

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Introducción de la Ingeniería de Procesos Metalúrgicos y de Materiales
Profesor: Luis Enrique Jardón Pérez

Ejemplo de Balance Macroscópico de Materia
(Combustión de residuos)

Una planta utiliza gas natural para realizar la combustión de residuos del alcantarillado. La composición del gas natural es:

$$X_{C_2H_6} = 0.025 \quad X_{CO_2} = 0.035 \quad X_{N_2} = 0.027 \quad \text{Balance: } CH_4$$

Con la finalidad de asegurar la oxidación completa del lodo residual, la combustión se lleva a cabo con una gran cantidad de aire en exceso. Dada la composición de los residuos, las especies que se producen tras la reacción química son: CO_2 , H_2O , HCl y SO_2 , para lo cual, por la experiencia se debe tener al menos un 2.0 % de O_2 en los gases producto de la combustión.

La composición promedio de los residuos es:

$$W_C = 0.138 \quad W_H = 0.0195 \quad W_N = 0.0325 \quad W_O = 0.183 \quad W_{Cl} = 0.076 \quad W_S = 0.011 \\ W_{H_2O} = 0.175 \quad \text{Balance: } \text{Sólidos inertes}$$

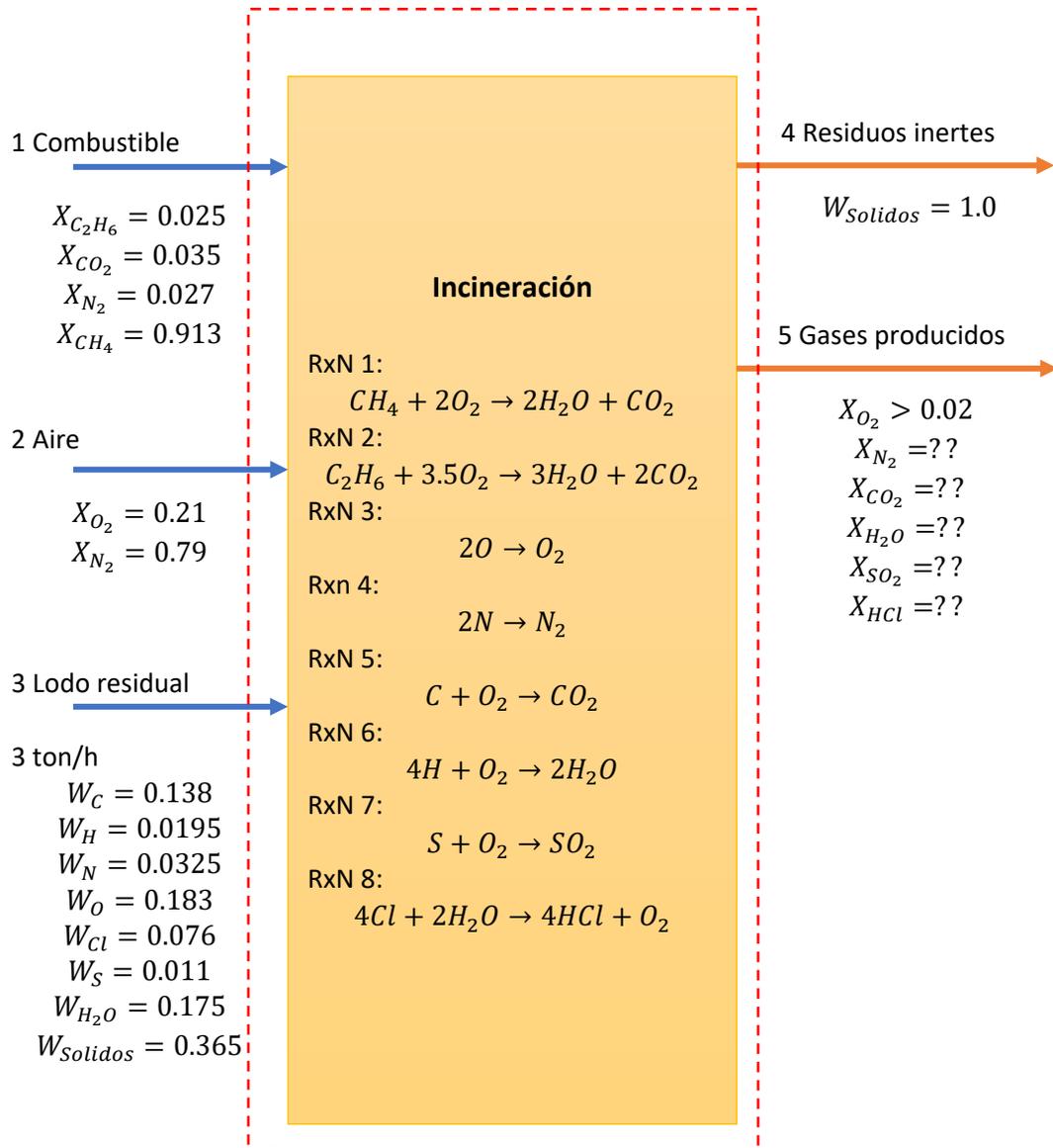
La planta tiene un contrato para incinerar 3 toneladas de este lodo residual por hora.

Considerando que se sabe que la mayoría de los quemadores emplean una relación de flujos molares aire:combustible de entre 8:1 y 13:1, aunque pueden ser mayores o menores dependiendo de las condiciones requeridas. Además de que se requiere de un alto flujo de combustible para asegurar la incineración completa de los residuos.

Se usará un balance macroscópico de materia para obtener gráficas de control que predigan el comportamiento del sistema, flujo de salida de gases y composición química de los mismos, bajo distintas relaciones de aire:combustible y distintos flujos de combustible.

Solución

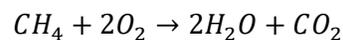
Primeramente, establezcamos el sistema a estudiar y calculemos lo datos que se pueden conocer del mismo:



Cálculo de los términos fuente y datos conocidos

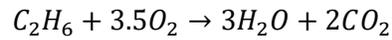
En este caso, se puede calcular bastante información con las reacciones químicas involucradas en el proceso, es decir los términos fuente de las reacciones:

RxN 1:



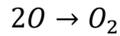
De momento no tenemos información para calcular los términos fuente.

RxN 2:



De momento no tenemos información para calcular los términos fuente.

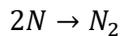
RxN 3:



$$G_{O,RxN 3} = -3000 \frac{kg LR}{h} \left(\frac{0.183 kg O}{1 kg LR} \right) \left(\frac{1 kg - mol O}{16 kg O} \right)$$
$$G_{O,RxN 3} = -34.313 kg - mol O$$

$$G_{O_2,RxN 3} = 34.313 kg - mol O \left(\frac{1 kg - mol O_2}{2 kg - mol O} \right)$$
$$G_{O_2,RxN 3} = 17.156 kg - mol O_2$$

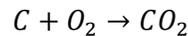
RxN 4:



$$G_{N,RxN 4} = -3000 \frac{kg LR}{h} \left(\frac{0.0325 kg N}{1 kg LR} \right) \left(\frac{1 kg - mol N}{16 kg N} \right)$$
$$G_{N,RxN 4} = -6.964 kg - mol N$$

$$G_{N_2,RxN 4} = 6.964 kg - mol N \left(\frac{1 kg - mol N_2}{2 kg - mol N} \right)$$
$$G_{N_2,RxN 4} = 3.482 kg - mol N_2$$

RxN 5:

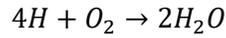


$$G_{C,RxN 5} = -3000 \frac{kg LR}{h} \left(\frac{0.138 kg C}{1 kg LR} \right) \left(\frac{1 kg - mol C}{12 kg C} \right)$$
$$G_{C,RxN 5} = -34.5 kg - mol C$$

$$G_{O_2,RxN 5} = -34.5 kg - mol C \left(\frac{1 kg - mol O_2}{1 kg - mol C} \right)$$
$$G_{O_2,RxN 5} = -34.5 kg - mol O_2$$

$$G_{CO_2,RxN 5} = 34.5 kg - mol C \left(\frac{1 kg - mol CO_2}{1 kg - mol C} \right)$$
$$G_{CO_2,RxN 5} = 34.5 kg - mol CO_2$$

RxN 6:

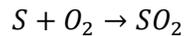


$$G_{H,RxN\ 6} = -3000 \frac{kg\ LR}{h} \left(\frac{0.0195\ kg\ H}{1\ kg\ LR} \right) \left(\frac{1\ kg - mol\ H}{1\ kg\ H} \right)$$
$$G_{H,RxN\ 6} = -58.5\ kg - mol\ H$$

$$G_{O_2,RxN\ 6} = -58.5\ kg - mol\ H \left(\frac{1\ kg - mol\ O_2}{4\ kg - mol\ H} \right)$$
$$G_{O_2,RxN\ 6} = -14.625\ kg - mol\ O_2$$

$$G_{H_2O,RxN\ 6} = 58.5\ kg - mol\ H \left(\frac{2\ kg - mol\ H_2O}{4\ kg - mol\ H} \right)$$
$$G_{H_2O,RxN\ 6} = 29.25\ kg - mol\ H_2O$$

RxN 7:

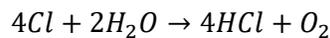


$$G_{S,RxN\ 7} = -3000 \frac{kg\ LR}{h} \left(\frac{0.011\ kg\ S}{1\ kg\ LR} \right) \left(\frac{1\ kg - mol\ S}{32\ kg\ S} \right)$$
$$G_{S,RxN\ 7} = -1.031\ kg - mol\ S$$

$$G_{O_2,RxN\ 7} = -1.031\ kg - mol\ S \left(\frac{1\ kg - mol\ O_2}{1\ kg - mol\ S} \right)$$
$$G_{O_2,RxN\ 7} = -1.031\ kg - mol\ O_2$$

$$G_{SO_2,RxN\ 7} = 1.031\ kg - mol\ S \left(\frac{1\ kg - mol\ SO_2}{1\ kg - mol\ S} \right)$$
$$G_{SO_2,RxN\ 7} = 1.031\ kg - mol\ SO_2$$

RxN 8:



$$G_{Cl,RxN\ 8} = -3000 \frac{kg\ LR}{h} \left(\frac{0.076\ kg\ Cl}{1\ kg\ LR} \right) \left(\frac{1\ kg - mol\ Cl}{35.45\ kg\ Cl} \right)$$
$$G_{Cl,RxN\ 8} = -6.432\ kg - mol\ Cl$$

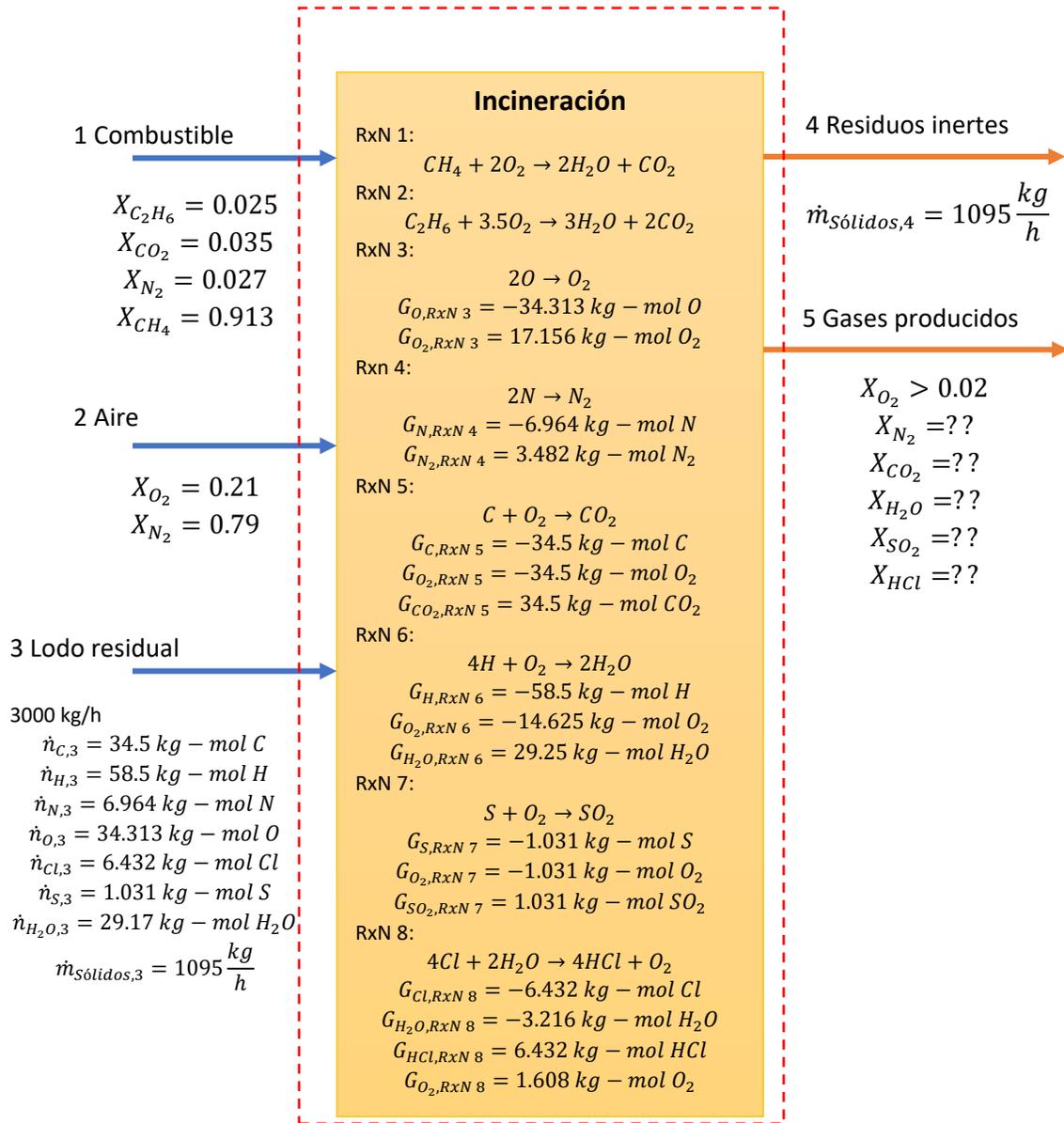
$$G_{H_2O,RxN\ 8} = -6.432\ kg - mol\ Cl \left(\frac{2\ kg - mol\ H_2O}{4\ kg - mol\ Cl} \right)$$
$$G_{H_2O,RxN\ 8} = -3.216\ kg - mol\ H_2O$$

$$G_{HCl,RxN\ 8} = 6.432\ kg - mol\ Cl \left(\frac{4\ kg - mol\ HCl}{4\ kg - mol\ Cl} \right)$$
$$G_{HCl,RxN\ 8} = 6.432\ kg - mol\ HCl$$

$$G_{O_2, RxN 8} = 6.432 \text{ kg} - \text{mol Cl} \left(\frac{1 \text{ kg} - \text{mol O}_2}{4 \text{ kg} - \text{mol Cl}} \right)$$

$$G_{O_2, RxN 8} = 1.608 \text{ kg} - \text{mol O}_2$$

Datos que podemos colocar en nuestro esquema del proceso:



De los datos conocidos también podemos saber que:

$$\dot{m}_{sólidos,3} = 0.365 \left(3000 \frac{\text{kg LR}}{\text{h}} \right) = 1095 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

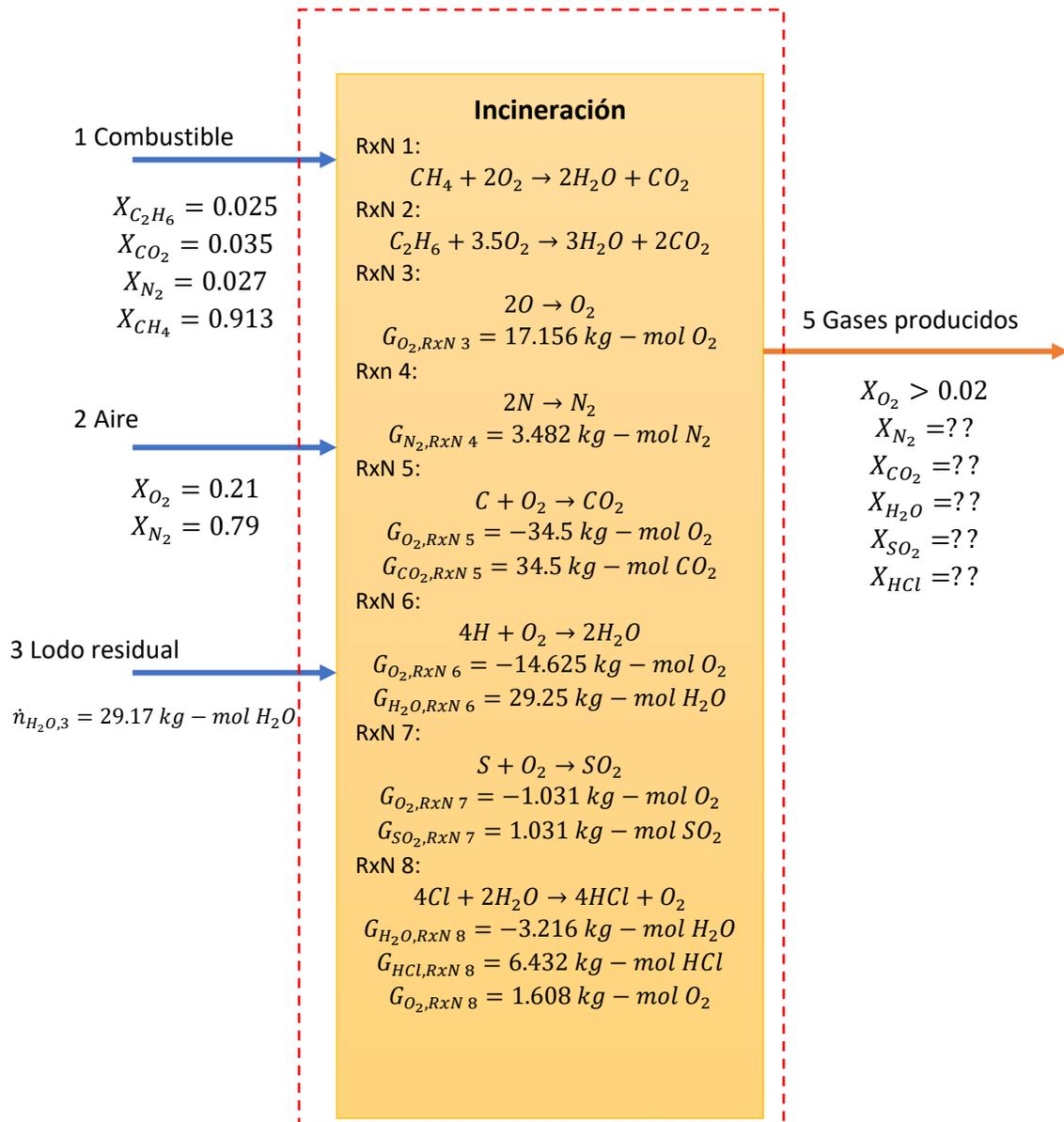
$$\dot{m}_{H_2O,3} = 0.175 \left(3000 \frac{\text{kg LR}}{\text{h}} \right) = 525 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{n}_{H_2O,3} = 0.175 \left(3000 \frac{kg LR}{h} \right) \left(\frac{1 kg - mol H_2O}{18 kg H_2O} \right) = 29.17 \frac{kg - mol H_2O}{h}$$

$$\dot{m}_{sólidos,4} = \dot{m}_{sólidos,3} = 1095 \frac{kg}{h}$$

Podemos simplificar un poco más los datos a considerar en las ecuaciones de balance, ya que tenemos una gran cantidad de ecuaciones con solo dos términos, ya que el flujo entrante es igual al consumo del término fuente correspondiente, es decir:

$$E + G = 0$$



Ecuaciones de balance

N₂:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{N_2,1} + \dot{n}_{N_2,2} - \dot{n}_{N_2,5} + G_{N_2,RxN 4} &= 0 \\ X_{N_2,1}\dot{n}_1 + X_{N_2,2}\dot{n}_2 - X_{N_2,5}\dot{n}_5 + G_{N_2,RxN 4} &= 0 \\ 0.027\dot{n}_1 + 0.79\dot{n}_2 - X_{N_2,5}\dot{n}_5 + 3.482 &= 0 \\ X_{N_2,5}\dot{n}_5 &= 0.027\dot{n}_1 + 0.79\dot{n}_2 + 3.482\end{aligned}$$

CO₂:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{CO_2,1} - \dot{n}_{CO_2,5} + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + G_{CO_2,RxN 5} &= 0 \\ X_{CO_2,1}\dot{n}_1 - X_{CO_2,5}\dot{n}_5 + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + G_{CO_2,RxN 5} &= 0 \\ 0.035\dot{n}_1 - X_{CO_2,5}\dot{n}_5 + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + 34.5 &= 0 \\ X_{CO_2,5}\dot{n}_5 &= 0.035\dot{n}_1 + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + 34.5\end{aligned}$$

CH₄:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{CH_4,1} + G_{CH_4,RxN 1} &= 0 \\ X_{CH_4,1}\dot{n}_1 + G_{CH_4,RxN 1} &= 0 \\ 0.913\dot{n}_1 + G_{CH_4,RxN 1} &= 0 \\ 0.913\dot{n}_1 &= -G_{CH_4,RxN 1}\end{aligned}$$

C₂H₆:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{C_2H_6,1} + G_{C_2H_6,RxN 2} &= 0 \\ X_{C_2H_6,1}\dot{n}_1 + G_{C_2H_6,RxN 2} &= 0 \\ 0.025\dot{n}_1 + G_{C_2H_6,RxN 2} &= 0 \\ 0.025\dot{n}_1 &= -G_{C_2H_6,RxN 2}\end{aligned}$$

H₂O:

$$\begin{aligned}\dot{n}_{H_2O,3} - \dot{n}_{H_2O,5} + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2} + G_{H_2O,RxN 6} + G_{H_2O,RxN 8} &= 0 \\ \dot{n}_{H_2O,3} - X_{H_2O,5}\dot{n}_5 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2} + G_{H_2O,RxN 6} + G_{H_2O,RxN 8} &= 0 \\ 29.17 - X_{H_2O,5}\dot{n}_5 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2} + 29.25 + (-3.216) &= 0 \\ X_{H_2O,5}\dot{n}_5 &= 29.17 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2} + 29.25 + (-3.216) \\ X_{H_2O,5}\dot{n}_5 &= 55.204 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2}\end{aligned}$$

SO₂:

$$\begin{aligned}-\dot{n}_{SO_2,5} + G_{SO_2,RxN 7} &= 0 \\ \dot{n}_{SO_2,5} &= G_{SO_2,RxN 7} \\ \dot{n}_{SO_2,5} &= 1.031\end{aligned}$$

HCl:

$$\begin{aligned}-\dot{n}_{HCl,5} + G_{HCl,RxN 8} &= 0 \\ \dot{n}_{HCl,5} &= G_{HCl,RxN 8} \\ \dot{n}_{HCl,5} &= 6.432\end{aligned}$$

O₂:

$$\dot{n}_{O_2,2} - \dot{n}_{O_2,5} + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} + G_{O_2,RxN 3} + G_{O_2,RxN 5} + G_{O_2,RxN 6} + G_{O_2,RxN 7} + G_{O_2,RxN 8} = 0$$

$$X_{O_2,2}\dot{n}_2 - X_{O_2,5}\dot{n}_5 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} + G_{O_2,RxN 3} + G_{O_2,RxN 5} + G_{O_2,RxN 6} + G_{O_2,RxN 7} + G_{O_2,RxN 8} = 0$$

$$0.21\dot{n}_2 - X_{O_2,5}\dot{n}_5 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} + 17.156 + (-34.5) + (-14.625) + (-1.031) + 1.608 = 0$$

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} + 17.156 + (-34.5) + (-14.625) + (-1.031) + 1.608$$

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} - 31.392$$

Nótese que si bien sabemos que $X_{O_2,5} > 0.02$ no conocemos el valor exacto, por lo que de momento no se sustituirá el valor en la ecuación.

Con lo que el conjunto de ecuaciones que poseemos es:

$$X_{N_2,5}\dot{n}_5 = 0.027\dot{n}_1 + 0.79\dot{n}_2 + 3.482$$

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.035\dot{n}_1 + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + 34.5$$

$$0.913\dot{n}_1 = -G_{CH_4,RxN 1}$$

$$0.025\dot{n}_1 = -G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2}$$

$$\dot{n}_{SO_2,5} = 1.031$$

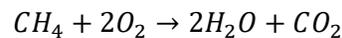
$$\dot{n}_{HCl,5} = 6.432$$

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} - 31.392$$

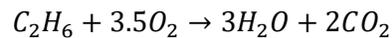
Y aunque en principio pareciera que tenemos una cantidad muy elevada de incógnitas en el sistema de ecuaciones, hay que considerar que los términos fuente de una reacción están relacionados entre sí.

En este caso, eso nos permite relacionar los términos fuente de las reacciones de combustión:

RxN 1:



RxN 2:



Si bien, en las dos primeras reacciones no pudimos calcular los términos fuente, ya que no poseemos información para ello, si sabemos que el reactivo limitante en ambos casos es el combustible, ya que al final del proceso tenemos oxígeno remanente, por lo tanto, podemos relacionar los términos fuente del CH₄ y el C₂H₆ con el del resto de reactivos y productos, recordando que al ser reactivos ambos combustibles, sus términos fuente son negativos.

Es por ello que:

$$G_{O_2,RxN 1} = G_{CH_4,RxN 1} \left(\frac{2 \text{ mol } O_2}{1 \text{ mol } CH_4} \right)$$

$$G_{O_2,RxN 1} = 2G_{CH_4,RxN 1}$$

$$G_{CO_2,RxN 1} = -G_{CH_4,RxN 1} \left(\frac{1 \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol } CH_4} \right)$$

$$G_{CO_2,RxN 1} = -G_{CH_4,RxN 1}$$

$$G_{H_2O,RxN 1} = -G_{CH_4,RxN 1} \left(\frac{2 \text{ mol } H_2O}{1 \text{ mol } CH_4} \right)$$

$$G_{H_2O,RxN 1} = -2G_{CH_4,RxN 1}$$

De la misma manera:

$$G_{O_2,RxN 2} = 3.5G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$G_{CO_2,RxN 2} = -2G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$G_{H_2O,RxN 2} = -3G_{C_2H_6,RxN 2}$$

Al final, tenemos el conjunto de ecuaciones de balance:

$$X_{N_2,5}\dot{n}_5 = 0.027\dot{n}_1 + 0.79\dot{n}_2 + 3.482$$

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.035\dot{n}_1 + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + 34.5$$

$$0.913\dot{n}_1 = -G_{CH_4,RxN 1}$$

$$0.025\dot{n}_1 = -G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2}$$

$$\dot{n}_{SO_2,5} = 1.031$$

$$\dot{n}_{HCl,5} = 6.432$$

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} - 31.392$$

Y las relaciones estequiométricas entre los términos fuente de las primeras dos reacciones:

$$G_{O_2,RxN 1} = 2G_{CH_4,RxN 1}$$

$$G_{CO_2,RxN 1} = -G_{CH_4,RxN 1}$$

$$G_{H_2O,RxN 1} = -2G_{CH_4,RxN 1}$$

$$G_{O_2,RxN 2} = 3.5G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$G_{CO_2,RxN 2} = -2G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$G_{H_2O,RxN 2} = -3G_{C_2H_6,RxN 2}$$

Juntando ambas, podemos simplificar nuestras ecuaciones de balance, por ejemplo, tomando como base la ecuación de balance del oxígeno:

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + G_{O_2,RxN 1} + G_{O_2,RxN 2} - 31.392$$

Comenzamos por reemplazar los términos fuente de oxígeno por los del reactivo limitante, es decir, los hidrocarburos:

$$G_{O_2,RxN 1} = 2G_{CH_4,RxN 1}$$

$$G_{O_2,RxN 2} = 3.5G_{C_2H_6,RxN 2}$$

Quedando:

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + 2G_{CH_4,RxN 1} + 3.5G_{C_2H_6,RxN 2} - 31.392$$

Y sabiendo a partir de nuestras ecuaciones que los términos fuente de ambos hidrocarburos dependen únicamente del flujo de entrada de combustible (ya que la combustión es completa):

$$-0.913\dot{n}_1 = G_{CH_4,RxN 1}$$

$$-0.025\dot{n}_1 = G_{C_2H_6,RxN 2}$$

Podemos llegar a la siguiente expresión:

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 + 2(-0.913\dot{n}_1) + 3.5(-0.025\dot{n}_1) - 31.392$$

Para finalmente llegar a:

$$X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 - 1.9135\dot{n}_1 - 31.392$$

De la misma manera, podemos hacer este proceso para la ecuación de CO₂:

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.035\dot{n}_1 + G_{CO_2,RxN 1} + G_{CO_2,RxN 2} + 34.5$$

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.035\dot{n}_1 - G_{CH_4,RxN 1} - 2G_{C_2H_6,RxN 2} + 34.5$$

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.035\dot{n}_1 - (-0.913\dot{n}_1) - 2(-0.025\dot{n}_1) + 34.5$$

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.035\dot{n}_1 + 0.913\dot{n}_1 + 0.050\dot{n}_1 + 34.5$$

$$X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.998\dot{n}_1 + 34.5$$

Finalmente, para H₂O:

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 + G_{H_2O,RxN 1} + G_{H_2O,RxN 2}$$

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 - 2G_{CH_4,RxN 1} - 3G_{C_2H_6,RxN 2}$$

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 - 2(-0.913\dot{n}_1) - 3(-0.025\dot{n}_1)$$

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 + 1.826\dot{n}_1 + 0.075\dot{n}_1$$

$$X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 + 1.901\dot{n}_1$$

Con lo que el conjunto de ecuaciones a resolver es:

$$\dot{n}_{N_2,5} = X_{N_2,5}\dot{n}_5 = 0.027\dot{n}_1 + 0.79\dot{n}_2 + 3.482$$

$$\dot{n}_{CO_2,5} = X_{CO_2,5}\dot{n}_5 = 0.998\dot{n}_1 + 34.5$$

$$\dot{n}_{H_2O,5} = X_{H_2O,5}\dot{n}_5 = 55.204 + 1.901\dot{n}_1$$

$$\dot{n}_{SO_2,5} = X_{SO_2,5}\dot{n}_5 = 1.031$$

$$\dot{n}_{HCl,5} = X_{HCl,5}\dot{n}_5 = 6.432$$

$$\dot{n}_{O_2,5} = X_{O_2,5}\dot{n}_5 = 0.21\dot{n}_2 - 1.9135\dot{n}_1 - 31.392$$

$$X_{N_2,5} + X_{CO_2,5} + X_{H_2O,5} + X_{SO_2,5} + X_{HCl,5} + X_{O_2,5} = 1$$

¿Qué incógnitas tengo?

$$\dot{n}_1, \dot{n}_2, \dot{n}_5, X_{N_2,5}, X_{CO_2,5}, X_{H_2O,5}, X_{SO_2,5}, X_{HCl,5}$$

En total son 8 incógnitas (recuerde que una de las composiciones, en este caso $X_{O_2,5}$, es dependiente del resto), y dado que solo poseo 6 ecuaciones independientes, esto implica que tengo dos grados de libertad. Para solventar esto, puedo realizar una medición para obtener dos datos adicionales,

puedo hacer uso de conocimientos históricos del proceso o puedo investigar más para saber si poseo una relación especial dentro del mismo.

En este caso, podríamos usar una relación histórica que se conoce en la operación de los quemadores y es que la relación aire:combustible varía entre 8:1 a 13:1 en la mayoría de los casos, o bien podríamos considerar una base de cálculo en el flujo de entrada de combustible, para después escalar el problema dependiendo de las condiciones reales.

Para poder resolver el balance, vamos a realizar un estudio del efecto de variables de operación sobre los resultados del balance. Obteniendo de esta manera graficas de control para la composición y el flujo total de los gases a la salida del proceso en función del flujo de combustible inyectado y de la relación combustible/aire.

Dadas las características del proceso, al querer asegurar la incineración completa de la basura, lo que a su vez implica una combustión completa del combustible, vamos a variar la relación aire:combustible entre 11:1 y 15:1, es decir:

$$\dot{n}_2 = 11\dot{n}_1$$

$$\dot{n}_2 = 12\dot{n}_1$$

$$\dot{n}_2 = 13\dot{n}_1$$

$$\dot{n}_2 = 14\dot{n}_1$$

$$\dot{n}_2 = 15\dot{n}_1$$

Y vamos a variar el flujo de 1 (\dot{n}_1), entre 100 y 200 kg-mol/h. Note que este valor de flujo entra dentro del orden de magnitud de lo que se ha calculado a partir de los datos conocidos, es decir, su selección no es arbitraria.

Dado que \dot{n}_1 y \dot{n}_2 quedan definidos por las consideraciones anteriores, se realizarán gráficas de control para \dot{n}_5 , $X_{N_2,5}$, $X_{CO_2,5}$, $X_{H_2O,5}$, $X_{SO_2,5}$, $X_{HCl,5}$ y $X_{O_2,5}$ en función del flujo de entrada de combustible y la relación aire:combustible, las cuales se presentan a continuación.

Finalmente, como un último apunte, nótese que en la Figura que presenta la gráfica de fracción molar de O_2 a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible, la relación 11:1 da valores por debajo de 0.02, que es el límite de operación normal establecido. Por ello, podemos decir que el sistema únicamente opera adecuadamente con relaciones iguales o superiores a 12:1, dentro del límite de 100 a 200 kg-mol/h de combustible establecido.

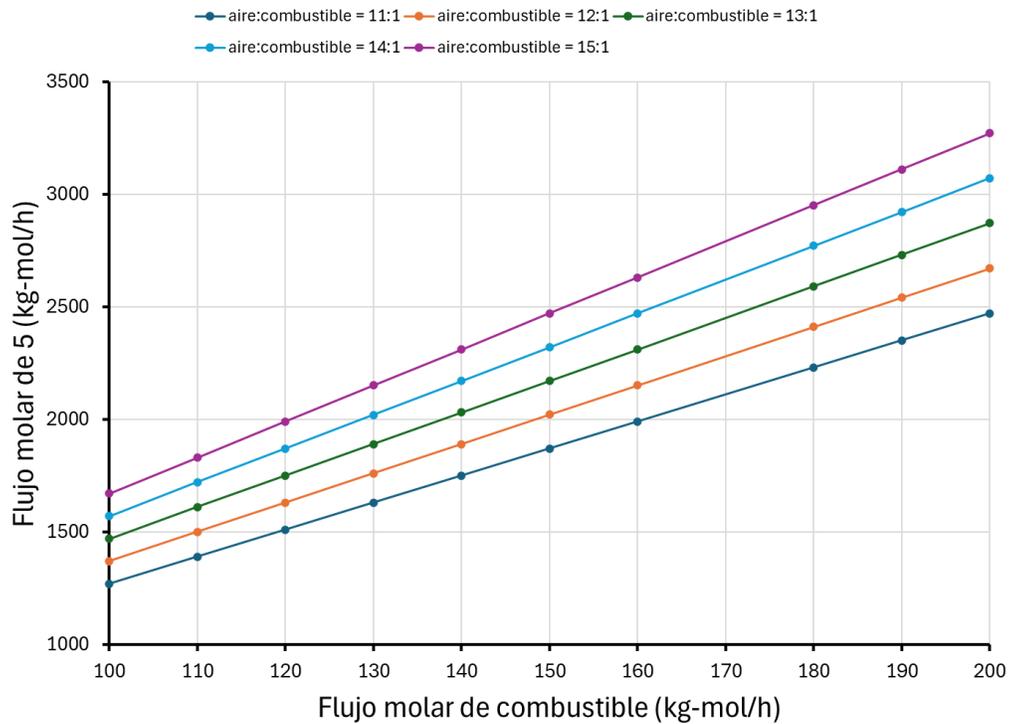


Figura.- Flujo molar de gases a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.

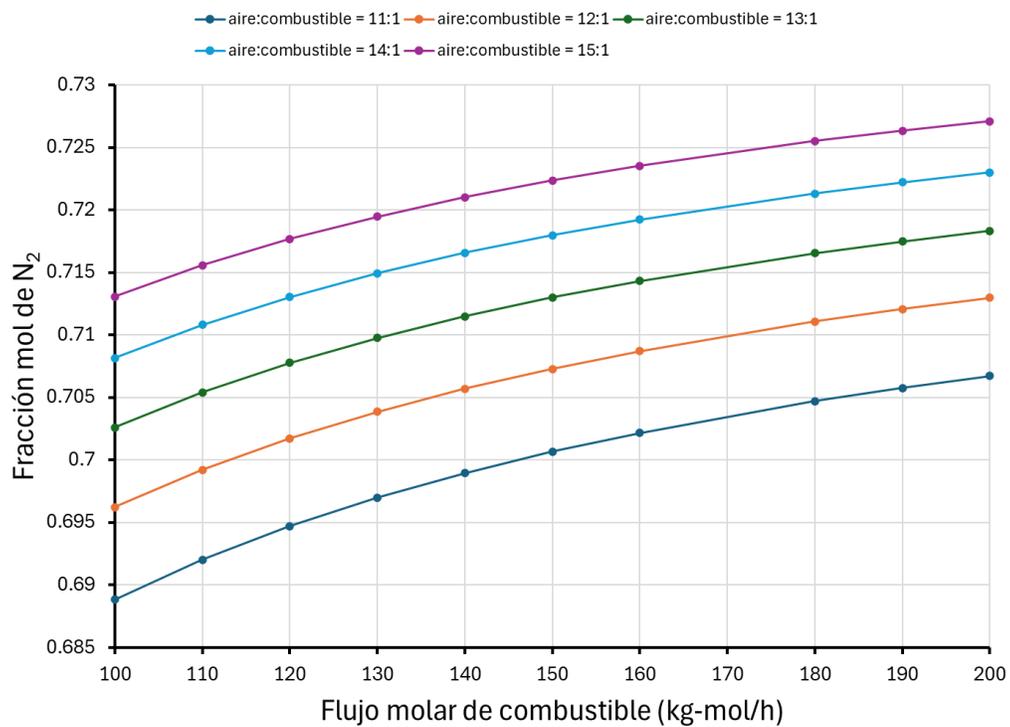


Figura.- Fracción molar de N₂ a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.

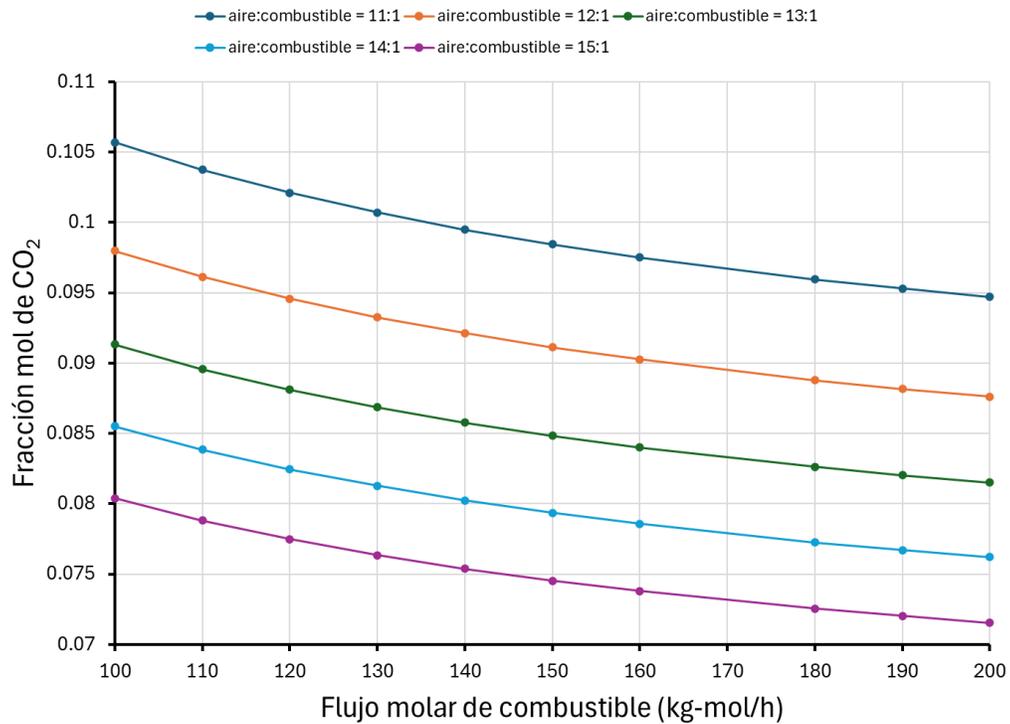


Figura.- Fracción molar de CO₂ a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.

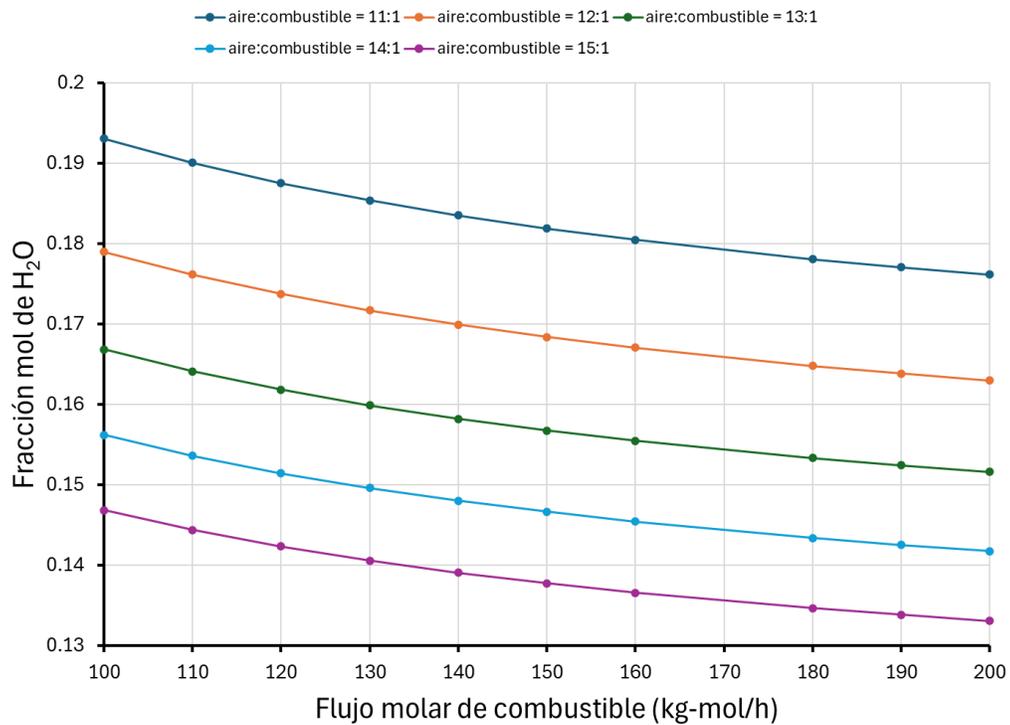


Figura.- Fracción molar de H₂O a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.

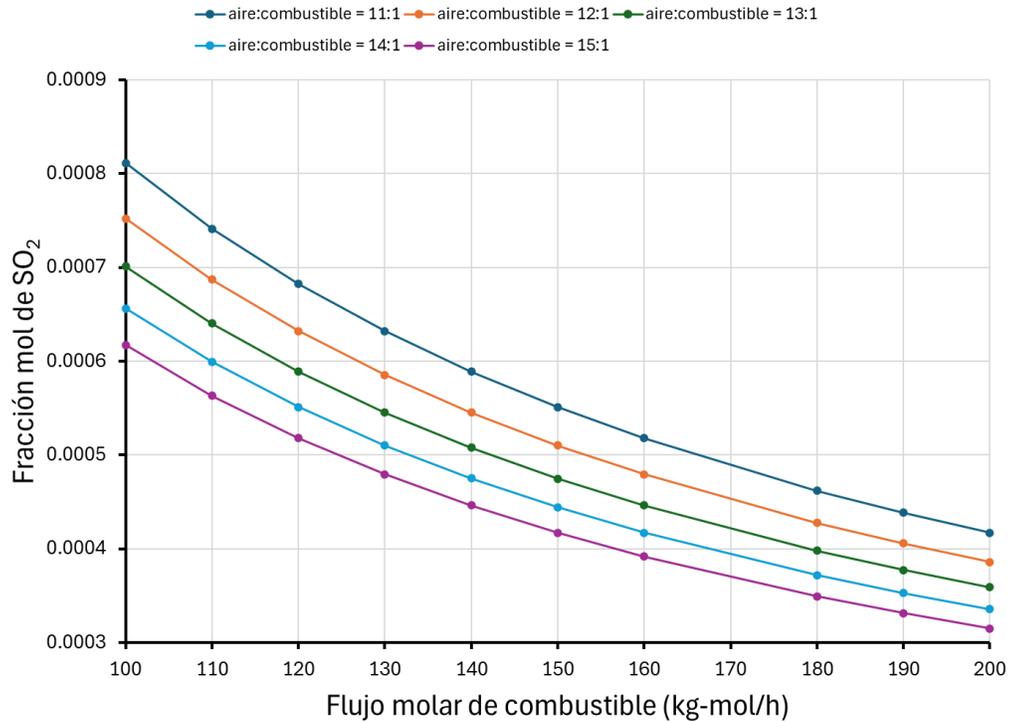


Figura.- Fracción molar de SO₂ a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.

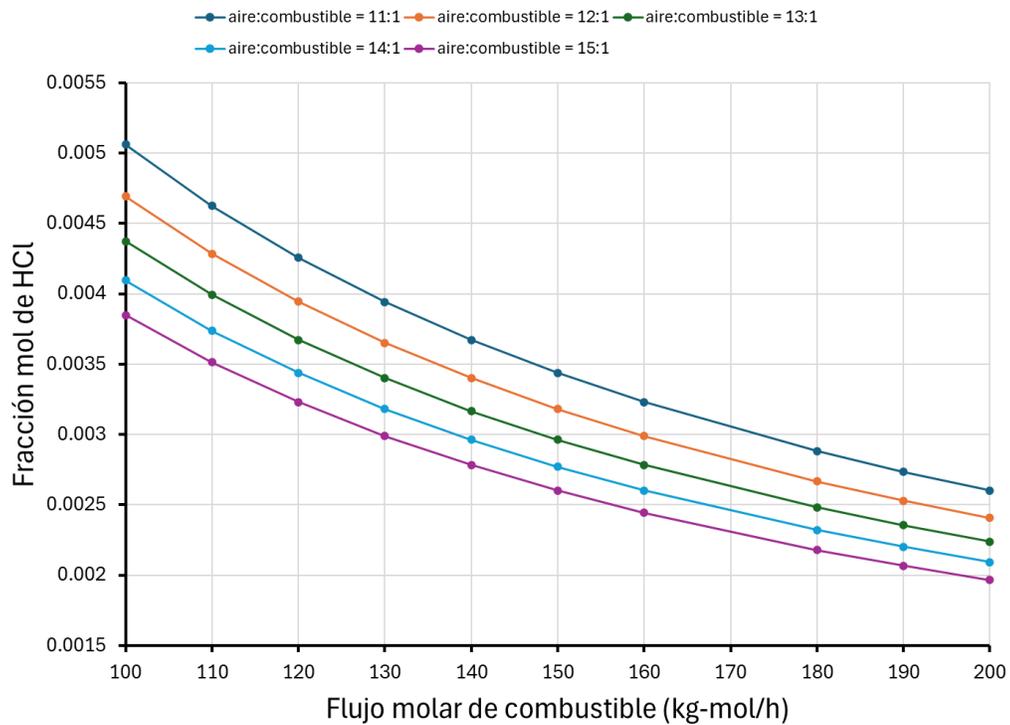


Figura.- Fracción molar de HCl a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.

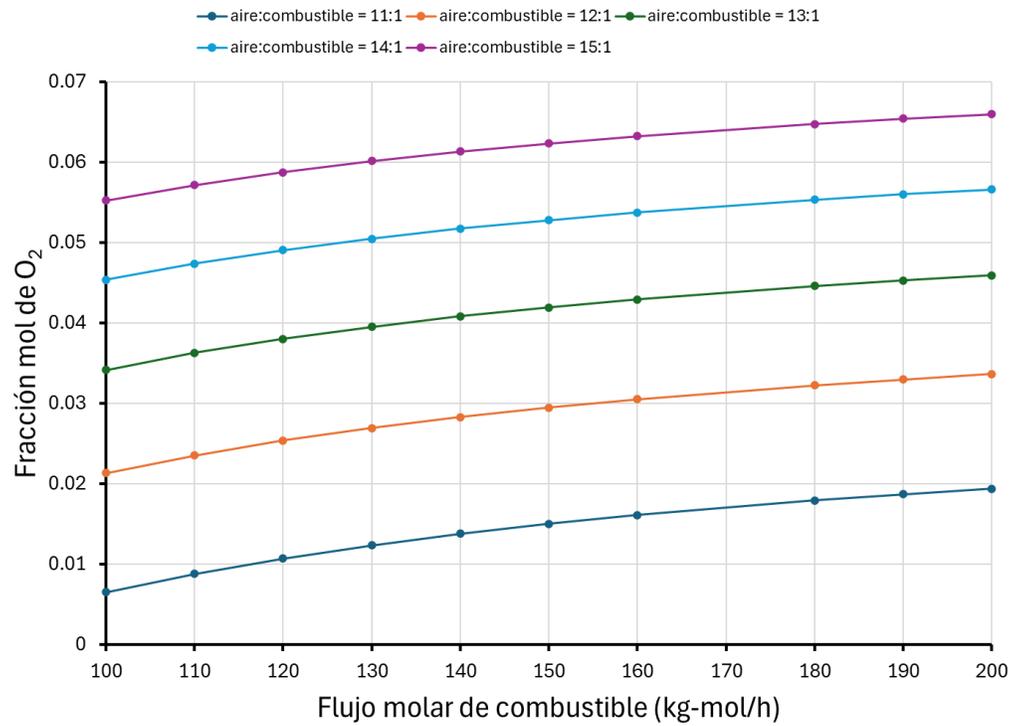


Figura.- Fracción molar de O_2 a la salida del proceso en función del flujo molar de combustible para distintas relaciones aire:combustible.