

Capítulo 4: Sistema de Regulación de la Turbina de Gas.

El sistema general de regulación de la turbina de gas tendrá la misión de velar por el perfecto funcionamiento de la máquina, haciendo que ésta se adecúe a las solicitudes a las que se encuentre sometida en cada momento. Así como evitar que el funcionamiento de la máquina llegue a situaciones límites no deseables que pudieran poner en peligro la durabilidad tanto de la máquina como de los elementos e instalaciones a las que se encuentre conectada.

El diseño de todo sistema de regulación parte de una serie de variables que hay que controlar (variables a regular), y utiliza para ello otras variables sobre las que actúa (variables de actuación). También deberá tener en cuenta la existencia de situaciones potencialmente no deseables que deberá de evitar utilizando también las variables de actuación.

Por tanto, el primer paso a la hora de diseñar el sistema de regulación será la identificación de las variables a regular y de las situaciones no deseables. Una vez hecho esto habrá que localizar las posibles variables de actuación y determinar de qué manera afectan éstas a las anteriores.

Es en esta información en la que se basa un buen sistema de regulación. La realización de un estudio concienzudo de las relaciones existentes entre variables a regular y variables de actuación es la clave para un diseño que cumpla con los objetivos fijados con la mayor eficacia.

1. Determinación de las variables a regular.

Para la realización de esta tarea, habrá que tener una idea clara de dónde se encuentra situada la turbina de gas, a que elementos se encuentra conectada y para qué tipo de servicio ha sido diseñada.

Siguiendo la línea marcada desde el principio en el presente proyecto, se considerará que la turbina forma parte de una planta de generación de energía eléctrica mediante un ciclo combinado de gas y vapor. Así la turbina tomará aire del ambiente y su escape se encontrará conectado a una caldera de recuperación. Además estará acoplada a través de su eje con un alternador que convertirá la energía mecánica generada por ésta en energía eléctrica.

Por todo esto, las principales solicitudes externas que la máquina deberá de cumplir serán la generación de la potencia demandada por el alternador así como mantener un cierto nivel de temperatura en los gases del escape.

A parte de estas solicitudes principales habrá otras magnitudes cuyos valores deberán ser controlados. Así, por ejemplo, el sistema de regulación deberá de procurar que la variación de la velocidad de giro de la turbina quede dentro de unos determinados límites, ya que al estar conectada a un alternador, la velocidad de giro vendrá siempre marcada por la frecuencia de la red a la que se encuentre conectado el alternador, generalmente 50Hz. Además otra magnitud a controlar será la del nivel de emisiones de NO_x que, como ya se ha dicho, estará directamente relacionado con la temperatura máxima de la cámara de combustión. En este sentido el sistema de regulación se ocupará de limitar dicha temperatura máxima a 2000 K.

De la reiterada utilización del modelo surge un nuevo problema, el acercamiento del punto de funcionamiento del compresor a zonas inestables, como son las zonas de bombeo y de bloqueo. Estos dos fenómenos asociados al funcionamiento anómalo del compresor hacen, cuando el punto de funcionamiento se acerca a ellos, que la turbina de gas deje de comportarse como es esperado siendo ésta incapaz de satisfacer las demandas que le son impuestas del exterior. Por ello el sistema de regulación, en este sentido tendrá que garantizar que no se llegue a esas situaciones.

Una vez determinadas todas las posibles variables y situaciones que hay que controlar para el buen funcionamiento de la máquina, queda señalar cuales son las posibles variables con las que el sistema de regulación podrá contar para conseguir sus objetivos. Estas variables serán aquellas cuyos valores habrá que imponer exteriormente de manera necesaria y suficiente para que la turbina de gas pueda funcionar. Evidentemente se podrán utilizar diferentes grupos de variables de actuación, no teniendo por que ser necesario la utilización de todas. De hecho algunas variable externas tienen valores que no puede variar un sistema de regulación, por ejemplo la temperatura de admisión del aire, que dependerá de las condiciones meteorológicas. Así se pretenderá utilizar un grupo de variables lo más reducido posible, simplificando de esta manera el propio sistema de regulación.

A continuación se detallarán las relaciones existentes entre las variables a controlar y las de actuación tomadas para hacerlo. También se acompaña del correspondiente diagrama de bloques utilizado en el modelo creado.

2. Regulación de la potencia generada y de la velocidad de giro.

Está clara la relación existente entre la potencia que da la máquina y la velocidad de giro del eje de la misma. Cuando se produce una variación de la potencia demandada por el alternador, el desequilibrio que se produce entre potencia demandada y generada, provoca que la velocidad del eje varíe, aumentando cuando cae la demanda y disminuyendo cuando ésta aumenta. La magnitud de la variación de la velocidad dependerá de la importancia de la perturbación de la demanda así como de la inercia del eje de la turbina.

Por lo tanto, toda actuación encaminada a equilibrar las potencias lo estará también a estabilizar la velocidad de giro, si bien no teniendo porqué hacerlo en el valor impuesto por la frecuencia de la red. Sin embargo, una actuación del sistema de regulación encaminada a llevar a la velocidad de giro al valor impuesto, si acarreará el equilibrio de potencias.

Por ello ambas magnitudes, velocidad de giro y potencia, van a ser reguladas mediante un solo sistema de actuación. Dicho sistema tomará como variable de actuación el gasto de combustible (mf). La manera de actuar será simple: un lazo de realimentación con el correspondiente controlador PID, tomando como valor de consigna de la velocidad de giro el impuesto por la red.

El diagrama de bloques se presenta a continuación:

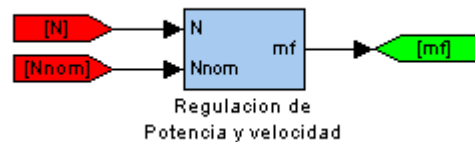


Figura 4.1: Diagrama de bloques de regulación de potencia y velocidad de giro.

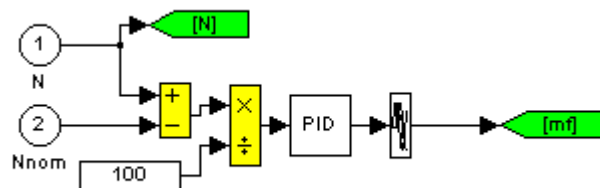


Figura 4.2: Diagrama de bloques de regulación de potencia y velocidad de giro. (Interior)

Así pues, la respuesta del sistema ante un aumento de la demanda de potencia con la caída de velocidad asociada, será la de aumentar la cantidad de combustible quemado consiguiendo un aumento de la potencia producida por la máquina y la consiguiente recuperación de velocidad.

3. Regulación de la temperatura de escape de la turbina.

Como ya se ha dicho, la regulación de la temperatura de escape es fundamental para una turbina que se encuentra instalada en una planta de ciclo combinado, ya que de alguna manera hay que garantizar un flujo mínimo de calor hacia la caldera de recuperación.

La temperatura de escape depende literalmente de todo lo que ocurre en la máquina, ya que es el resultado de lo que ocurre, es la salida final. Para la regulación en este caso se tomará como variable de actuación al gasto de aire (mA). Así ante hipotéticas caídas de la temperatura de escape, una disminución del gasto de aire provocará un aumento del dosado que acarreará un aumento de la temperatura.

A continuación se presenta el diagrama de bloques que se encarga de realizar la función de regulación de la temperatura de escape:

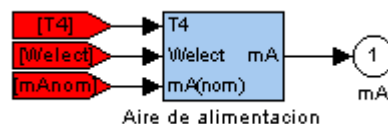


Figura 4.3 : Diagrama de bloques de regulación de la temperatura de escape.

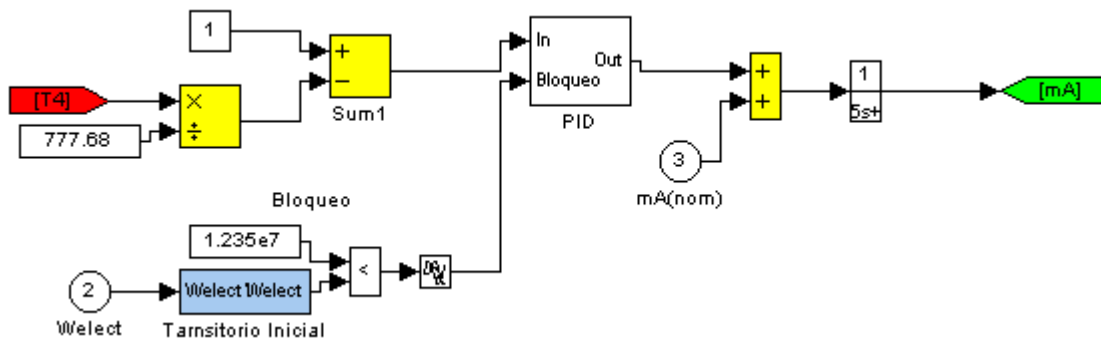


Figura 4.4: Diagrama de bloques de regulación de la temperatura de escape.

El diseño peculiar del controlador PID, cuya respuesta dependerá de la existencia de zona de bloqueo, se verá mas adelante cuando se vea precisamente la regulación en zona de bloqueo.

4. Regulación de las emisiones de NO_x.

Entre las hipótesis realizadas sobre el comportamiento de la cámara de combustión, se ha dicho que las emisiones de óxidos de nitrógeno dependerán tan solo de la temperatura máxima alcanzada en la cámara. Dicha temperatura se encuentra

localizada en la zona primaria de la cámara. Así pues, regular la temperatura máxima implicará regular las emisiones de NO_x .

Pero para hacerlo así, primero habrá que determinar qué temperatura se va a utilizar como valor de consigna para limitar las emisiones. Para ello se toma la gráfica presentada en la figura 3. en la que se refleja la relación existente entre temperatura y emisiones.

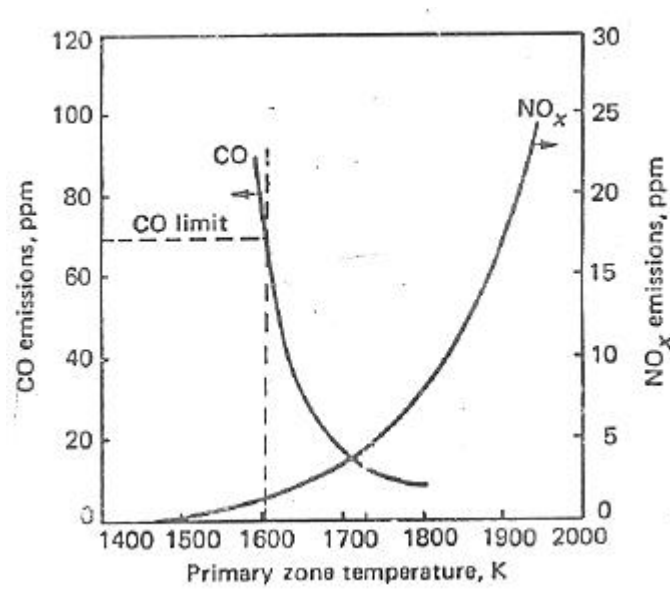


Figura 4.5 : Representación de la dependencia de las emisiones de NO_x con la temperatura máxima.

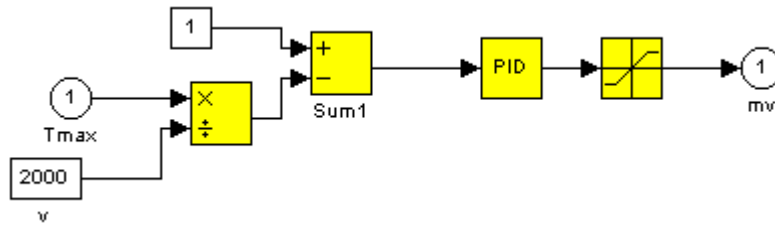
Extrapolando los datos presentados en la figura se ha tomado la decisión de fijar las emisiones máximas de NO_x a 50ppm lo que implicaría una temperatura máxima de unos 2000 K.

Quedaría ahora ver con que se va regular dicha temperatura. Pero para ello cuenta la cámara de combustión con una entrada de vapor de agua. Así la actuación del sistema de regulación estará clara, ante un aumento de la temperatura, el sistema hará que aumente el gasto de vapor provocando de nuevo la disminución de temperatura. Toda esta actuación se realizará mediante lazo de realimentación utilizando para la señal controladores PID.

El diagrama de bloque del sistema se muestra a continuación:



Figura 4.6: Diagrama de bloques del sistema de regulación de las emisiones de NO_x

Figura 4.7 : Diagrama de bloques del sistema de regulación de las emisiones de NO_x (Interior)

5. Regulación de la zona de bombeo.

Se comienza haciendo una pequeña introducción sobre cómo se presenta el fenómeno del bombeo en el modelo realizado. Para ello habrá que comenzar recordando que el fenómeno de bombeo afectará al funcionamiento del compresor de una manera severa, provocando caídas del rendimiento de éste y un aumento de la potencia consumida por el mismo. Por lo tanto, evitar que las condiciones de funcionamiento provoquen la aparición de dicho fenómeno, será fundamental en los objetivos del sistema de regulación del modelo presentado.

Tomando como referencia situaciones en las que la variación sobre un hipotético estado estacionario de funcionamiento es perturbado por la modificación de la potencia demandada a la máquina, el fenómeno de bombeo se produce de la siguiente manera.

Cuando la potencia demandada disminuye, el sistema de regulación de potencia responde reduciendo el gasto de combustible. Con esto se pretende disminuir la potencia producida, pero a la vez se provoca una caída de la temperatura de escape de la máquina. Consecuentemente, el sistema de regulación de la temperatura de escape actúa disminuyendo el gasto de aire de alimentación, acercándose el punto de funcionamiento a la zona de bombeo.

Una vez que el punto de funcionamiento entra en dicha zona, el rendimiento del compresor comenzará a caer y de paso la potencia de la máquina, con lo que no será posible satisfacer la demanda de potencia origen de la sucesión de efectos relatada.

Sistema de regulación.

Como consecuencia de todo lo anterior, habrá que diseñar un sistema de regulación que detecte la cercanía de la zona de bombeo. Una vez detectada dicha cercanía habrá que decidir como actuar, para lo cual como siempre habrá varias alternativas.

La diferencia esencial entre las alternativas existentes proviene de un hecho fundamental, y es que una vez que el punto de funcionamiento se encuentre en la zona límite de bombeo, habrá que tomar la decisión de dejar de regular algunas de las magnitudes que hasta ese momento lo estaban siendo. Y es que sería imposible impedir la entrada en la zona de bombeo y a la vez seguir regulando todas las variables de funcionamiento. Por lo tanto cada una de las alternativas se diferenciará en la magnitud que se deje de regular.

En consecuencia las alternativas a tener en cuenta para impedir la aparición del fenómeno de bombeo serán:

1. **Limitar la inyección de combustible en el momento en el que se alcance la zona de bombeo.** Con ello se consigue evitar la sucesión de eventos relatados anteriormente, y fundamentalmente seguir manteniendo los niveles de temperatura de escape exigidos. Como contrapartida quedará limitada consecuentemente la potencia mínima producida, con lo que será imposible satisfacer una demanda menor de potencia.
2. **Limitar el gasto de aire de alimentación.** Así se conseguirá satisfacer la demanda de potencia en todo momento. Como contrapartida se deja de regular la temperatura de escape.

Antes de seguir es importante hacer notar que en ningún momento se ha planteado la posibilidad de variar la velocidad de giro. Se podrían obtener buenos resultados permitiendo dicha variación, pero recordar que mantener constante la frecuencia de la corriente generada en el alternador es premisa fundamental.

A la vista de las alternativas planteadas se toma la decisión de regular la aparición de bombeo mediante la segunda opción.

El sistema de regulación del bombeo, se basará primero en ecuacionar la curva que determina la zona de bombeo en las curvas del compresor. Una vez el punto de funcionamiento alcance dicha zona se actuará sobre el sistema de regulación de la temperatura de escape paralizando su función y manteniendo el valor constante límite del gasto de aire antes de superar la curva de bombeo. En definitiva se trata de inhibir de su función al sistema de regulación de la temperatura de escape, una vez que el punto de funcionamiento del compresor alcanza la curva de bombeo.

Sin embargo, este sistema se muestra del todo ineficiente, lo que lleva de nuevo a producirse el fenómeno del bombeo. Por lo tanto, habrá que plantear la cuestión desde otro punto de vista y suponer que la turbina de gas no será capaz de satisfacer

la demanda propuesta por la red eléctrica una vez que el punto de funcionamiento rebasa la curva de bombeo.

Por ello la alternativa será la de que la máquina alcance un nivel mínimo de producción de potencia, y a partir de ese momento se limite de alguna forma la demanda soportada, para evitar desequilibrios en el eje de la turbina que provoquen una caída de la velocidad de giro inaceptable.

Primera prueba de regulación.

Para la consecución del objetivo planteado anteriormente, se toma la decisión de que el sistema de regulación se estructure de la siguiente manera:

1. Detección de la zona de bombeo: Se impone que el sistema de regulación comience a funcionar cuando, para un determinado valor del gasto corregido, la relación de compresión alcance un valor igual al 95% del valor de la línea de bloqueo para dicho valor del gasto corregido.
2. Actuación del sistema de regulación: Una vez detectada la zona de bombeo, el sistema intenta bloquear los sistemas de regulación de potencia y de temperatura de escape, para intentar así que el punto de funcionamiento permanezca constante una vez alcanzado el mínimo de la potencia que es capaz de producir. Para esto se utilizarán variables auxiliares, que engañan a los sistemas anteriormente citados, haciéndoles creer que los valores de las variables reguladas son los de consigna, eliminándose de manera inmediata los errores. Todo esto se realiza mediante la función de Matlab **regbombeo**.

Estas medidas deberían ser suficientes para conseguir que el punto de funcionamiento permaneciera constante, una vez superada la zona de bombeo. Pero esto no es lo que ocurre una vez realizada la correspondiente simulación, ya que el punto de funcionamiento sufre variaciones debido a las posibles inercias del sistema.

Segunda prueba de regulación.

Dado que los resultados obtenidos con el anterior sistema de regulación no fueron todo lo satisfactorios que se deseaba, se toma otra alternativa totalmente distinta. Dicha alternativa consiste en limitar la potencia producida y el gasto másico de aire a un cierto valor. Para la determinación de dichos valores, se recurre a observar cuales son los valores mínimos admisibles para dichas variables antes de que se produzca el fenómeno de bombeo. Los valores obtenidos son:

- Potencia producida mínima: **$W_{total} = 13.66e6 \text{ W}$** .

- Gasto másico de aire mínimo: **$m_A = 67.56 \text{ kg/s}$** .

Por lo tanto, el bombeo ya no se producirá. Lo que ocurre en realidad es que se limita la potencia mínima que es solicitada a la máquina. Así el sistema de regulación de potencia seguirá funcionando de manera normal, ajustándose a las nuevas condiciones.

6. Regulación del bloqueo del compresor.

El fenómeno del bloqueo aparece cuando en alguna sección del compresor se alcanza la velocidad del sonido, quedando por lo tanto el gasto másico limitado. En esas condiciones el gasto de aire no podrá aumentar más aunque las solicitudes lo requieran. Este fenómeno viene reflejado en las curvas del compresor mediante la línea límite de bloqueo, por debajo de la cual no podrá situarse el punto de funcionamiento.

El fenómeno de bloqueo se produce de la siguiente manera. Cuando la potencia demandada aumenta, el sistema de regulación de potencia responde aumentando el gasto de combustible. Con esto se pretende aumentar la potencia producida, pero a la vez se provoca un aumento de la temperatura de escape de la máquina. Consecuentemente, el sistema de regulación de la temperatura de escape actúa aumentando el gasto de aire de alimentación, acercándose el punto de funcionamiento a la zona de bloqueo.

Una vez que el punto de funcionamiento entra en dicha zona, el rendimiento del compresor comenzará a caer y de paso la potencia de la máquina, con lo que no será posible satisfacer la demanda de potencia origen de la sucesión de efectos relatada.

Pero surge un nuevo inconveniente, la limitación del flujo máximo de aire provoca que no se pueda satisfacer la regulación de la temperatura de escape, provocándose un error durante todo el periodo de regulación del bloqueo. Este error permanente provoca la saturación del término integral del regulador PID de la temperatura de escape, lo que produce que, una vez superada la zona de peligro de bloqueo, se produzca una señal errónea sobre el gasto de aire. Esto se ve reflejado en que una vez se retorna a las condiciones de diseño, el gasto de aire seguirá en el nivel máximo limitado anteriormente, no volviendo a su valor normal hasta que transcurre una cierta cantidad de tiempo, tiempo necesario para anular toda la señal integral acumulada.

Después de esto es necesaria una modificación en el sistema estudiado, modificación que se ve a continuación. La modificación que se propone es poner a cero el valor del error que llega al termino integral, una vez se alcanza la zona de bloqueo. Esta solución se convierte en definitiva una vez realizada la consiguiente simulación. A continuación se muestra la modificación sobre un controlador PID convencional para la eliminación del error:

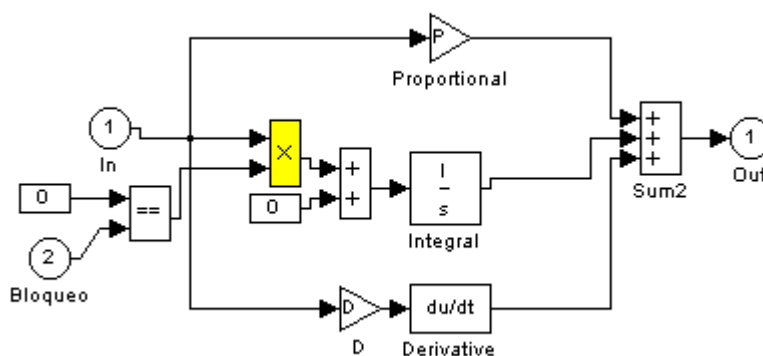


Figura 4.8: Diagrama de bloques del controlador PID para gasto de aire.

7. Resumen del sistema de regulación.

En la siguiente tabla se resumen las relaciones existentes entre variables a regular y las variables de actuación.

Variables a regular	Variables de actuación	Relación
Potencia y velocidad.	Gasto de combustible.	Directa.
Temperatura de escape.	Gasto de aire.	Inversa.
Temperatura máxima.	Gasto de vapor.	Inversa.
Bombeo.	Potencia generada.	Valor mínimo.
Bloqueo.	Potencia generada.	Valor máximo.

Tabla 4.1: Resumen de relaciones entre variables.

A continuación, en la tabla 4.2 se muestran las entradas al sistema de regulación, y las salidas:

Entradas		Salidas	
Velocidad de Giro.	N	Gasto de combustible.	mf
Potencia demandada.	Welect	Gasto de Aire.	mA

Temperatura de escape.	T4	Gasto de vapor inyectado.	mviny
Temperatura máxima.	Tmax	Niveles de potencia demandada.	Wdem
Gasto de aire de consigna.	MAnom		

Tabla 4.2. : Resumen de entradas a salidas al sistema de regulación.

Como fin se muestra el bloque que engloba al sistema de regulación completo de la turbina de gas:

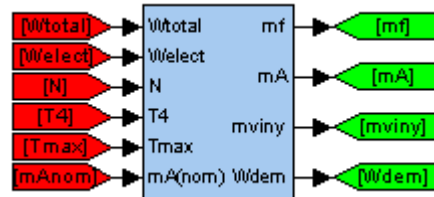


Figura 4.9. : Bloque sistema de regulación.

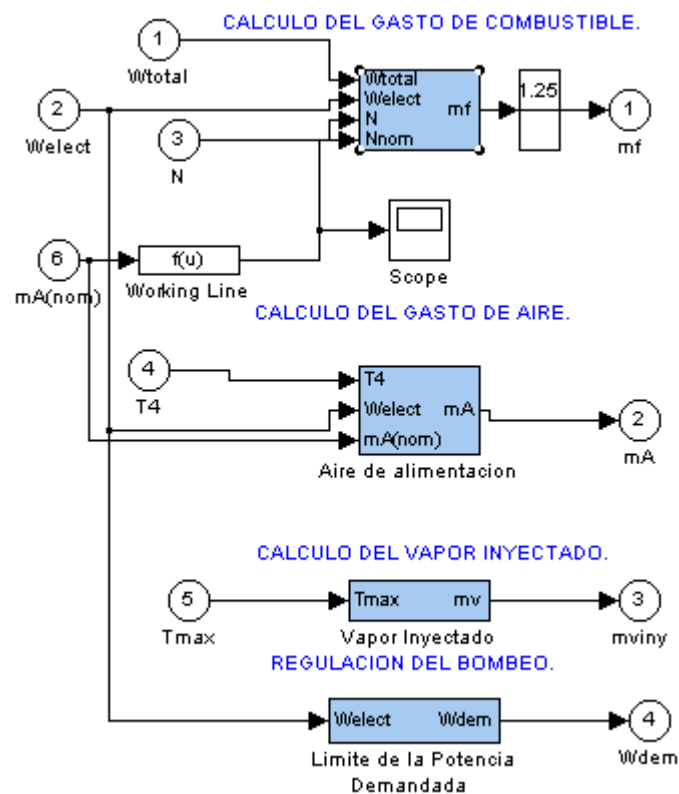


Figura 4.10 : Bloque sistema de regulación (interior).