Hipótesis realizadas sobre el funcionamiento de la cámara de combustión.

En la presente sección se establecerán las hipótesis realizadas sobre comportamiento real de la Cámara de Combustión para hacer posible la construcción del modelo aproximado que formará parte del conjunto completo de la Turbina de Gas.

Con dichas hipótesis se pretende pasar de un comportamiento, que en la realidad es extremadamente complejo, dependiente de multitud de variables, a una aproximación que lo modelará en función de un número de variables mucho menor, en muchos de los casos de carácter global, lo que permitirá la utilización de ecuaciones mucho más simples, que al final aproximarán bastante al comportamiento real.

1. Hipotesis básicas.

A continuación se presentan una por una las hipótesis realizadas sobre el comportamiento tanto de la cámara de combustión como de los gases que circulan a través de ella.

Corrientes de entrada a la cámara de combustión.

Antes de hacer ninguna hipótesis sobre el funcionamiento propiamente dicho de la cámara de combustión, habrá que imponer cuales serán las corrientes de fluidos que alimentaran a ésta. Estas corrientes serán tres:

1. Aire de alimentación (aire seco y vapor de agua.).
2. Combustible.
3. Vapor de agua para control de emisiones NO_x .

Las condiciones del aire de alimentación (presión y temperatura) vendrán determinadas por el dispositivo al que se encuentre conectada aguas arriba la cámara de combustión, generalmente un compresor. Las condiciones del vapor de agua vendrán impuestas por el dispositivo del que es tomado dicho vapor, por ejemplo la purga de una turbina de gas. En cuanto al combustible, sus condiciones y composición se tratan mas adelante.

Composición del Combustible.

El combustible utilizado en la cámara de combustión podrá ser líquido o gaseoso, y tener una composición química más o menos conocida y compleja. En este modelo se hará la hipótesis de que las características químicas del combustible vendrán determinadas por la composición en peso de tres elementos fundamentales: C, H₂, S en base seca. De esta manera el modelo elimina la necesidad de conocer los tipos de sustancias químicas (hidrocarburos, sulfuros, etc.) que se encuentran formando dichos elementos fundamentales dentro del combustible, así como la existencia de otros elementos o sustancias químicas que por su pequeña concentración se considerarán despreciables dentro del proceso de combustión.

Del mismo modo, desde el punto de vista termodinámico, las características del tipo de combustible utilizado vendrán englobadas en el poder calorífico, siendo éste independiente de las condiciones de presión y temperatura a las que se encuentre el combustible.

De esta manera, a la hora de introducir un tipo de combustible u otro dentro del modelo, las únicas magnitudes que habrá que conocer serán:

1. % en peso de C en el combustible.
2. % en peso de H₂ en el combustible.
3. % en peso de S en el combustible.
4. Poder calorífico del combustible.

Con estos valores se introducirá en el modelo toda la información necesaria acerca del combustible.

Combustión Completa.

Una vez realizadas las hipótesis anteriores sobre la composición del combustible utilizado, habrá que hacer un análisis sobre que es lo que ocurre con dicho combustible una vez que es inyectado dentro de la cámara de combustión.

En principio siempre se supondrá que la temperatura en la cámara de combustión es la suficiente, por lo menos en la zona en la que se produce la combustión, para que no se produzcan problemas de ignición del combustible. Además también se dará por supuesto que el proceso de inyección se produce correctamente, provocando que la mezcla entre el aire necesario para la combustión y el combustible, sea perfecta.

Ante estas hipótesis iniciales se concluirá que el proceso será perfecto y se supondrá que la combustión será completa, es decir, que las reacciones que se producirán dentro de la cámara serán:

1. $C + O_2 \rightarrow CO_2$.
2. $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$.
3. $S + O_2 \rightarrow SO_2$.

Consumiéndose en dichas reacciones todos los reactivos, siendo los productos de reacción, en relación con el balance másico-energético: CO_2 , H_2O , SO_2 , O_2 de exceso y N_2 del aire. Evidentemente existen otros productos de combustión como: CO , NO , NO_2 , N_2O , hidrocarburos disociados, etc., pero su proporción en la mezcla será tan baja que no se comete un gran error al ignorar su existencia en el balance másico-energético que se realizará en la cámara de combustión.

Adiabaticidad de la cámara de combustión. Rendimiento de la cámara.

Una vez analizadas las hipótesis sobre como se produce el proceso de combustión, habrá que establecer algunas otras sobre como influye, desde el punto de vista termodinámico, el lugar concreto donde se produce ésta sobre las variables globales del proceso. Es decir, como interviene la cámara de combustión en las interacciones entre la reacción y el exterior.

La experiencia dice que en el proceso real la cantidad de calor intercambiada con el exterior es despreciable, por lo que el proceso dentro de la cámara de combustión puede ser considerado adiabático.

A la hora de evaluar la eficiencia del proceso de combustión definiremos el rendimiento de la cámara de combustión como el cociente entre el incremento de entalpía real producido en la reacción, y el incremento de entalpía que se produciría si el proceso fuera ideal. Y el proceso se consideraría ideal si la cámara fuera adiabática y la combustión fuera completa, hipótesis que ya han sido realizadas, con lo que la introducción del rendimiento de la cámara servirá para corregir un poco los posibles errores cometidos con la introducción de las anteriores hipótesis.

La determinación teórica del rendimiento de la cámara de combustión es un problema extremadamente complejo por lo que en la realidad se suele recurrir a la experimentación y al uso de correlaciones semiempíricas. En el caso del modelo presentado el rendimiento será introducido junto con otros parámetros de funcionamiento de la máquina.

Energía cinética de la corriente de gases.

Desde el punto de vista termodinámico, a la hora de realizar el balance de entalpías que permita la obtención de las variaciones de temperatura que se produzcan dentro de la cámara, habrá que determinar la energía cinética del flujo en cada sección de ésta, ya que se tendrán que hacer balances de entalpías de remanso. Para eliminar la incomodidad de tener en todo momento controlado el valor de la energía cinética, se supondrá que el valor de dicha energía permanecerá constante en cada sección de la cámara, con lo cual, al plantear las ecuaciones de balance, se cancelarán los términos de las energías cinéticas de ambos miembros.

Zonificación de la cámara de combustión.

De cara al funcionamiento global de la turbina de gas, lo que necesita saber el modelo, de lo que ocurre dentro de la cámara de combustión, son los balances másicos y entálpicos entre determinadas secciones que permitirá conocer en cada momento, la composición másica del flujo, y las variaciones de temperatura producidas respectivamente. A partir de este planteamiento, habrá que definir cuales son las variables del proceso interno de la cámara de combustión que es necesario conocer, bien para la conexión de dicha cámara aguas abajo con otros dispositivos, bien para la regulación del propio funcionamiento de ésta.

Así, para determinar las variables del flujo de salida de la cámara, que servirán de variables de entrada a cualquier dispositivo conectado posteriormente, probablemente una turbina, solo hará falta realizar un balance tanto másico como entálpico de carácter global, entre las secciones de entrada y de salida, obteniendo de este modo la composición de la corriente y la temperatura de salida.

En cuanto a las variables internas, será necesario controlar la temperatura máxima que se produce dentro de la cámara, ya que de ésta dependerá el nivel de formación de los únicos contaminantes cuyos niveles habrá que controlar, los NO_x . Por lo tanto habrá que realizar alguna hipótesis sobre como se desarrolla la reacción de combustión dentro de la cámara, ya que de esto dependerá la temperatura máxima alcanzada.

Así desde este momento modelaremos la cámara de combustión como un volumen dividido en dos zonas: Zona 1 y Zona 2.

En la Zona 1 se producirán al completo las reacciones de combustión en condiciones estequiométricas, de tal manera que el aire que entra en dicha zona será solo y exclusivamente el necesario para que se produzcan al completo las reacciones anteriormente relacionadas. De todas formas el modelo permite la posibilidad de

introducir un exceso de aire en esta zona. Es aquí además donde será introducida la inyección de vapor de agua.

Una vez el flujo sale de la Zona 1, se mezclará con el resto del aire que no ha sido utilizado en la reacción, reduciéndose así la temperatura. Hay que indicar además que una vez que se sale de la Zona 1 las reacciones han cesado, habiendo desaparecido por completo los elementos que originalmente formaban parte del combustible. Así en la Zona 2 lo único que se producirá será una transferencia de calor entre el flujo proveniente de la Zona 1 y el aire de exceso que no ha atravesado dicha zona.

Por lo tanto, un balance másico de la Zona 1 determinará los gastos de los productos de combustión. Mientras que de un balance entálpico de dicha zona se obtendrá la temperatura máxima alcanzada en la cámara de combustión.

Así mismo, de un balance másico que engloba a las dos zonas se obtendrán los gastos de salida, y un balance entálpico determinará la temperatura de salida de la corriente.

El modelo aproximado que se ha introducido, aunque es bastante simple no se aleja demasiado de lo que ocurre en la realidad, por lo se ha desestimado profundizar en el modelo, ya que dicho trabajo no se vería compensado con la mejora de la exactitud alcanzada.

Pérdidas de presión en la cámara de combustión.

Como consecuencia del calentamiento del flujo y de la fricción se produce una pérdida de presión entre la entrada y la salida de la cámara de combustión. La pérdida de presión dependerá de multitud de parámetros de tipo geométricos, de flujo, etc. Para la evaluación de dicha pérdida el modelo hará uso de una correlación empírica proporcionada por la bibliografía, cuyos coeficientes serán introducidos como parámetros de funcionamiento de la cámara de combustión.

Extinción de la llama.

El soplado de la llama se produce cuando variaciones en el gasto másico a través de la cámara de combustión, manteniendo relativamente constante el dosado, provocan una velocidad excesiva del flujo de gases, hasta llegar al punto en el que dicha velocidad es mayor que la velocidad de propagación de la llama, lo que hace que ésta se extinga.

En el modelo aproximado se elimina este fenómeno, dada la complejidad de su introducción. Esta hipótesis será considerada completamente válida dentro del rango

de variación de flujos másicos en el que vamos a trabajar. Dicho rango de trabajo no justifica la introducción del modelado del soplado de la llama, ya que siempre nos encontraremos en zonas bastante alejadas de aquellas en las que se pudiera producir el fenómeno descrito.

Del mismo modo se puede producir la extinción de la llama con gastos másicos relativamente constantes. Esto ocurre cuando se producen variaciones del dosado. Existe un límite tanto superior como inferior para el dosado entre los cuales la llama, dentro de la cámara, es estable, o lo que es lo mismo, si son superados algunos de los dos límites, rico o pobre, la llama se extinguirá. En el modelo realizado se ha supuesto que para todo gasto másico las variaciones del dosado se encuentran dentro del intervalo de estabilidad de la llama. Hipótesis bastante cercana a la realidad, dado que, como se ha dicho anteriormente, la zona normal de trabajo estará alejada de dichos límites

Emisiones de NO_x.

Del análisis teórico del proceso de combustión queda claro que el principal parámetro que gobierna la emisión de contaminantes es la temperatura de la zona primaria y, en menor medida, el tiempo de residencia y grado de mezcla. Se supondrá a partir de ahora que el único parámetro que gobernará las emisiones de NO_x será la temperatura máxima en la cámara de combustión, que coincidirá con la que se alcanza en la Zona 1. Por lo tanto el grado de emisión de dicho contaminante se podrá controlar limitando la temperatura de la Zona 1.

De los datos experimentales consultados obtenemos que las emisiones de NO_x se disparan a partir de los 2000 K, por lo que simplificamos el control de las emisiones a limitar la temperatura máxima a dicho nivel.