

DESARROLLO DE UN SIMULADOR DE CALDERAS EN MATLAB-SIMULINK

Rodrigo Alem Fernández Granero¹

Resumen.- Este proyecto apunta al desarrollo de un modelo basado en MATLAB-Simulink para la simulación teórica de distintos tipos de generadores de vapor. Esto se logrará construyendo una serie de bloques correspondientes a las distintas partes de una caldera, utilizando como base modelos matemáticos de las mismas. Seguido de esto se procederá a demostrar el funcionamiento del simulador mediante el modelado de una caldera real y contrastando los resultados obtenidos con los datos prácticos. Con el fin de abarcar una amplia gama de posibles construcciones de modelos, el proyecto se basa en ecuaciones teóricas del funcionamiento de las calderas y los dispositivos que la componen. Al momento de crear el simulador se tuvo que definir como se subdividiría el sistema de generación de vapor para permitirle al usuario poder construir diversos modelos de calderas. Se consideró entonces el modelado matemático del circuito de humos, el cual abarca a todos los dispositivos posibles del sistema. Esto, sumado a un balance general a todo el sistema para cerrar, serán las ecuaciones que regirán a los bloques del simulador desarrollado.

Luego de construidos los bloques del simulador se procedió a la simulación de la caldera real. Se trató de una caldera de quema directa de leña a la cual se le varió el exceso de aire entrante, para luego contrastar los resultados obtenidos con datos reales. Se construyó el modelo acorde con los datos técnicos de la caldera y suponiendo algunos datos relacionados al ambiente.

Palabras clave: simulador, generadores de vapor, calderas

1 Introducción

Este proyecto apunta al desarrollo de un modelo basado en MATLAB-Simulink para la simulación teórica de distintos tipos de generadores de vapor. Esto se logrará construyendo una serie de bloques correspondientes a las distintas partes de una caldera, utilizando como base modelos matemáticos de las mismas. Seguido de esto se procederá a demostrar el funcionamiento del simulador mediante el modelado de una caldera real y contrastando los resultados obtenidos con los datos prácticos. Finalmente, con la finalidad de demostrar la versatilidad del simulador, se mostrarán ejemplos de calderas teóricas y se observarán los resultados.

Con el fin de abarcar una amplia gama de posibles construcciones de modelos, el proyecto se basa en ecuaciones teóricas del funcionamiento de las calderas y los dispositivos que la componen. Se han omitido los efectos temporales en el modelado, considerándose entonces que todo efecto provocado por la variación de una variable de entrada sea inmediato. La simulación será aplicable solamente para combustibles con relación H/C (relación en la composición entre porcentajes gravimétricos de hidrógeno y carbono) iguales o

¹ Ing. Ind. Rodrigo Fernández, Profesor Informática, Universidad de Montevideo

similares a las del fuel-oil (~0.153). Los bancos de convección se los supone como con perfiles tubulares lisos y bajo condiciones de flujo plenamente desarrollado. No se modelaron variaciones de nivel en el domo por lo que se considera iguales a los caudales de entrada de agua y salida de vapor. El modelado de intercambiadores correspondientes a sobrecalentadores, pre-calentadores de aire y economizadores se hizo mediante balances energéticos basados en el primer principio para volúmenes de control sin entrar en mayor detalle.

2 Desarrollo.-

Al momento de modelar se tuvieron en cuenta una serie de suposiciones

- *Carga de caldera en estado estacionario*

Se supuso que no existía variación del nivel del agua en el domo.

- *Agua en domo se encuentra en saturación*

La temperatura dentro del domo se la considera como constante y su valor será la temperatura de saturación a la presión de trabajo.

- *El hogar solo presenta intercambio radiativo de calor*

Se omitió el estudio de intercambio convectivo en esta zona de la caldera, considerando como modo de transferencia de calor predominante a la radiación.

- *Los bancos de convección solo presentan intercambio convectivo de calor*

Se omitió el estudio de la radiación de los gases de combustión en estas zonas, considerando como modo de transferencia de calor predominante a la convección.

- *Toda variación de datos tiene un efecto inmediato*

Al no simularse efectos temporales se considera que toda variación en los datos de entrada provocan un efecto inmediato en el sistema.

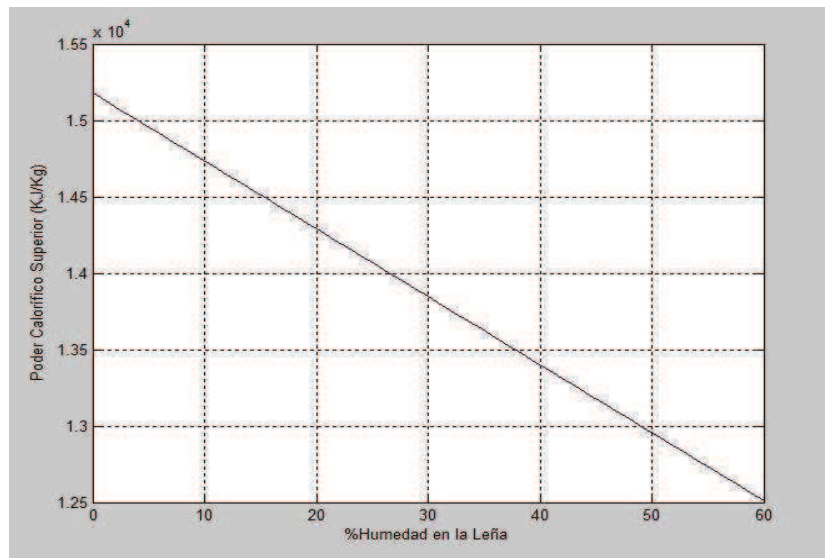
Al momento de crear el simulador se tuvo que definir como se subdividiría el sistema de generación de vapor para permitirle al usuario poder construir diversos modelos de calderas. Se consideró entonces el modelado matemático del circuito de humos, el cual abarca a todos los dispositivos posibles del sistema. Esto, sumado a un balance general a todo el sistema para cerrar, serán las ecuaciones que regirán a los bloques del simulador desarrollado.

a) Combustibles

Los bloques de los combustibles se basan en sus análisis últimos en base seca de los mismos. Muestran los porcentajes de cada componente de manera gravimétrica (porcentaje en peso). Se desarrollaron bloques para dos combustibles, Madera y Fuel-Oil. Se describirá el bloque correspondiente a la madera. La madera en forma de chip presenta un análisis último con los siguientes datos.

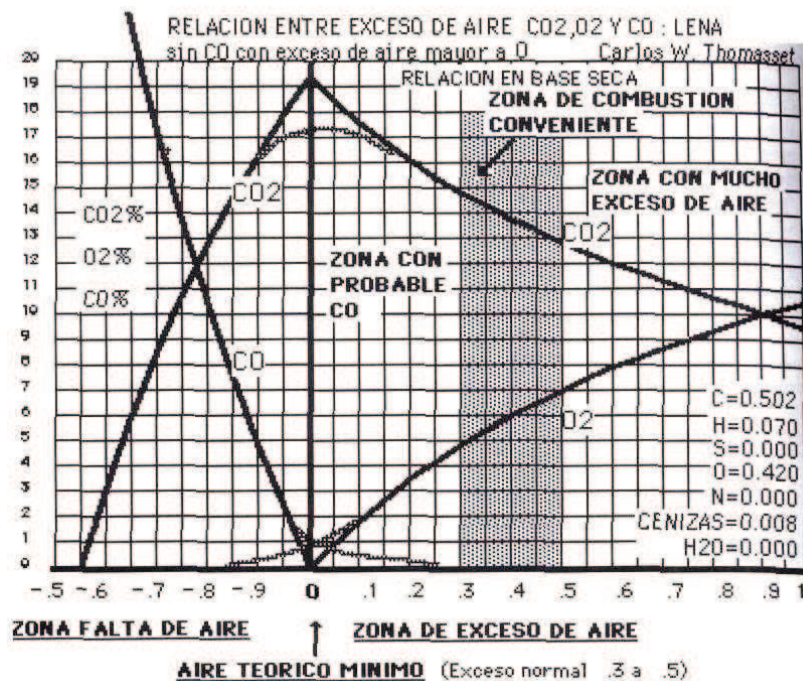
$C =$	44.59%
$H =$	6.20%
$O =$	48.78%
$N =$	0.13%
$S =$	0%
$Ash =$	0%

Se trabajó con una humedad del 25% resultando así un Q_{ps} de la misma del 14068 KJ/Kg. Sin embargo, es sabido el efecto que tiene la humedad en la capacidad calorífica, existe una relación lineal entre estos valores descrita en la siguiente gráfica basada en (2).



Relación entre el %Humedad y Q_{ps}

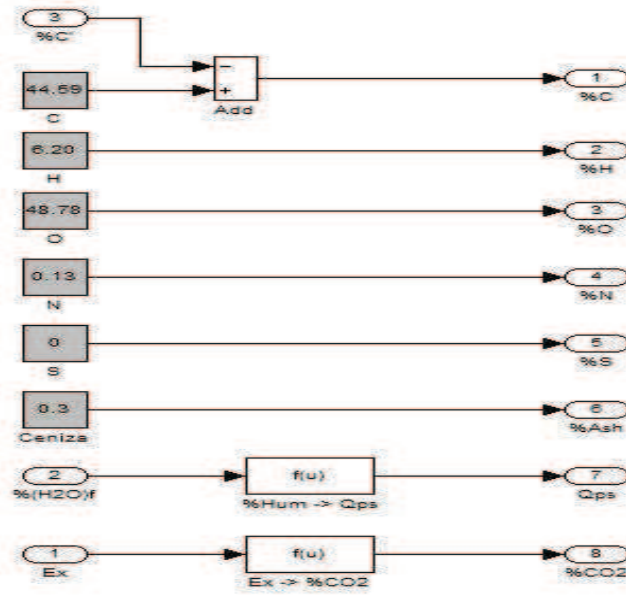
Por lo tanto, al momento de modelar se debe tener en consideración esta relación. También los combustibles presentan curvas teóricas de los gases que generan en su combustión en relación al exceso de aire. En el caso de la madera, las curvas son descritas a continuación.



Gráfica Exceso de Aire vs. %CO₂, %CO y %O₂ en humos para Leña (2)

La relación Exceso de Aire y %CO₂ será la más significativa para el modelado ya que serán los dos datos extra que se deberán agregar a los balances másicos del bloque correspondiente a la combustión incompleta (a ser descrita en más detalle posteriormente).

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente el bloque resultante será el siguiente

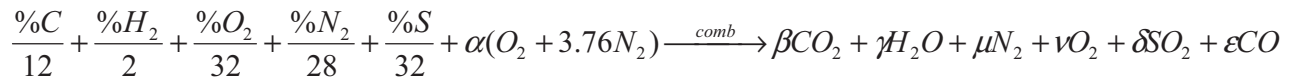


Diagramación del subsistema Combustible Madera

Los datos correspondientes al análisis último no son necesarios de variar, eso explica el color diferenciado del bloque correspondiente el combustible. La humedad del combustible es una variable de entrada y, como se mencionó anteriormente, afecta al Q_{ps} resultante. Lo mismo ocurre con el *Exceso de Aire* que afectará al %CO₂. El valor de %C' (carbono no quemado) puede ser ingresado por el usuario y afectará al porcentaje de C del análisis último para los cálculos de combustión.

b) Combustión

Se ha supuesto que la combustión que se lleva a cabo para la simulación es incompleta. Para ello el bloque correspondiente se baso en el balance másico de la reacción.



Donde los valores porcentuales de C, H, O, N y S vienen del análisis último del combustible correspondiente. Como el análisis último presenta los porcentajes de manera gravimétrica ($Kg_{componente}/Kg_{fuel}$) y la reacción trabaja con $kmol_{componente}/Kg_{fuel}$, cada valor de los componentes es dividido por el peso molecular para lograr coherencia en las unidades. La cantidad de aire de la reacción es representada por la variable α , donde 3.76 es la relación molar entre oxígeno y nitrógeno en el aire.

De aquí surgen cinco ecuaciones al hacer balances a cada componente:

$$\frac{\%C}{12} = \beta + \epsilon ; \quad \frac{\%H_2}{2} = \gamma ; \quad \frac{\%O_2}{32} + \alpha = \beta + \frac{\gamma}{2} + \nu + \delta + \frac{\epsilon}{2} ; \quad \frac{\%N_2}{28} + \alpha \cdot 3.76 = \mu ; \quad \frac{\%S}{32} = \delta$$

Pero se tienen 7 incógnitas por lo que se agregan dos ecuaciones más si consideramos el *Exceso de Aire* y el %CO₂ de los humos provenientes de datos del combustible para resolver el sistema completamente.

$$\%CO_2 = \frac{\beta}{\beta + \mu + \nu + \epsilon + \delta} ; \quad \%Ex = \left(\frac{\alpha}{\alpha q} - 1 \right) \cdot 100$$

Donde αq es el α correspondiente a la combustión estequiométrica, en la cual el aire utilizado es el químicamente exacto para que reaccione con todo combustible sin excedente alguno. αq

puede ser tomado entonces como $\alpha \cdot \nu$, siendo ν los $\text{kmol}_{\text{O}_2} / \text{Kg}_{\text{fuel}}$ resultantes de la reacción, implicando que es oxígeno sobrante del proceso.

Resuelto el sistema se pueden obtener entonces los porcentajes de otros componentes de los gases de combustión, como el CO y el O_2 , mediante los siguientes cálculos

$$\%CO = \frac{\epsilon}{\beta + \mu + \nu + \epsilon + \delta} ; \quad \%O_2 = \frac{\nu}{\beta + \mu + \nu + \epsilon + \delta}$$

Otros datos de interés que surgen de los resultados obtenidos de la combustión son los valores de *Gasto de Aire* y *Gasto de Humos Húmedos*.

El *Gasto de Aire* son los $\text{Kg}_{\text{aire}} / \text{Kg}_{\text{fuel}}$ utilizados en la reacción y se obtiene mediante la fórmula.

$$G_a \left[\frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} \right] = \alpha \left[\frac{\text{kmol}_{\text{O}_2}}{\text{kg}_{\text{fuel}}} \right] \cdot 32 \left[\frac{\text{kg}_{\text{O}_2}}{\text{kmol}_{\text{O}_2}} \right] \cdot \frac{1}{0.232} \left[\frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{O}_2}} \right] = 138 \cdot \alpha$$

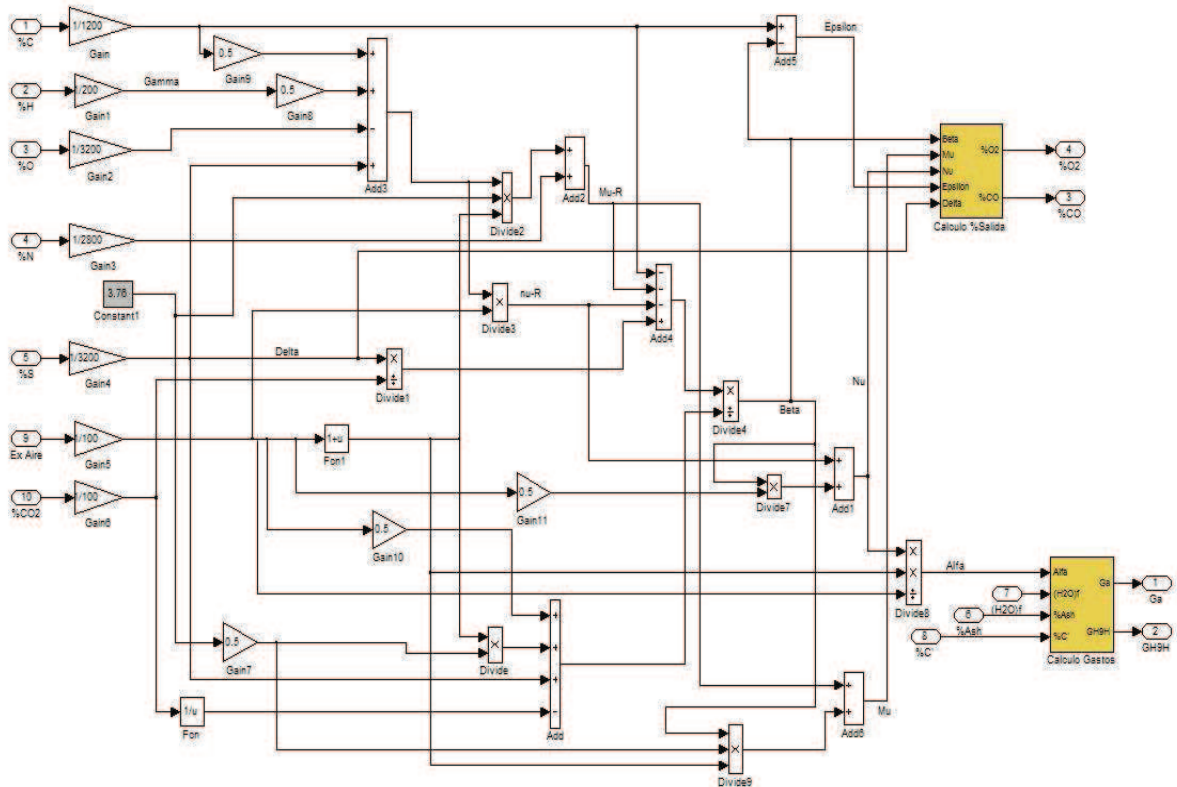
Mientras que el *Gasto de Humos Húmedos* se define como

$$G_{HH} = 1 + G_a - \%Ash - \%C'$$

Pero como en los cálculos posteriores consideraremos a los humos sin la humedad del combustible surge el *Gasto de Humos Semi-Húmedos*, definido como

$$G_{H9H} = G_{HH} - \%(\text{H}_2\text{O})f$$

Considerando los cálculos mencionados se obtiene el siguiente bloque de Simulink



Diagramación del subsistema Combustión

Donde el cálculo de los gastos y el de los porcentajes de salida están basados en las ecuaciones descritas anteriormente.

c) Hogar

Basado en lo estudiado en (3) tenemos el siguiente balance energético

$$Q_{pS} = Q_h + Q_{H9H} + Q_{air} + Q_{fuel} + Q_{hfg} + Q_{(H_2O)f} + Q_{wa} + Q_{CO+C'} + \%Perd \cdot Q_{pS}$$

Donde cada uno de los componentes del balance están en KJ/Kg_{fuel}:

- Q_{pS} : Poder Calorífico Superior del combustible
- Q_h : Calor de Hogar, Intercambio radiativo entre pared y hogar calculado como

$$\frac{20,42 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot A_H}{\dot{\omega}f} [T_H^4 - T_P^4]$$

Donde:

- $20,42 \cdot 10^{-8}$: Constante de Stefan-Boltzmann en $kJ/(h \cdot m^2 \cdot K^4)$
- ε : Emisividad
- A_H : Área del hogar (m^2)
- $\dot{\omega}f$: Caudal de Fuel (Kg_{fuel}/hora)
- T_H : Temperatura promedio del hogar (K)
- T_P : Temperatura de pared, comúnmente aproximada como $T_{sat} + 150$ (K)

Q_{H9H} : Calor de humos semi-humedos de combustión calculado como

$$G_{H9H} \cdot (h_{H9H}(T_H) - h_{H9H}(T_o))$$

Donde:

- G_{H9H} : Gasto de humos semi-húmedos (Kg_{H9H}/Kg_{fuel})
- $h_{H9H}(T)$: Entalpía de humos semi-húmedos a temperatura T (KJ/Kg)
- T_o : Temperatura del ambiente (°C)

Q_{air} : Calor de Aire (seco) de humos de combustión calculado como

$$G_a \cdot (1 - \omega_a) \cdot \overline{cp}_a \cdot (T_{a'} - T_o)$$

Donde:

- G_a : Gasto de aire (Kg_{aire}/Kg_{fuel})
- ω_a : Humedad del aire (%)
- \overline{cp}_a : Capacidad calorífica promedio del aire entre $T_{a'}$ y T_o (KJ/Kg°C)
- $T_{a'}$: Temperatura del aire precalentado, T_o si no hay precalentamiento (°C)

Q_{fuel} : Calor del Combustible (seco) precalentado calculado como

$$[1 - (H_2O)f] \cdot \overline{cp}_f \cdot (T_f - T_o)$$

Donde:

- $(H_2O)f$: Humedad del Combustible (%)

- \overline{cp}_f : Capacidad calorífica promedio del combustible entre T_f y T_o (KJ/Kg°C)
- T_f : Temperatura de fuel precalentado, T_o si no hay precalentamiento (°C)

Q_{hfg} : Calor de cambio de fase del agua calculado como: $9 \cdot H \cdot hfg(T)$

Donde:

- H : Cantidad de hidrogeno en fuel según análisis último (%)
- h_{fg} : Entalpía de cambio de estado del agua a temp. T , comúnmente T_{ch} (KJ/Kg)

$Q_{(H_2O)f}$: Calor del agua del combustible calculado como

$$(H_2O)f \cdot (hfg(T) + \overline{cp}_v \cdot (T_H - T_o) - \overline{cp}_w \cdot (T_f - T_o))$$

Donde:

- \overline{cp}_w : Capacidad calorífica promedio del agua entre T_f y T_o (KJ/Kg°C)

Q_{wa} : Calor de la humedad del aire calculado como $\omega_a \cdot G_a \cdot \overline{cp}_v \cdot (T_H - T_o)$

Donde:

- ω_a : Humedad del aire (%)

Q_{CO+C} : Calor de CO y carbono no quemado (C'), se calcula como

$$\frac{23598 \cdot (CO) \cdot (C - C')}{(CO) + (CO_2)}$$

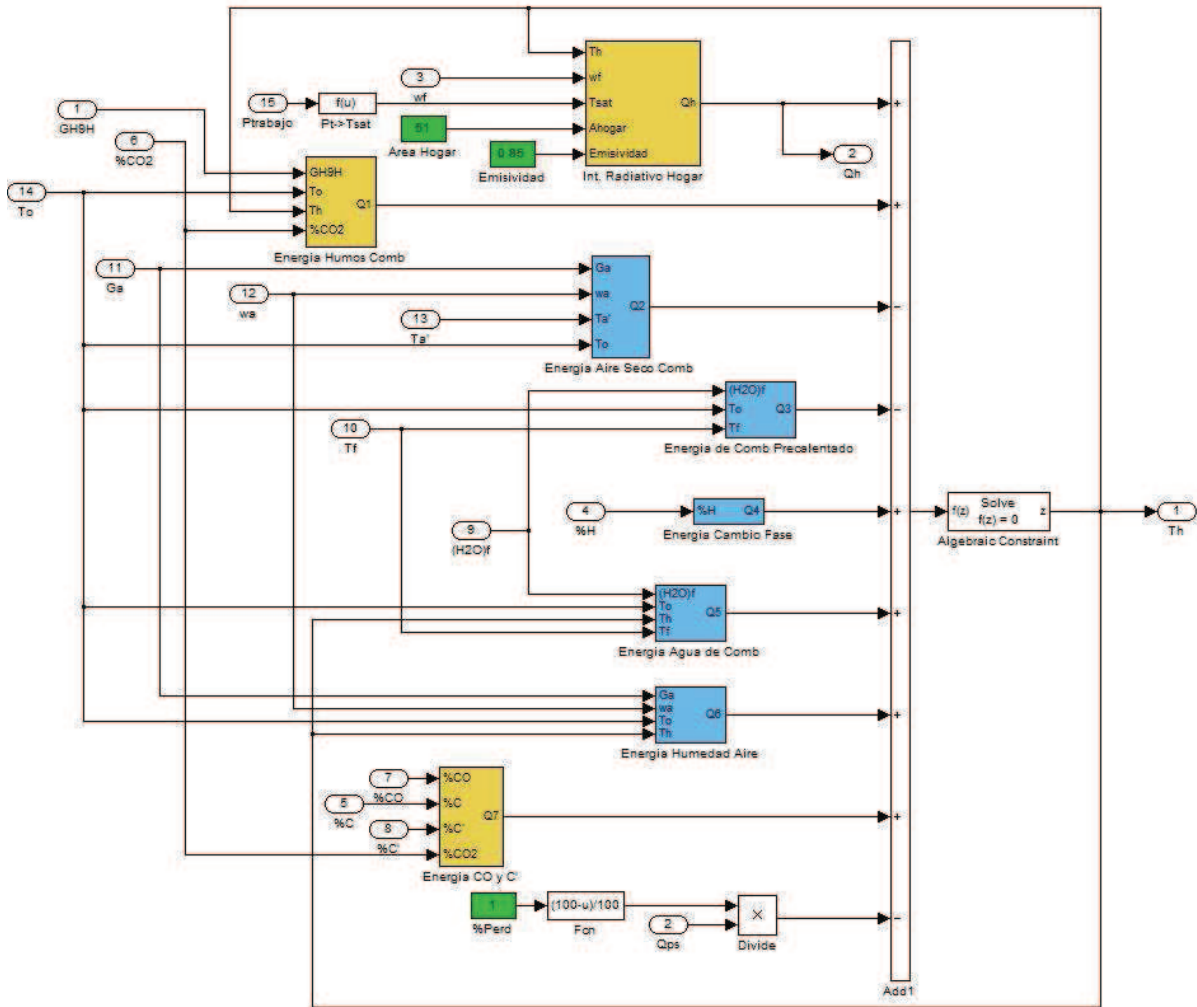
Donde:

- 23598: Cociente entre poder calorífico del CO en KJ/kmol_{CO} y peso molar de C (KJ/Kg_{fuel})
- (CO): Cantidad de CO resultante de la combustión (kmol/Kg_{fuel})
- (CO₂): Cantidad de CO₂ resultante de la combustión (kmol/Kg_{fuel})
- (C): Cantidad de C del fuel según análisis último (%)
- (C'): Cantidad de carbono no quemado según análisis último (%)

%Perd $\cdot Q_{pS}$: Porcentaje del Q_{pS} perdido a través de las paredes al ambiente mediante radiación y convección. Se aproxima comúnmente a un 2% ($0.02 \cdot Q_{pS}$).

El bloque de Simulink, entonces, se compondrá en la forma que se indica en el gráfico, donde internamente se diagrama basado en los cálculos explicados anteriormente.

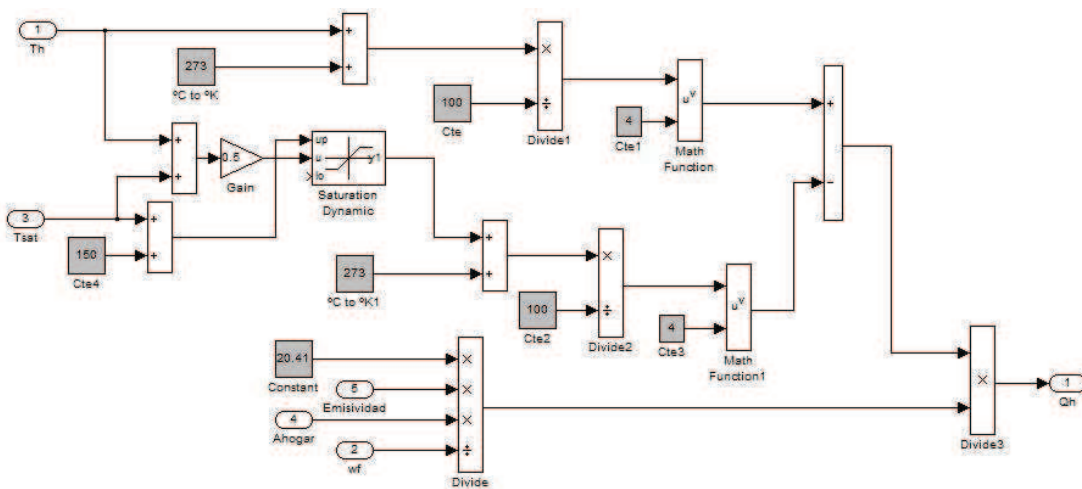
El bloque *Algebraic Constraint* se encargará de iterar el valor de la temperatura de hogar (T_H) para que el resultado de la sumatoria presente en el subsistema se iguale a cero. Los valores de *Emisividad y Área de Hogar* pueden ser variados para corresponder a las necesidades del modelo. De llegar a tratarse de un hogar con filas de tubos se deberá tener en consideración el factor resultante del *Ábaco de Hottel* que deberá ser definido de forma manual. El porcentaje de pérdidas también puede ser alterado.



Diagramación del subsistema Hogar

Los subsistemas de cada uno de los calores desarrollados anteriormente resultan de la siguiente manera.

- Intercambio Radiativo del Hogar

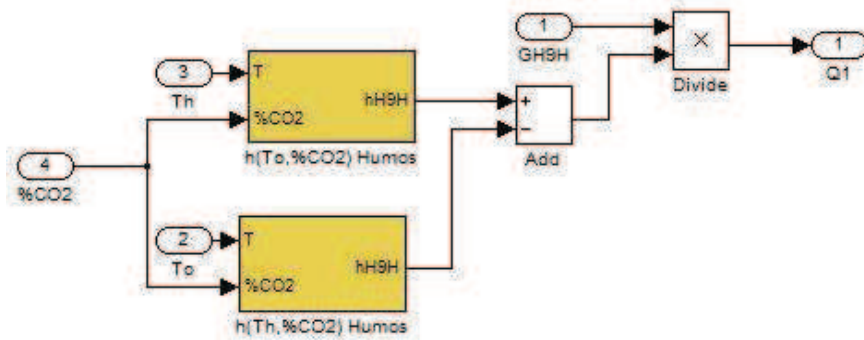


Diagram

Diagramación del subsistema Int. Radiativo Hogar

El bloque de saturación se asegura de que llegado el caso en que la T_H sea menor a la aproximación de pared de $T_{sat} + 150$ entonces se trabaje con una $T_P = (T_H + T_{sat})/2$.

- Energía de Humos de Combustión



Diagramación del subsistema Energia Humos Comb

Los subsistemas que calculan la entalpía de los humos están basados en los datos tabulados.

- Energía del Aire (seco) del Combustible

El valor de cp_a puede ser variado para acomodar las necesidades del modelo. Es una aproximación del valor promedio considerando las condiciones de la caldera.

- Energía de Combustible Precalentado

Si no existe valor de T_f debido a que no hubo precalentamiento de combustible se toma el valor de T_o , provocando que el resultado de este bloque sea cero. El valor de ejemplo de cp_f corresponde a una aproximación de la capacidad calorífica del Fuel-Oil. De usarse otro combustible este valor deberá ser cambiado, claramente.

d) Bancos de Convección

Los bancos de convección han sido resueltos mediante un proceso iterativo basado en el método NTU-eficiencia para intercambiadores de calor (1). Como en los bancos de convección existe el caso particular de $Cr = 0$ (cociente de calores específicos del fluido y caliente), ya que el agua se encuentra en proceso de vaporización, la relación entre NTU y la eficiencia pasa a ser (1):

$$\epsilon = 1 - e^{-NTU}$$

Igualando las definiciones de eficiencia, el método iterativo apunta a cerrar la siguiente ecuación, suponiendo la temperatura de salida de los gases T_{out} .

$$1 - e^{-NTU} = \left(\frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{SAT}} \right)$$

Donde los datos conocidos son:

T_{in} : Temperatura de entrada de humos al banco (°C)

T_{SAT} : Temperatura de saturación del agua a la presión de trabajo (°C)

Mientras que NTU deberá ser calculado como

$$NTU = \frac{h \cdot A_{int}}{C_{min}}$$

Donde el coeficiente global de transferencia de calor U fue reemplazado por h ya que la convección es el modo predominante en el banco de convección. A_{int} es el área de intercambio en m^2 y con C_{min} y h se define como

$$C_{min} = G_{H9H} \cdot \dot{\omega}f \cdot \left(\frac{h(T_{in}) - h(T_{out})}{T_{in} - T_{out}} \right) \quad ; \quad h = \frac{Nu \cdot k}{\phi}$$

Donde:

- $\dot{\omega}f$: Caudal de combustible (Kg/h)
- k : Coeficiente de conductividad térmica a una temperatura promedio entre T_{in} y T_{out} (W/mK)
- Nu : Número adimensionado de Nusselt calculado como
-

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_p} \right)^{0,25}$$

Ecuación basada en (4). Donde se supone a los tubos con perfiles circulares y con C , m y n variando según la siguiente tabla.

	Humos dentro de tubos	Humos fuera de tubos	
		Tubos en línea	Tubos en tresbolillo
C	0.021	0.22	0.4
M	0.8	0.65	0.6
N	0.43	0.36	0.36
Condiciones	0.6<Pr<2500 10 ³ <Re<5·10 ⁶	Pr>0.6 10 ³ <Re<2·10 ⁵	

Donde:

- Pr : Número adimensionado de Prandtl de los humos a la temperatura promedio entre T_{in} y T_{out}
- Pr_p : Número adimensionado de Prandtl de la pared del domo. La temperatura de la pared se aproxima como $T_{sat}+50$
- Re : Número adimensionado de Reynolds calculado como

$$Re = \frac{v\phi}{\nu}$$

Siendo:

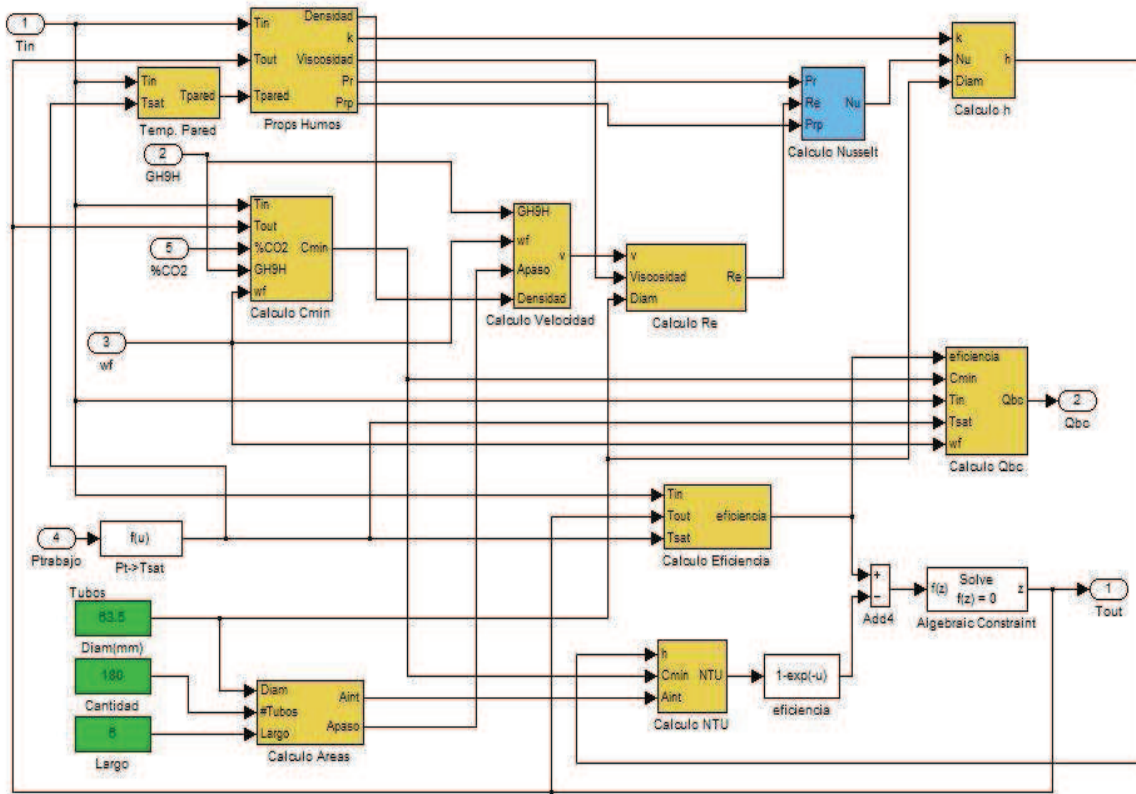
- ϕ : Diámetro de los tubos del banco de convección (m)
- ν : Viscosidad cinemática de los gases de combustión a una T promedio entre T_{in} y T_{out} . (m²/s)
- v : Velocidad de los gases a través del banco calculado como (m/s)

$$v = \frac{G_{H9H} \cdot \dot{\omega}f}{\rho \cdot A_p \cdot 3600}$$

Con:

- ρ : Densidad de los humos a la temperatura promedio entre T_{in} y T_{out} (Kg/m³)
- A_p : Área de pasaje de los humos (m²)

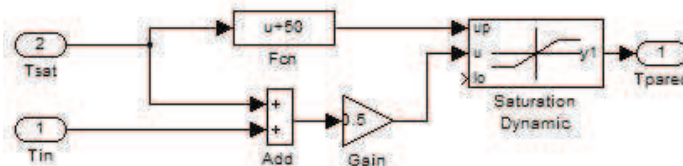
El bloque resultante tendrá entonces las siguientes entradas y salidas con un estructura interna de:



Diagramación del subsistema Banco de Convección

El bloque *Algebraic Constraint* resolverá el proceso iterativo mencionado anteriormente variando el valor de la temperatura de salida de los humos T_{out} . Se observa también que existen subsistemas que realizan parte de los cálculos, esto son:

- Temperatura de Pared



Diagramación del subsistema Temp. Pared

Análogo al cálculo de la temperatura de pared en el hogar, se incluye una saturación para que cuando la T_{in} sea menor que $T_{sat}+50$ se recurra al promedio.

- Propiedades de los Humos: Se obtienen las propiedades físicas de los humos basado en las datos tabulados. La conductividad térmica k se encuentra en $Kcal/mh^{\circ}C$ por lo que el resto de los cálculos de todo el subsistema mantiene las kilocalorías como unidad de energía hasta el punto en que se calcula el *Calor del Banco de Convección* (Q_{bc}), volviendo a los kilojoules.
- Cálculo de Áreas: Consta de un cálculo directo de las áreas de intercambio y pasaje basado en los parámetros del banco impuestos por el usuario. Este subsistema se puede obviar si se tiene explícitamente los valores de las áreas, enlazándolos directamente con los subsistemas que solicitan esos parámetros.
- Cálculo de Número de Nusselt: Dentro de este subsistema también se incluye un recordatorio de los posibles valores que pueden tomar C , m y n dependiendo los casos mencionados anteriormente.

e) *Balances de Energía Simples*

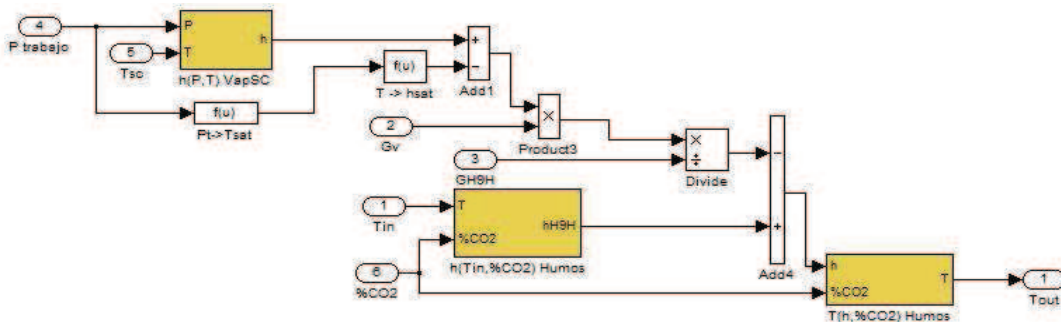
Estos bloques fueron generados como una solución rápida ante la eventualidad de que falten datos para poder trabajar, de manera más específica, con elementos de la caldera que correspondan a intercambiadores de calor, por ejemplo: pre-calentadores y sobre-calentadores. Existen varios tipos de posibles bloques de Balance de Energía Simple, clasificados según las sustancias que involucran: Vapor-Humos, Aire-Humos y Agua-Humos. Se procederá a desarrollar el correspondiente al primero de estos. Un balance energético Vapor-Humos corresponde a sobre-calentadores. Se lleva a cabo el siguiente balance energético donde se supone que el vapor entrante se encuentra saturado.

$$G_v(h(T_{SC}) - h(T_{SAT})) = G_{H9H}(h_{H9H}(T_{in}) - h_{H9H}(T_{out}))$$

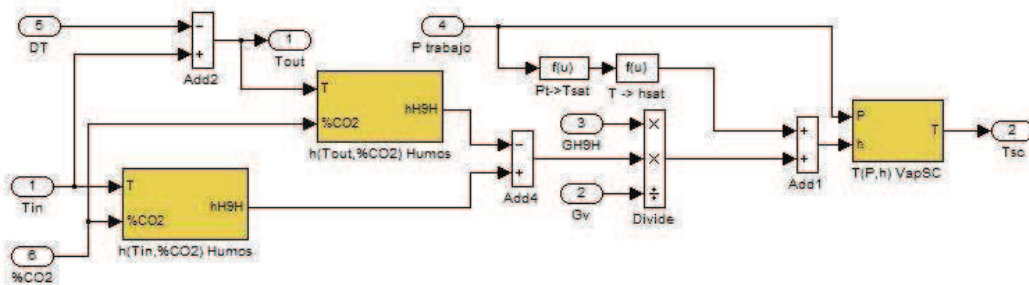
Donde:

- G_v : Gasto de vapor (Kg_{vapor}/Kg_{fuel})
- $h(T)$: Entalpía del vapor a temperatura T y presión de trabajo (KJ/Kg)
- T_{SC} : Temperatura de sobrecalentamiento del vapor (°C)
- T_{SAT} : Temperatura de saturación del vapor a la presión de trabajo (°C)
- T_{in} : Temperatura de humos a la entrada del proceso (°C)
- T_{out} : Temperatura de humos a la salida del proceso (°C)

De este balance surgen dos posibles bloques para Simulink, en ambos se le deben suministrar los datos de *Gasto de Humos Húmedos*, *Gasto de Vapor*, *Temperatura de Saturación* y *Temperatura de Entrada de Humos*. La diferencia fundamental entre ambos bloques es que en uno de los casos se le proporciona de antemano el valor de *Temperatura de Sobrecalentamiento* deseada, calculándose así la *Temperatura de Salida de Humos*, mientras que en el otro se le proporciona una diferencia de temperatura entre entrada y salida a los humos (DT) con la cual se calcula la *Temperatura de Sobrecalentamiento* resultante.



Diagramación del subsistema SobreCalentador c/Tsc



Diagramación del subsistema SobreCalentador c/DT

El subsistema encargado de calcular la entalpía de vapor sobrecalentado según la presión y la temperatura, así como el que define la temperatura de humos mediante su entalpía y su %CO₂,

presentan una estructura análoga al subsistema que calcula la entalpía de los humos húmedos presentada en el bloque de hogar.

f) Balance General

Basado en lo estudiado en (3), el Balance General correspondiente a la caldera es el siguiente

$$Q_{ps} = Q_{vap} + Q_{H9H} + Q_{air} + Q_{fuel} + Q_{hfg} + Q_{(H_2O)f} + Q_{wa} + Q_{co+c} + \%Perd \cdot Q_{ps}$$

Donde cada uno de los componentes del balance están en KJ/Kg_{fuel}:

- Q_{ps} : Poder Calorífico Superior del combustible
- Q_{vap} : Calor del vapor de agua calculado como

$$G_v \cdot (h_2 - h_1)$$

Donde:

- h_2 : Entalpía del vapor saliente, vapor saturado o sobrecalentado (si es que hubo tal proceso) a la presión de trabajo (KJ/Kg)
- h_1 : Entalpía de agua entrante a T determinado por datos técnicos o precalentada (si es que hubo tal proceso) (KJ/Kg)

Q_{H9H} : Calor de humos semi-húmedos de combustión calculado como

$$G_{H9H} \cdot (h_{H9H}(T_{ch}) - h_{H9H}(T_o))$$

Donde: T_{ch} : Temperatura de humos en la chimenea (°C)

Q_{air} : Calor de Aire (seco) de humos de combustión calculado como

$$G_a \cdot (1 - \omega_a) \cdot \overline{cp}_a \cdot (T_a - T_o)$$

Donde T_a no debe ser confundido con T_o (salida de pre-calentador). T_a puede tratarse de una temperatura distinta de entrada del aire provocada por algún proceso previo al sistema de la caldera. De no existir tal proceso se iguala a T_o , resultando en cero el efectoenergético del aire seco.

- Q_{fuel} : Calor del Combustible (seco) precalentado calculado como

$$[1 - (H_2O)f] \cdot \overline{cp}_f \cdot (T_f - T_o)$$

- Q_{hfg} : Calor de cambio de fase del agua calculado como

$$9 \cdot H \cdot hfg(T)$$

- $Q_{(H_2O)f}$: Calor del agua del combustible calculado como

$$(H_2O)f \cdot (hfg(T) + \overline{cp}_v \cdot (T_{ch} - T_o) - \overline{cp}_w \cdot (T_f - T_o))$$

- Q_{wa} : Calor de la humedad del aire calculado como

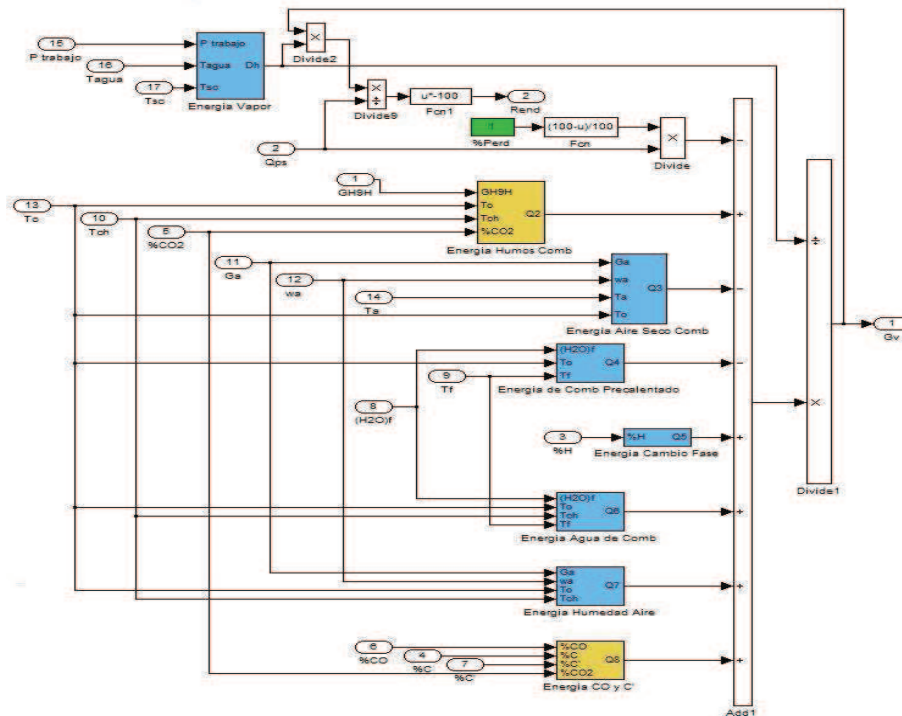
$$\omega_a \cdot G_a \cdot \overline{cp}_v \cdot (T_{ch} - T_o)$$

- Q_{CO+C} : Calor de CO y carbono no quemado (C'), se calcula como

$$\frac{23598 \cdot (CO) \cdot (C - C')}{(CO) + (CO_2)}$$

- $\%Perd \cdot Q_{ps}$: Porcentaje del Q_{ps} perdido a través de las paredes al ambiente mediante radiación y convección. Se aproxima comúnmente a un 2% ($0.02 \cdot Q_{ps}$).

El diagrama de Simulink resultante será:

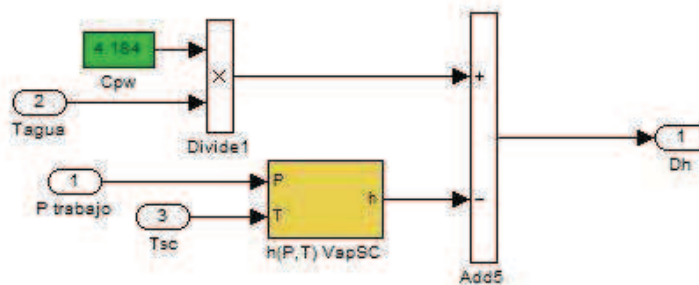


Diagramación del subsistema Balance General

El *Rendimiento* es calculado como lo define la ASME como el cociente entre el calor obtenido y el poder calorífico del combustible.

$$Rend = \frac{Gv(h2 - h1)}{Qps}$$

Los subsistemas de los calores desarrollados anteriormente son análogos a los representados en el bloque del Hogar solo que trabajan con la temperatura de chimenea (T_{ch}) en vez de la temperatura del hogar (T_H). El bloque correspondiente al Calor del Vapor reemplaza al bloque del Intercambio Radiativo visto en el hogar e internamente presenta el siguiente diagrama



Diagramación del subsistema Energía Vapor

La estructura del subsistema que calcula la entalpía del vapor sobre-calentado es análoga a la vista en casos anteriores de cálculo de propiedades mediante dos variables.

3 Aplicación

Se simuló una caldera real de quema directa de leña. En ella se varió el exceso de aire entrante, para luego analizar los resultados obtenidos. La caldera simulada corresponde a una de modelo Denafluid VPKR 10.5/48/18 del tipo híbrida: con cámara de combustión acuotubular, sección humotubular de dos pasos, sobre-calentador y pre-calentador de aire. Fue diseñada para una producción de 15 T/h y una presión de trabajo de 15bar. Emplea como combustible chip de madera, cáscara de girasol y cáscara de maní. Este es quemado en una grilla basculante que permite el paso del aire por su parte inferior y cuyo movimiento permite una combustión relativamente uniforme.

Para la modelación se consideró el bloque de combustible de madera, con los datos de análisis últimos correspondientes al eucaliptus, un 25% de humedad y un caudal aproximado de 3500 Kg/h. Se supuso un 40% de exceso de aire. El aire en el ambiente fue supuesto a 20°C de temperatura y 30% de humedad específica. El agua de alimentación se encuentra a 105°C. La temperatura de sobre-calentamiento es de 220°C y se supuso una variación de 125°C en el pre-calentador de aire. El sobre-calentador se ubica entre el primer y segundo paso en tubos, mientras que el pre-calentador de aire lo está antes de la salida a chimenea.

Con los datos expresados, se sabe que se necesitarán los siguientes bloques del simulador: Combustible Madera; Combustión; Hogar; Banco Convección x 2; SobreCalentador c/Tsc; PreCalentador c/DT; Balance General. Se procedió luego a corregir los datos dentro de los bloques azules para que correspondan a la caldera. En el caso del bloque *Hogar* se tiene un *Área Hogar* de 51m² de área efectiva de intercambio en el hogar acuo-tubular, mientras que el hogar humo-tubular presenta 16.6m² dando un total de 67.6m². Se supuso un valor de *Emisividad* de 0.85 y un 1% de *%Perd* por radiación y convección al ambiente. Ningún otro dato debió ser variado.

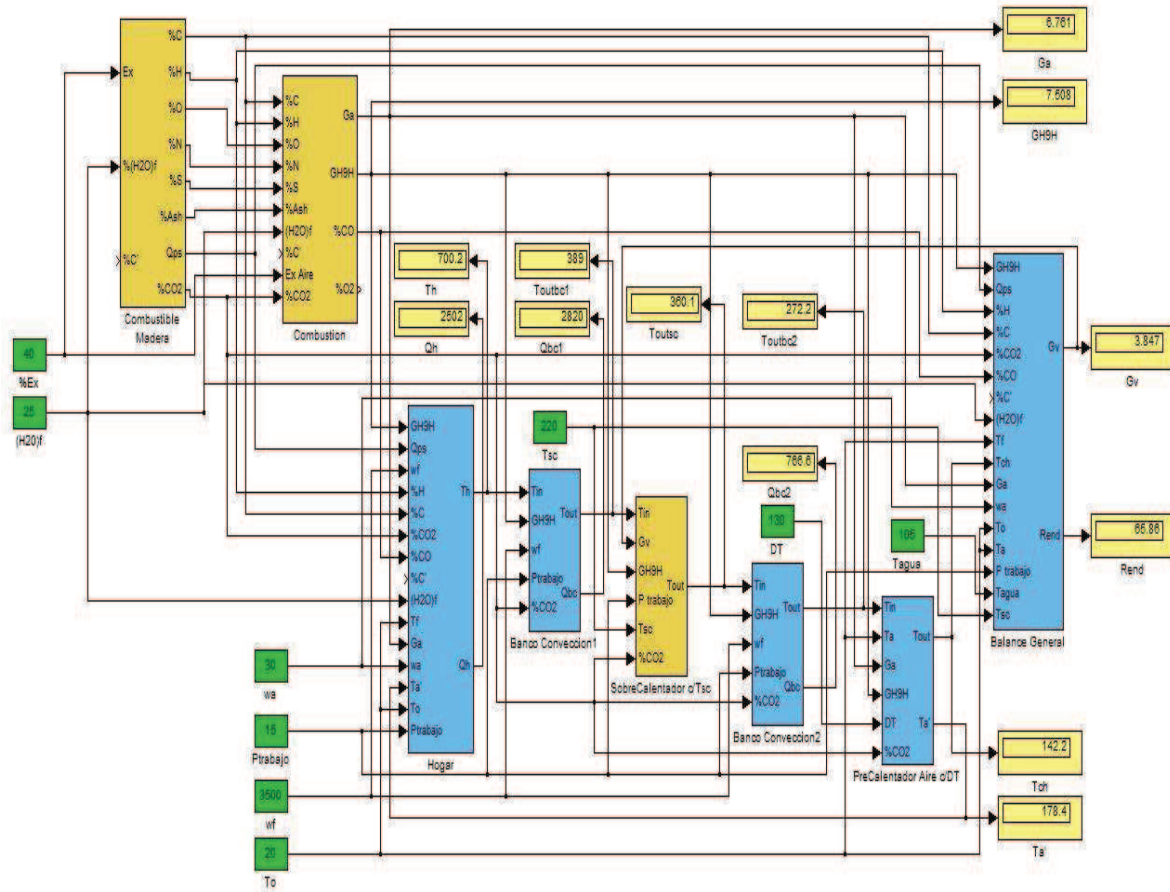
Los bancos de convección del sistema tienen los siguientes datos:

	<i>1er Paso</i>	<i>2do Paso</i>
<i>Diámetro de Tubos</i>	76.2mm	76.2mm
<i>Cantidad de Tubos</i>	210	120
<i>Largo</i>	4.8m	4.8m

Por lo tanto, en los subsistemas de los bancos de convección se colocaron los datos correspondientes a cada paso. Los valores del subsistema interno *Calculo Nusselt* se dejaron intactos ya que por defecto presenta los datos correspondientes a un sistema humo-tubular.

No fue necesario alterar valores dentro del subsistema *PreCalentador Aire c/DT* y solo hubo que colocar un 1% de *%Perd* en el subsistema *Balance General*.

Luego de agregar bloques de *Display* para observar los resultados y conectar los puertos correspondientes entre sí, se obtuvo el modelo que se muestra a continuación.



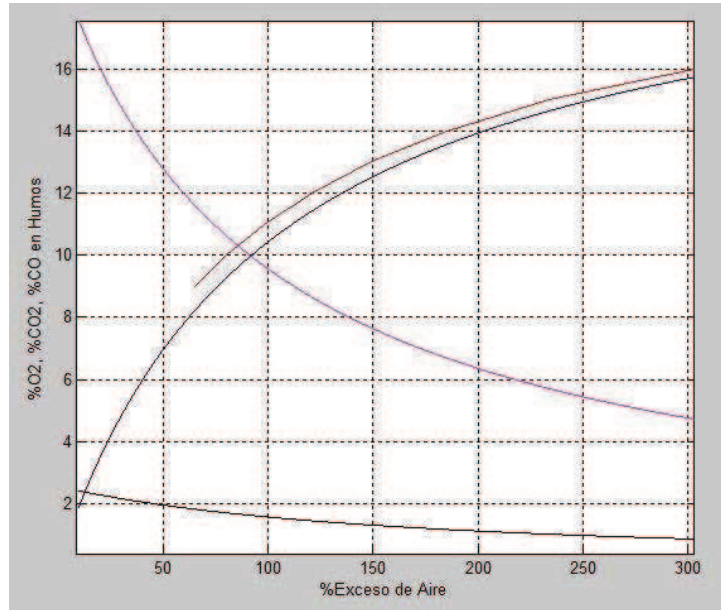
Modelo de la caldera en Simulink

Los resultados obtenidos corresponden a datos fijos. Para poder apreciar los efectos del exceso de aire en todo el sistema hubo que reemplazar el bloque constante de esta variable por uno del tipo *Ramp*. Los parámetros del bloque fueron:

Nombre	Parámetro	Valor
Pendiente	<i>Slope</i>	30
Tiempo de Inicio	<i>Start Time</i>	0
Valor inicial	<i>Initial Output</i>	10

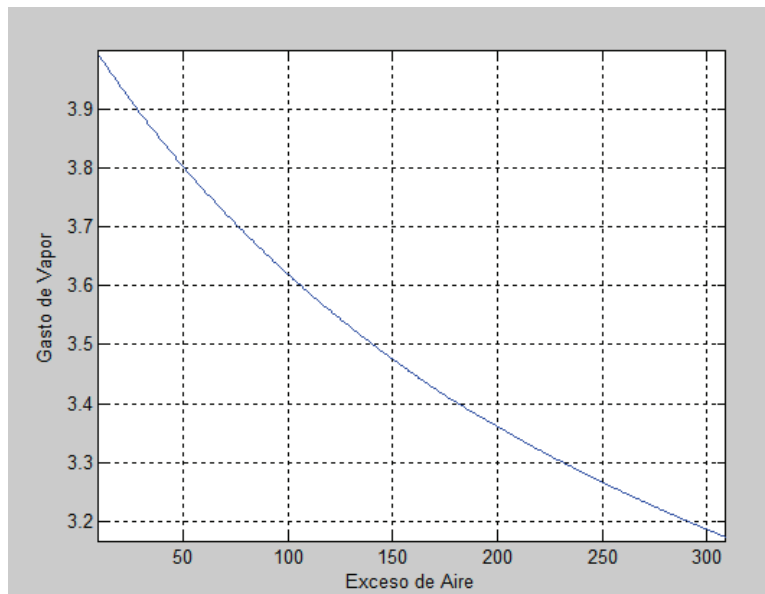
Definiendo así una entrada con valor inicial 10 y que aumentará 30 unidades por segundo de simulación, iniciando el aumento desde el arranque de la simulación. Imponiendo 10 segundos de simulación se obtuvo entonces una variación del exceso de aire desde un 10% hasta un 310%.

Los datos reales disponibles, basados en medidas realizadas en la caldera en funcionamiento, corresponden a valores de Exceso de Aire y %O₂ a la salida de la chimenea. Los resultados obtenidos fueron, en el caso de la composición de los humos de combustión:



Gráfica de Exceso de Aire vs. %O₂, %CO₂ y %CO en humos

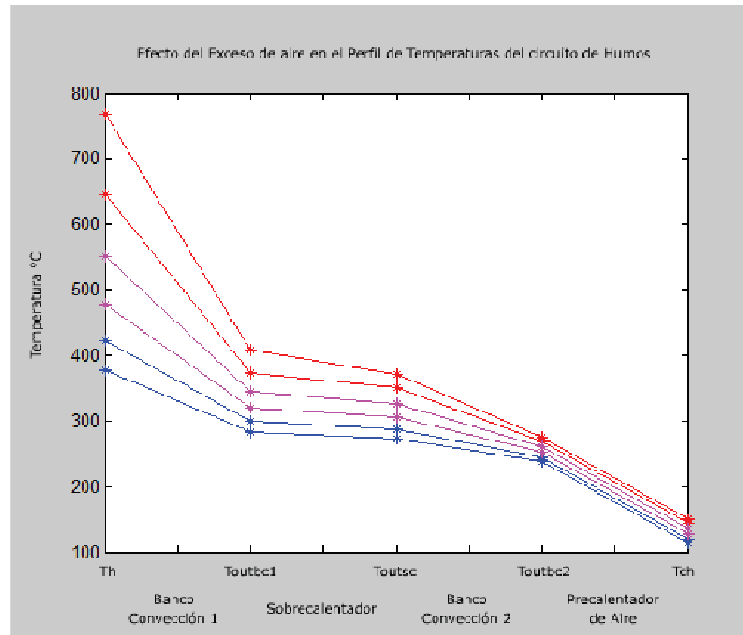
Donde la curva magenta corresponde al %CO₂, la curva negra al %CO y la azul al %O₂ la cual será el punto de comparación con la realidad, siendo ésta la curva roja. Considerando que se desconocía el análisis último del combustible empleado realmente, es un resultado alentador ya que se obtuvo alrededor de un 5% de error relativo promedio. En lo que respecta al *Gasto de Vapor* se obtuvieron resultados lógicos, como se puede apreciar en la siguiente gráfica.



Gráficas de Exceso de Aire vs. Gasto de Vapor

Considerando las simplificaciones tomadas para la modelación, los resultados son los esperados para una caldera bajo estas condiciones. Sin embargo, la tendencia de esta curva no es del todo precisa y puede ser mejorada, por ejemplo, si también se variase el valor de DT del precalentador. Para ilustrar la necesidad de este cambio se observa una gráfica del perfil de temperaturas del circuito de humos y como se ve afectado por la variación del exceso de aire.

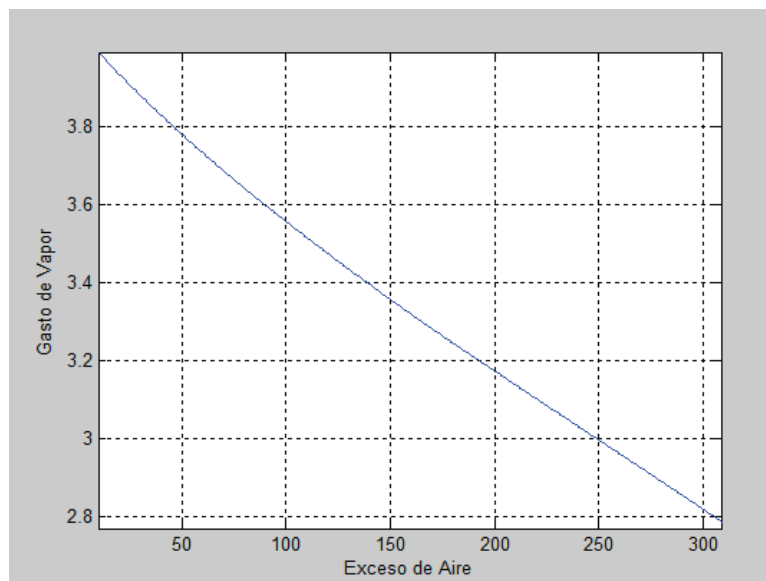
De arriba hacia abajo, las curvas corresponden a 10%, 70%, 130%, 190%, 250% y 310% de exceso respectivamente.



Perfil de temperaturas del circuito de humos para distintos Excesos de Aire

Por cómo se simuló el Pre-calentador de aire, las curvas que representan el paso por ese dispositivo resultaron de pendiente constante, cosa que se aleja de la realidad y de los otros dispositivos, donde vemos que la variación de temperatura va mermando a medida que aumenta el exceso. Para lograr este efecto se recurrió entonces a cambiar la entrada Constante de DT por una rampa de pendiente -4 y valor inicial 150 .

El gasto de vapor resultante presentará la siguiente gráfica.



Exceso de Aire vs. Gasto de Vapor mejorado

La mejora de la simulación del pre-calentador de aire resulta en una curva más realista del Gasto de Vapor, donde se aprecia una tendencia más lineal que la obtenida anteriormente,

ajustándose más con lo esperado en la realidad. Tras estos resultados es posible concluir que la simulación de la caldera real de quema directa de leña ha arrojado resultados satisfactorios.

4 Conclusiones

En lo que respecta a la simulación de sistemas de generación de vapor reales, los resultados obtenidos fueron satisfactorios, obteniéndose valores lógicos y con diferencias adjudicadas a las simplificaciones que se llevaron a cabo en el modelado. En el caso de la caldera de quema directa estudiada, se observó en primera instancia que el gasto de vapor simulado era lógico pero con posibilidades de mejorar su tendencia. Para lograr esto se recurrió a incrementar la precisión de la simulación del pre-calentador de aire, acortando la variación de temperatura de los humos en el trayecto a medida que aumentaba el exceso. Con esto se logró una excelente simulación de la tendencia de la curva resultante del gasto de vapor, y los valores de la misma corresponden a lo esperado en una caldera bajo estas condiciones.

Se demostró también la versatilidad del simulador, siendo este capaz de trabajar con distintos tipos de calderas de variadas configuraciones y combustibles. La posibilidad de tener a disposición las partes que componen a la caldera y armar el modelo según las necesidades mediante una interfaz gráfica como Simulink, permite que cualquier persona con un nivel normal de conocimiento de estos sistemas pueda experimentar distintas alternativas de construcción y observar los resultados de manera inmediata, dándole un importante potencial académico al simulador.

En resumen, los bloques desarrollados para la modelación de calderas resultan una herramienta eficaz para la simulación de estos sistemas. Presenta una utilidad importante en el área académica, ya que permite la visualización inmediata de los efectos de los distintos parámetros y configuraciones posibles en una caldera, logrando resultados gráficos mediante su combinación con MATLAB. Al momento de simular calderas reales se deberá tener en consideración el efecto de las simplificaciones empleadas en los modelos, pero los resultados no dejan de ser útiles como una herramienta orientativa para el análisis de estos sistemas o incluso como un posible medio de capacitación. El resultado del proyecto será entonces un buen primer paso para la simulación de los sistemas de generaciones de vapor, habiéndose creado un instrumento eficaz mediante una interfaz atractiva y simple de usar.

5 Bibliografía

1. INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall, 1999.
2. THOMASSET, C.W.; *Pequeño Manual del Foguista*. 2008.
3. BALDRIZ, M.; *Curso de Máquinas II*. Universidad de Montevideo, 2007.
4. BARRETO, W.; *Calderas, Vapor y Foguistas*. 2005.
5. BALDRIZ, M.; *Curso de Transferencia de Calor*. Universidad de Montevideo, 2007.