



Vinculación y Aplicación de las Matemáticas para Dar Solución a un Balance Energético en una Caldera Piro-tubular

Alatorre Alba Alexis Gustavo ^a, I.P. Hernández Rosales ^{ab*}.

^aÁrea de Ciencias Básicas e Ingenierías. Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura Amado Nervo S/N, Col. Los Frenos, 63155 Tepic, Nayarit.

^bAcademia de Energía del programa académico de Ingeniería Química. Universidad Autónoma de Nayarit. Ciudad de la Cultura Amado Nervo S/N, Col. Los Frenos, 63155 Tepic, Nayarit.

*E-mail: paz.rosales@gmail.com

Recibido 19 de enero de 2015, Aceptado 25 de enero 2015

Resumen

En el Área de Ciencias Básicas e Ingenierías de la Universidad Autónoma de Nayarit, se encuentra ubicada una caldera piro-tubular que abastece de vapor saturado al laboratorio de Ingeniería Química; de acuerdo a la experiencia que se tiene en la operación de dicha caldera, se pueden conocer algunos datos para hacer su balance de energía durante el proceso de combustión, sin embargo, otros será necesario obtenerlos de tablas termodinámicas o en su caso calcularlos. Los datos necesarios son: flujo de gases de combustión y de agua (líquido-vapor saturado), presión de operación, entalpías y temperaturas de entrada y salida en ambos flujos, así como el calor liberado del equipo. El objetivo específico de este trabajo es calcular la temperatura de entrada a la zona del calderín del flujo de los gases de combustión; para ello se sabe que la temperatura de salida en la chimenea es de 350°C y las entalpías del flujo de agua a la entrada (agua líquida) y de salida (vapor saturado) es de 104.85 kJ/kg y de 2737.17 kJ/kg respectivamente. Como este problema no requiere balances de materia (lo que entra es igual a lo que sale), se procede en forma directa y haciendo el balance de energía: $\Delta H=0$. Es decir, la sumatoria de las entalpías de entrada sustraídas a la sumatoria de las entalpías de salida da como resultado cero. Entonces nuestro problema se reduce a conocer todas las entalpías de cada uno de los compuestos que participan en nuestro balance energético. Los gases de combustión se componen de: dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂), oxígeno (O₂), nitrógeno (N₂), vapor de agua (H₂O) y carbono (C) y sus entalpías están definidas por la fórmula $H = \int_T^{350} C_p dT$, por lo que se hace necesaria la consulta de las constantes para calcular las capacidades caloríficas de cada compuesto. Se utilizó el programa Matlab © para generar un polinomio con la suma de todas las entalpías en que la variable independiente como se observa antes es T , arrojándonos un polinomio de cuarto grado que igualado a cero nos muestra la ecuación de nuestro balance energético. Para resolver esta ecuación, se generó una hoja de cálculo con el programa Excel para encontrar valores de T que aproximen el valor de la ecuación a cero. El dato obtenido fue 1624.6°C, que corresponde a la temperatura de entrada de los gases de combustión, conociendo de esta manera ya todos los parámetros para el balance energético de la caldera.

Palabras Clave: Balance energético, flujo de gases, modelo matemático

1. Introducción

En el Área de Ciencias Básicas e Ingenierías se cuenta con una caldera de tubos de humo, la cual produce vapor saturado que es utilizado en los diferentes equipos que operan en el laboratorio de Ingeniería Química. De acuerdo a reportes orales de algunos docentes de esta Unidad Académica, esta caldera fue instalada en la década de los años 70's, sufriendo modificaciones en tiempos posteriores, documentamos una 1982, año en el cual se levantó un plano de todo el equipo.

Algunas especificaciones importantes de esta caldera son:

- El combustible que se usa es diesel mexicano (C₂₁H_{44.5}).
- No se cuenta con precalentador de aire.
- El vapor de agua que se produce es vapor saturado, no se cuenta con recalentador.

- El exterior de la caldera está construido de acero inoxidable.
- Las paredes del hogar son de fibra de vidrio.
- El agua de alimentación pasa antes por un equipo de desionización.
- El modelo original es mexicano, de la marca Selmec.
- Es una caldera de tipo horizontal.
- Son 20 tubos por donde fluyen los gases de combustión.

Se consultó un plano realizado en 1982, año en que se reportan modificaciones, para reconstruir un dibujo de la caldera.

La temperatura del agua de alimentación corresponde a la temperatura ambiente que se registra como 25°C, también se conoce por medición directa la temperatura de los gases de combustión que salen por la chimenea, 350°C. Otros datos que conocemos son:

- La potencia máxima son 20 CV.



- La combustión del diesel es del 95%.
- La potencia de la bomba del quemador es de ½ HP
- La potencia de la bomba de agua de alimentación es de 1 HP.
- El volumen del calderín es de 0.825143 m³, (de acuerdo a las medidas en el plano proporcionado).
- La presión a la que trabaja la caldera es de 4 kg/cm²

De acuerdo a todos estos datos, podemos obtener más información para nuestro diagrama:

- El flujo que otorga una bomba de 1 HP reportado en la mayoría de la bibliografía consultada es de 130 kg/min. Como dentro de la caldera no se registra reacción química alguna, y no hay acumulación, lo que entra es lo mismo que lo que sales, por lo tanto, suponemos: m₃=m₄=130 kg/min.
- En la corriente 3 tenemos agua líquida comprimida a 25°C, con estos datos consultamos tablas termodinámicas para conocer H₃=104.85 kJ/kg.
- En la corriente 4 tenemos vapor de agua saturado y una presión de 4 kg/cm² (392.266 kPa), con estos datos consultamos tablas termodinámicas para conocer la H₄=2737.17 kJ/kg y T₄=142.91°C.

2. Parte Experimental

Resulta indispensable elaborar una tabla de entalpías:

Sustancia	H _{entrada}	H _{salida}
CO ₂	H ₁	0 kJ/kg
CO	H ₂	0 kJ/kg
SO ₂	H ₃	0 kJ/kg
NO	H ₄	0 kJ/kg
NO ₂	H ₅	0 kJ/kg
O ₂	H ₆	0 kJ/kg
N ₂	H ₇	0 kJ/kg
H ₂ O	H ₈	0 kJ/kg
C	H ₉	0 kJ/kg
H ₂ O	H ₁₀ = 104.85 kJ/kg	H ₁₁ = 2737.17 kJ/kg

La estrategia que (Felder & Rousseau, 2012) proponen para resolver este tipo de problemas consiste en calcular desde H₁(T) hasta H₉(T) integrando las fórmulas de capacidad calorífica de las tablas que se encuentran en diferente bibliografía, desde la temperatura de referencia (350°C) hasta la T desconocida en la entrada de los gases de combustión,

consultar H₁₀ y H₁₁ en las tablas de vapor, sustituir de H₁ a H₁₁ en el balance de energía y despejar T de la ecuación resultante empleando una hoja de cálculo.

Se consideran los siguientes puntos en la tabla de entalpía:

- La temperatura de salida del gas y 1 atm se eligen como estados de referencia para los gases de combustión en la chimenea. Se supone un comportamiento de gas ideal, de modo que las desviaciones de la presión con respecto a 1 atm no tienen efecto sobre las entalpías y, en consecuencia, se establecen las entalpías de salida de las especies gaseosas en cero.
- Las entalpías del agua de alimentación y del vapor producido se buscan en tablas de vapor. Considerando esto, se elige el estado de referencia para las tablas de vapor (agua líquida en el punto triple) como referencia para el agua.
- Se integran las fórmulas de capacidad calorífica de la tabla B.2 (Felder & Rousseau, 2012) para cada uno de los compuestos presentes en los gases de combustión de entrada.

Las entalpías específicas son:

$$H_1 = \int_T^{350^\circ\text{C}} (C_p)_{\text{CO}_2} dT$$

$$H_1 = \int_T^{350^\circ\text{C}} (0.03611 + 4.223e^{-5}T - 2.887e^{-8}T^2 + 7.464e^{-12}T^3) dT$$

$$H_2 = \int_T^{350^\circ\text{C}} (C_p)_{\text{CO}} dT$$

$$H_2 = \int_T^{350^\circ\text{C}} (0.02895 + 0.4110e^{-5}T + 0.3548e^{-8}T^2 - 2.220e^{-12}T^3) dT$$

De esta manera se calculan todas las entalpías que nos faltan, sin embargo, hacerlo manualmente resulta muy extenso y puede conducir a diferentes errores; por lo que resulta de gran utilidad utilizar un programa que facilite el proceso. En este caso utilizamos Matlab.

Recordamos que después de calcular cada una de las entalpías se establece el balance con la ecuación siguiente:

$$H_T = \sum_{i=1}^n H_i \Delta H = \sum_{\text{SALIDA}} n_i \cdot H_i - \sum_{\text{ENTRADA}} n_i \cdot H_i = 0$$

Obtención del polinomio en función de T en Matlab

```

%Se declara la variable
1 syms T
%Se calcula cada Cp con ayuda de las tablas de capacidades caloríficas y en seguida cada entalpía correspondiente.
2 Cp1=(36.11e-3)+(4.233e-5)*T+(-2.887e-8)*(T^2)+(7.464e-12)*(T^3);
3 H1=int(Cp1,T,350);
4 Cp2=(28.95e-3)+(0.411e-5)*T+(0.3548e-8)*(T^2)+(-2.22e-12)*(T^3);
5 H2=int(Cp2,T,350);
6 Cp3=(38.91e-3)+(3.904e-5)*T+(-3.104e-8)*(T^2)+(8.606e-12)*(T^3);
7 H3=int(Cp3,T,350);
8 Cp4=(37.66e-3)+(4.151e-5)*T+(-2.694e-8)*(T^2)+(10.57e-12)*(T^3);
9 H4=int(Cp4,T,350);
10 Cp5=(36.07e-3)+(3.97e-5)*T+(-2.88e-8)*(T^2)+(7.87e-12)*(T^3);
11 H5=int(Cp5,T,350);
12 Cp6=(29.10e-3)+(1.158e-5)*T+(-0.6076e-8)*(T^2)+(1.311e-12)*(T^3);
13 H6=int(Cp6,T,350);
14 Cp7=(29e-3)+(0.2199e-5)*T+(0.5723e-8)*(T^2)+(-2.87e-12)*(T^3);
15 H7=H7=int(Cp7,T,350);
16 Cp8=(33.46e-3)+(0.688e-5)*T+(0.76043e-8)*(T^2)+(-3.593e-12)*(T^3);
17 H8=int(Cp8,T,350);
18 Cp9=(11.18e-3)+(1.095e-5)*T+(-4.891e2)*(T^2);
19 H9=int(Cp9,T,350);
% Recordamos que H10 y H11 fueron encontrados con las tablas de vapor.
20 H10=104.85;
21 H11=2737.17;
% Aplicamos el balance energética
22 H=-(H1+H2+H3+H4+H5+H6+H7+H8+H9+H10)+H11
23 H = T*(T*((4891*T)/30 - 6463739123427827/1180591620717411303424) - 559/50000) - ((T -
350)*(382375177238643136250*T^2 - 214705225563558125*T^3 + 928820931012105168087500*T +
11524576118764161483308639464)/386856262276681335905976320000 - ((T - 350)*(15222793920587409375*T^3 -
6894842448491722278750*T^2 + 12944998755421473066037500*T +
324385603250340431295684442248)/7737125245533626718119526400000 - ((T - 350)*(43312427124497240625*T^3 -
208211456344981767381250*T^2 + 418394757744414044546162500*T +
984600943059202697965045169912)/23211375736600880154358579200000 - ((T - 350)*(3075886404236647857250*T^2 -
1332797194795622625*T^3 + 3118232851274240202837500*T +
54941773206860026029105028744)/1856910058928070412348686336000 - ((T - 350)*(2028674239378916875*T^3 -
11826170147380663573750*T^2 + 31699204585728524364867500*T +
191214997321027813525526199592)/6189700196426901374495621120000 - ((T - 350)*(61336060383967828125*T^3 -
186970532980287151356250*T^2 + 416312416870050772442912500*T +
1019849756144906916968163467672)/23211375736600880154358579200000 + ((T - 350)*(83398473021606965625*T^3 +
224053839284420965610419269968750*T^2 + 78418843430158807828018624425062500*T +
27446592093945054153144718689419634872)/92845502946403520617434316800000 - ((T -
350)*(49939274897296790625*T^3 - 222681621407309886481250*T^2 + 375147486885890707705962500*T +
1034456250321201994503179191672)/23211375736600880154358579200000 -
773662126579784334837018541166827/110680464442257309696000

```

En resumen, lo que se hizo fue integrar las expresiones para H1 hasta H9 y sustituir las ecuaciones resultantes y los valores de H10 y H11 en el balance de energía ($\Delta H=0$), obteniendo la siguiente ecuación:

$$-(6.784249999e-12*T^4)+(1654.465234*T^3)-((9.91495e-5)*T^2)-0.28044*T-7.093516741e12=0$$

Ahora, el problema consiste en encontrar el valor de T(°C) que satisfaga esta ecuación. Es posible realizar estos cálculos de manera conveniente con una hoja de cálculo.

De acuerdo a (Fernández Díez, 2007) la temperatura en la cámara de combustión puede llegar hasta los 1800 °C, por lo que podemos esperar un resultado cercano a éste. Entonces podemos sustituir en nuestra ecuación la T por 2000 °C como una aproximación, esto se hace introduciendo en una celda el dato 2000 y en otra la ecuación en donde T se sustituye por el número de celda en que hayamos colocado 2000. En seguida repetimos el proceso con 1500°C, entonces observamos que, entre estos dos valores para T, el valor de la ecuación cambia de signo, por lo que la temperatura buscada se encuentra entre 2000 y 1500° C, por lo que seguimos dando valores para T, hasta aproximarnos lo más posible a cero.

2000	1500	1600	1800	1700	1650	1625	1624	1624.5
6.14221E+12	-1.5097E+12	-3.16827E+11	2.5553E+12	1.0349E+12	3.3855E+11	5819428348	-7278974563	731788866.3

Observamos que entre los valores para T de 1624 y 1625 el valor de la función es 0, por lo tanto, aproximamos T a 1624.6°C.

3. Resultados y Discusión

La utilización de software como el programa Matlab, hace que los procesos largos y repetitivos se vuelvan rápidos y con alta confiabilidad en los resultados. En este caso fue utilizado para sumar una serie de funciones que se tenían que integrar doblemente y sumar después para obtener una sola función que de haberla trabajado manualmente hubiese requerido de mucho trabajo, con altas posibilidades de haber cometido algún error.

Para resolver la ecuación de cuarto grado se opta por utilizar una hoja de cálculo porque se tiene el antecedente de las temperaturas reportadas para los gases de combustión a la entrada de una caldera pirotubular, que según (Fernández Díez, 2007) no sobrepasa los 1800 °C. Entonces el resultado obtenido (1624.6 °C) resulta congruente con lo reportado. Se pudo haber utilizado otro método para resolver la ecuación, como graficar y observar en qué valor para la variable independiente (T) la función corta el eje x, sin embargo, como es una función con coeficientes tan grandes y de grado superior su comportamiento puede estar indefinido en algunas regiones del plano.

Es importante contrastar nuestro resultado, debido a que, en el proceso de resolución de este problema real, se hicieron varias suposiciones sobre el comportamiento de la caldera, debido sobre todo a la falta de equipo para realizar mediciones exactas.

4. Conclusiones

Las matemáticas como herramienta para el ingeniero químico resultan imprescindibles, sin embargo, más allá de su funcionalidad dentro de los problemas que se presentan, resulta fundamental la comprensión de los conceptos matemáticos y la habilidad para seleccionar las herramientas adecuadas a nuestro problema. Esto aunado a la comprensión de los fenómenos fisico-químicos que se dan en los equipos industriales representa un cúmulo de conocimientos y habilidades esenciales para los estudiantes.

La utilización de software optimiza en gran medida la generación y resolución de expresiones matemáticas. Sin embargo, su uso no garantiza resultados correctos si no se tiene una comprensión precisa de lo que se está tratando de resolver.

Se pone de manifiesto una vez más la interdisciplinariedad como paradigma en el estudio de la ingeniería química; los estudiantes exitosos serán los que dominen de forma integral las herramientas que las ciencias básicas nos brindan: matemáticas, química y física, aplicadas a los procesos y sistemas químicos.

6. Referencias

1. Felder, R. M., & Rousseau, R. W. (2012). Principios Elementales de los Procesos Químicos. México: Limusa Wiley.
2. Fernández Díez, P. (2007). Calefacción.
3. Chattopadhyay, P. (2001). Boiler Operation Engineering. Questions and Answers. New Delhi: McGraw-Hill.
4. Escamilla González, D. (2010). Manual de operación y mantenimiento de calderas tubulares

- (tubos de humo) tipo horizontal. Tépico: Tesis del Autor.
5. IMPOREX OIL & COMBUSTION. (2011). Presentación Técnica.
 6. Laurence Kohan, A. (2000). Manual de calderas : principios operativos de mantenimiento, construcción, instalación, reparación, seguridad, requerimientos y normativas. Madrid: Mc-Graw Hill.
 7. Pelayo Díaz, S. (2001). Modelado y Simulación de una Caldera de Vapor Industrial usando Ecosimpro. 1a Reunión de usuarios de Ecosimpro.
 8. Peñalba Galán, J. (2004). Modelado y Simulación de una Caldera Convencional. Tarragona: Universitat Rovira I Virgili.
 9. Sandoval Rubio, M. Á. (2011). Caldera pirotubular y su utilización en la industria. Tépico: Tesis del Autor.
 10. Vicente Quiles, P. G. (2005). Balance Energético en Calderas.

