \text{mol}} * 294 \text{ K}}$$

$$n_{CO} = 0,086 \text{ mol}$$

$$n_{tot} = n_{CO_2} + n_{CO} = 0,507 \text{ mol} + 0,086 \text{ mol} = 0,593 \text{ mol}$$

$$C = n_{tot} * PM \quad (\text{Ec.34})$$

Donde:

C: Masa de carbono consumida (g)

PM: Peso molecular del carbono (g/mol)

$$C = 0,593 \text{ mol} * 12 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 7,119 \text{ g}$$

### 13- Moles de oxígeno consumido

$$n_{O_2} = \frac{(V_{airy} * YO_2 - V_{l_{O_2}}) * P_{lab}}{R * T_{lab}} \quad (\text{Ec.35})$$

Donde:

$n_{O_2}$ : Moles de oxígeno consumidos (mol)

$V_{airy}$ : Volumen de aire inyectado (l)

$YO_2$ : Fracción volumétrica del oxígeno (adim)

$$n_{O_2} = \frac{(130,840 \text{ l} * 0,21 - 1,029 \text{ l}) * 667 \text{ mmHg}}{760 \text{ mmHg} * 0,082 \frac{\text{l} * \text{atm}}{\text{K} * \text{mol}} * 294 \text{ K}} = 0,958 \text{ mol}$$

#### 14- Moles de oxígeno e hidrógeno para el agua

$$n_{O_2d} = n_{O_2} - n_{CO_2} - \frac{n_{CO}}{2} \quad (\text{Ec.36})$$

$$n_{O_2d} = 0,958 \text{ mol} - 0,507 \text{ mol} - \frac{0,086 \text{ mol}}{2} = 0,408 \text{ mol}$$

Por relación estequiométrica:

$$n_{H_2d} = 2 * n_{O_2d} \quad (\text{Ec.37})$$

$$n_{H_2d} = 2 * 0,408 \text{ mol} = 0,816 \text{ mol}$$

Donde:

$n_{O_2d}$ : Moles de oxígeno disponibles para el agua (mol)

$n_{H_2d}$ : Moles de hidrógeno disponible para el agua (mol)

#### 15- Parámetros estabilizados

Para determinar los parámetros estabilizados, es necesario determinar las concentraciones de dióxido, monóxido, nitrógeno y oxígeno. Para ello se establecen los tiempos de la prueba donde las concentraciones en el transcurso del tiempo sean similares de forma individual.

Para el dióxido de carbono, se tiene:

$$\bar{Y}CO_2 = \Sigma YCO_2(i) \quad (\text{Ec.38})$$

Donde:

$\bar{Y}CO_2$ : Concentración promedio del dióxido de carbono (%)

$YCO_2(i)$ : Concentración del dióxido de carbono estable en un instante de tiempo  $i$  (%)

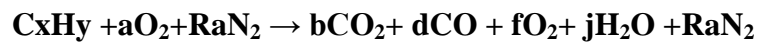
**Los instantes de tiempo pertenecen a los minutos 120, 140 ,160 y 180 de la prueba de combustión.**

$$\bar{Y}CO_2 = \frac{15,567\% + 15,547\% + 15,526\% + 15,536\%}{4} = 15,544\%$$

De igual forma se calcularon las concentraciones promedio de monóxido, nitrógeno y oxígeno.

$$\bar{Y}CO = 2,858\%; \quad \bar{Y}N_2 = 77,990\%; \quad \bar{Y}O_2 = 1,249\%$$

Se parte de la reacción general



Donde:

$$a = \bar{Y}O_2, \quad b = \bar{Y}CO_2, \quad d = \bar{Y}CO, \quad Ra = \bar{Y}N_2$$

a, b, d, Ra: representan las concentraciones en porcentaje de cada compuesto.

Luego se tiene la relación

$$R = \frac{\text{Fracción molar del } N_2}{\text{Fracción molar del } O_2} = \frac{79\%}{21\%} = 3,761$$



- **Relación atómica Hidrógeno/Carbono**

$$\frac{H}{C} = \frac{4 * \left( \frac{Ra}{R} - b - \frac{d}{2} - a \right)}{b + d} \quad (\text{Ec.39})$$

$$\frac{H}{C} = \frac{4 * \left( \frac{77,990\%}{3,761} - 15,544\% - \frac{2,858\%}{2} - 1,249\% \right)}{15,544\% + 2,858\%} = 0,663$$

- **Relación oxígeno/Combustible (OFR)**

$$OFR = \frac{379 * a}{12,011 * x + 1,008 * y} \quad (\text{Ec.40})$$

Donde:

x: Número de átomos de carbono.

y: Número de átomos de hidrógeno.

$$X = b + d \quad (\text{Ec.41})$$

$$X = 15,544\% + 2,858\% = 18,401\%$$

$$Y = 4 * \left( \frac{Ra}{R} - b - \frac{d}{2} - a \right) \quad (\text{Ec.42})$$

$$Y = 4 * \left( \frac{77,990\%}{3,761} - 15,544\% - \frac{2,858\%}{2} - 1,249\% \right)$$

$$Y = 12,208\%$$

$$OFR = \frac{379 * 1,249\%}{12,011 * 18,401\% + 1,008 * 12,208\%}$$

$$OFR = 34,556 \frac{PCN}{lb} * \frac{1m^3 * 2,20462lb}{35,314667PCN * 1kg}$$

$$OFR = 2,157 \frac{m^3 \text{oxígeno}}{kg \text{combustible}}$$

- **Relación Aire/Combustible (AFR)**

$$AFR = (1 + R) * OFR \quad (\text{Ec.43})$$

$$AFR = (1 + 3,761) * 2,157 \frac{m^3 \text{oxígeno}}{kg \text{combustible}}$$

$$AFR = 10,268 \frac{m^3 \text{aire estándar}}{kg \text{combustible}}$$

- **Oxígeno consumido (OC)**

$$OC = \frac{\left(\frac{Ra}{R} - a\right)}{\frac{Ra}{R}} \quad (\text{Ec.44})$$

$$OC = \frac{\left(\frac{77,990\%}{3,761} - 1,249\%\right)}{\frac{77,990\%}{3,761}} = 0,938$$

- **Exceso de aire (EA)**

$$EA = \frac{(1 - OC)}{OC} \quad (\text{Ec.45})$$

$$EA = \frac{(1 - 0,951)}{0,951} = 0,062$$

- **Flujo de aire (AF)**

$$AF = \frac{Tiny}{A} \quad (\text{Ec.46})$$

Donde:

*Tiny*: Tasa de inyección de aire (m<sup>3</sup> estándar/h)

A: Área de sección transversal (m<sup>2</sup>)

$$Tiny = \frac{\left(0,9 \frac{l}{min} * 667mmHg * 288K\right) * \left(\frac{60min}{1h} * \frac{1m^3}{l}\right)}{760mmHg * 296k}$$

$$Tiny = 0,046 \frac{m^3 \text{aire estándar}}{h}$$

$$AF = \frac{0,046 \frac{m^3}{h}}{\frac{\pi * (3,76cm)^2}{4}}$$

$$AF = 42,403 \frac{m^3 \text{aire estándar}}{h * m^2 \text{arena empacada}}$$

- **Requerimiento de aire (AR)**

$$AR = \frac{AF}{\bar{V}} \quad (\text{Ec.47})$$

$$AR = \frac{42,403 \frac{m^3 \text{ aire estandar}}{h * m^2 \text{ arena empacada}}}{13,6 \frac{cm}{h} * \frac{1m}{100cm}}$$

$$AR = 315,09 \frac{m^3 \text{ aire estándar}}{m^3 \text{ arena empacada}}$$

- **Requerimiento de combustible (FR)**

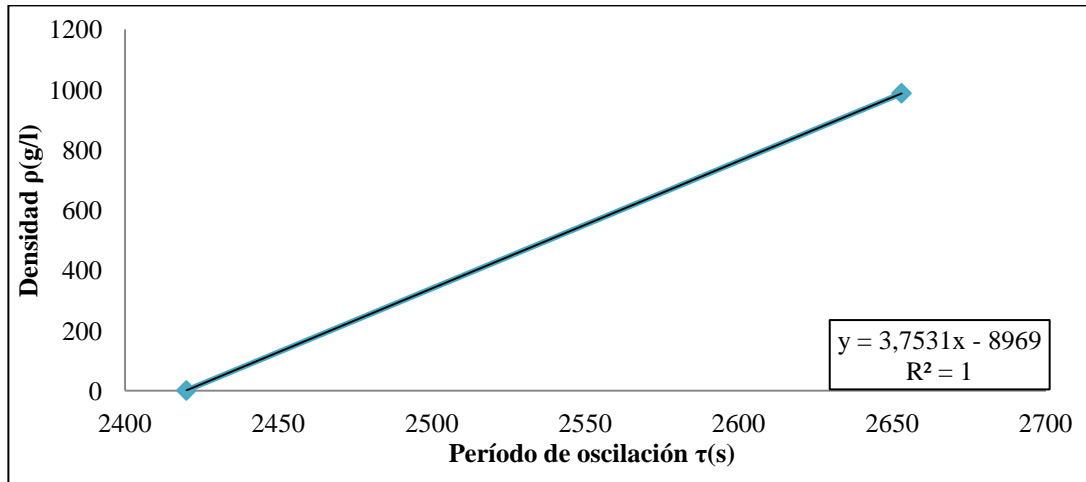
$$FR = \frac{AR}{AFR} \quad (\text{Ec.48})$$

$$FR = \frac{315,09 \frac{m^3 \text{ aire estándar}}{m^3 \text{ arena empacada}}}{10,268 \frac{m^3 \text{ aire estándar}}{kg \text{ combustible}}} = 20,658 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ arena empacada}}$$

## 16- Determinación de la densidad y gravedad API

**Nota:** La densidad y gravedad API corresponden a la prueba blanco, para el corte de flash 1.

Para determinar las densidades, fue necesario realizar una previa calibración con agua y aire al equipo, a continuación se muestra el gráfico:



**Figura N°51.** Curva de calibración del densímetro.

Se midió el tiempo de oscilación de cada corte, y luego con la ecuación obtenida por medio de la calibración se determinó la densidad.

- **Densidad**

$$\rho_i = 3,7531x - 8969 \quad (\text{Ec.49})$$

Donde:

$\rho_i$ : Densidad del corte (g/l)

X: Período de oscilación(s)

$$\rho = 3,7531 * 2660,13s - 8969 = 1014g/l = 1,014g/ml$$

- **Gravedad API**

$$API = \frac{141,5}{GE_i} - 131,5 \quad (\text{Ec.50})$$

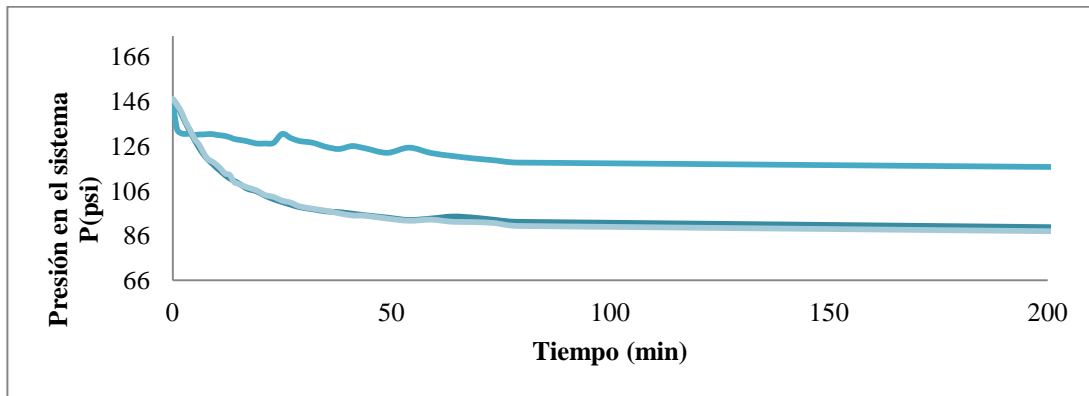
Donde:

$GE_i$ : Gravedad específica del corte i (adim)

$$API = \frac{141,5}{1,014} - 131,5 = 7,9^{\circ}API$$

*Nota:* Los cálculos referenciados son los correspondientes a la prueba blanco.

A continuación, se presenta los datos arrojados por la prueba duplicado para la isoterma de adsorción.



**Figura N°52.** Caída de presión en función del tiempo de reacción.