

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA**

### **(DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE ESTIMATION OF EXHAUST GAS RECIRCULATION IN A SPARK IGNITION ENGINE)**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Ascione Martínez, Daniel  
Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECIRCULACIÓN DE LOS GASES DE ESCAPE EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA**

### **(DEVELOPMENT OF A MODEL FOR THE ESTIMATION OF EXHAUST GAS RECIRCULATION IN A SPARK IGNITION ENGINE)**

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Stefano d'Ambrosio  
Politecnico di Torino

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Crisanto Villalobos  
Universidad Central de Venezuela

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por el Br. Ascione Martínez, Daniel  
Para optar al Título de  
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

**Daniel Ascione Martínez**

**DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA RECIRCULACIÓN  
DE LOS GASES DE ESCAPE EN UN MOTOR DE ENCENDIDO POR CHISPA**

**Tutor académico: Dr. Crisanto Villalobos**

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2013,  
114 pp.**

**Palabras clave:** Sistema de Baja Presión, Recirculación de los Gases de Escape, Consumo de Combustible, Válvula ariposa.

**Resumen.** Este trabajo trata del desarrollo de un modelo computacional que permita controlar la válvula mariposa que regula los gases de escape que son reintroducidos a un motor de encendido por chispa en un sistema de baja presión. Dicho control de la válvula permitirá reducir el consumo de combustible y además reducir las emisiones al medio ambiente producidas por este tipo de motores.

Dentro de la unidad de control del motor ya existían dos métodos para regular la cantidad de gas que pasa a través de la válvula pero estos no permitían obtener gran precisión. Por lo tanto, se realizó una investigación para proponer una solución más viable que permitiese alcanzar una mayor precisión entre los gases que se estiman deben entrar al nuevo ciclo de combustión y los gases que verdaderamente entran al sistema.

Se realizaron pruebas experimentales con una base de datos proporcionada por la Fiat para determinar la precisión del nuevo método propuesto, dicho proceso de verificación fue realizado mediante los software computacionales de Matlab y Modelization Development Strategies (MDS), donde se observó una mayor exactitud en los resultados obtenidos con el nuevo método.

## RESUMEN

### Introducción

Debido a la contaminación ambiental, la industria automotriz es forzada a alcanzar menores emisiones contaminantes, dichos límites son establecidos por los distintos gobiernos a nivel mundial. En años recientes, el uso de la recirculación de los gases de escape en motores Diesel ha contribuido a reducir las emisiones y lograr los límites fijados.

Actualmente se está comenzando a desarrollar en motores de encendido por chispa un sistema que funcione con la recirculación de los gases de escape, que no solamente logra reducir el impacto ambiental si no también simultáneamente reduce el consumo de combustible.

En particular, una de las dos configuraciones que existen del motor para el manejo de la recirculación de los gases es denominada sistema de baja presión, en la cual los gases de escape que serán reintroducidos al motor son tomados después de pasar por la turbina y el catalizador, donde serán combinados con el aire fresco y aspirados en conjunto por el compresor. Por lo tanto, los gases de escape que son reintroducidos se encuentran a baja presión debido al largo recorrido que realizan antes de ser introducidos en el siguiente ciclo de combustión.

Los sistemas de baja presión permiten reintroducir los gases de escape de manera limpia ya que los mismos pasan primero por el catalizador antes de entrar al sistema. Al mismo tiempo, se obtiene una alta eficiencia en el sistema de enfriamiento debido a las bajas temperaturas a la que llegan los gases y una mejor eficiencia de la turbina debido a que existe una mayor energía disponible para la turbina que a su vez se traduce en mayor energía para el compresor.

Entre los problemas o las desventajas que se pueden encontrar en este tipo de sistemas son la respuesta transitoria y el daño del compresor debido a gotas de agua y partículas en los gases de escape.

La recirculación de los gases de escape en los sistemas de baja presión, específicamente en los motores a gasolina permite reducir las pérdidas de regulación a cargas medias; reducir las temperaturas de los gases de escape que se pueden alcanzar para evitar daños en el catalizador y además reducir los niveles de emisiones de NOx.

Con respecto al consumo de combustible, la reintroducción de gases de escape permite mayores beneficios entre un 10 – 20%. Los factores que permiten el mejoramiento en consumo de combustible con el incremento de los gases de escape que son reintroducidos son los siguientes:

- Reducción en el trabajo de bombeo.
- Reducción en las pérdidas de calor transferidas a las paredes del cilindro donde las temperaturas de los gases quemados son reducidas significativamente.
- Reducción en el grado de disociación en las altas temperaturas de los gases de escape donde más energía de combustible puede ser convertida en trabajo efectivo cerca del punto muerto superior.

En la cadena de control para el manejo del sistema de baja presión, módulos computacionales son definidos para llevar a cabo tareas específicas dentro del sistema. Cada módulo es creado usando Simulink, es verificado a través de Modelization Develepment Strategies (MDS) y entonces es introducido en la unidad de control del motor donde será conectado con los sensores correspondientes.

Uno de los módulos responsables para el manejo de los gases que son reintroducidos en la configuración de baja presión es el CEGR módulo, el cual se encarga de controlar la rata de los gases de escape que regresan al motor y el retardo asociado a la duración del viaje de la masa hasta llegar a la válvula mariposa que regula el paso de los gases.

El objetivo principal del módulo CEGR, es definir la presión necesaria antes de entrar a la válvula mariposa que regula los gases de escape que se reintroducen. Además tiene los siguientes objetivos:

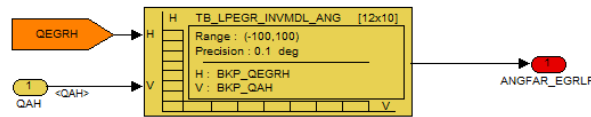
- Regular la rata de gases de escape que se reintroducen, definiendo a su vez el ángulo correcto.
- Establecer los límites (máximos y mínimos de ángulo) para evitar el daño en la válvula mariposa.
- Definir el retardo asociado para el viaje en cada situación posible.

Dentro del módulo CEGR, podemos encontrar dos diferentes secciones que permiten calcular el ángulo de la válvula mariposa que regula los gases que se reintroducen al motor para así introducir la correcta cantidad de gases que se necesite. El primero, es un mapa (denominado “Tabla de baja presión de la recirculación de los gases - Modelo inverso del ángulo”) y el segundo es un bloque (denominado “Mapa de lazo abierto”) compuesto por varios mapas y operaciones. Inicialmente los dos métodos trabajan sin el correspondiente retraso para transportar los gases, el cual es añadido en la parte final como una contribución al ángulo, donde puede ser calculado o introducido como un valor fijo.

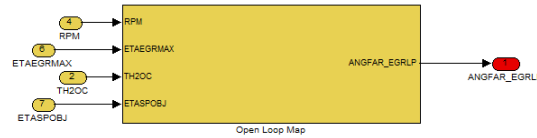
Debido a las dificultades para obtener una relación de ángulo correcta entre la rata de gases que se reintroducen y el ángulo de la válvula, es necesario proponer una alternativa a las técnicas actuales, con el principal objetivo de obtener gran precisión en la cantidad de gases que son necesarios y la cantidad que efectivamente entra al sistema de admisión.

En la siguiente figura (ver Figura 1), existen dos esquemas básicos de los métodos responsables para determinar la rata los gases de escape que se reintroducen / el ángulo de la válvula mariposa que controla el paso de dichos gases y además se encuentra la nueva solución:

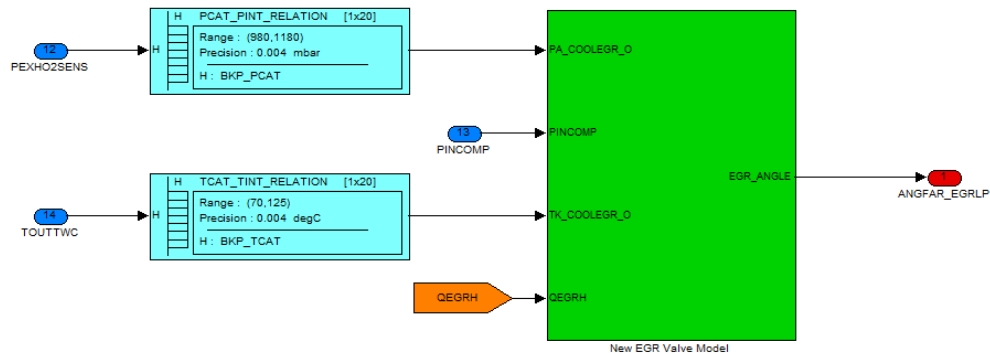
- Tabla de baja presión de la recirculación de los gases - modelo inverso del ángulo
- Mapa de lazo abierto
- Nuevo modelo de la recirculación de los gases



(a) Tabla de baja presión de la recirculación de los gases - modelo inverso del ángulo



(b) Mapa de lazo abierto



(c) Nuevo modelo de la recirculación de los gases

Figura 1. Esquemas básicos de los métodos para determinar la relación entre la rata de los gases de escape que serán reintroducidos y el ángulo de la válvula mariposa

El nuevo modelo de la recirculación de los gases es la solución propuesta por la tesis, aquí se consideran las presiones antes y después de la válvula mariposa, la temperatura de entrada y la rata de los gases de escape que son reintroducidos y que pasan a través de la válvula. Es importante saber que estas entradas no están disponibles en un motor de producción en serie, siendo solamente posible obtener estos datos de entrada en un motor instalado en un banco de prueba; debido a esta dificultad se usaron mapas para simular los datos faltantes, y de esta manera calcular todo en un motor de producción en serie.

En la siguiente figura (ver Fig. 2) se encuentra un esquema general de este nuevo modelo:

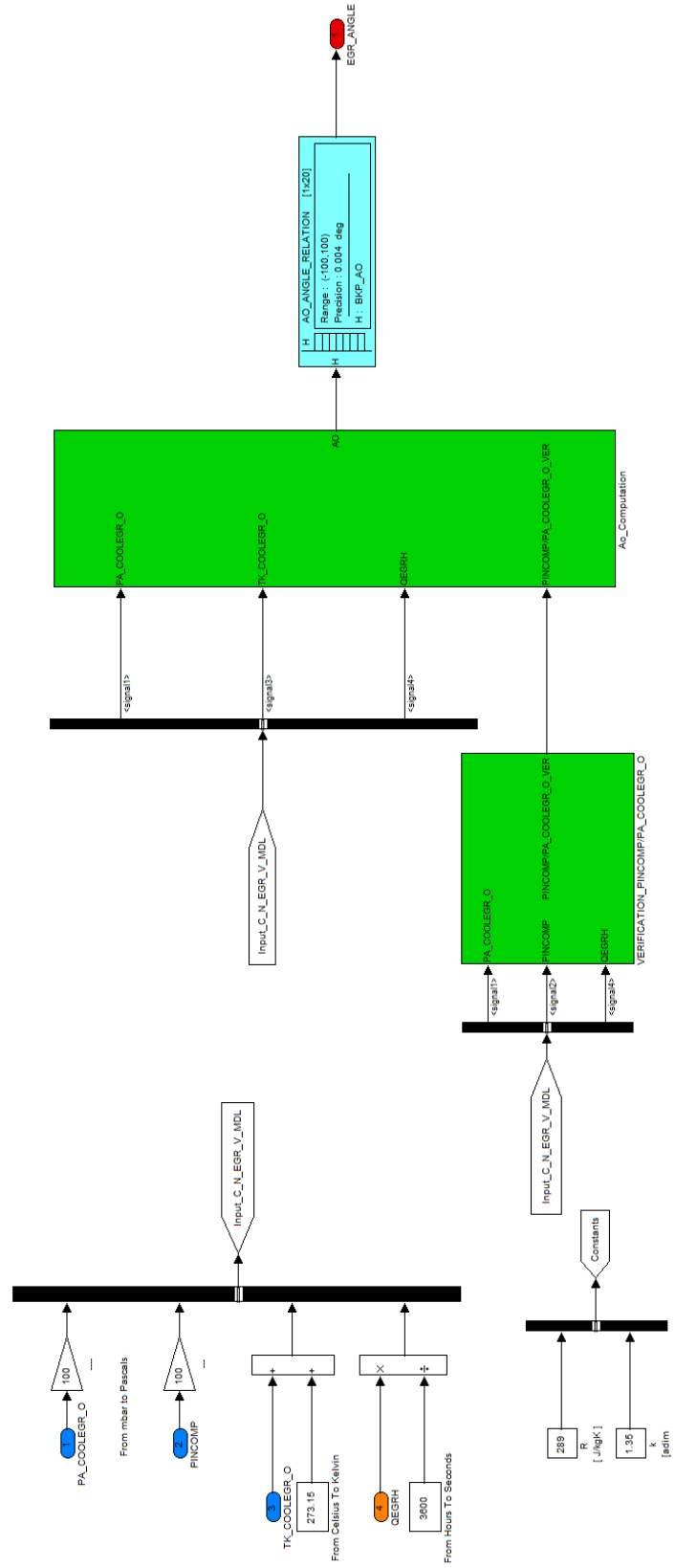


Figura 2. Visión general del nuevo modelo propuesto.

## Metodología Experimental

Previo al inicio de los experimentos se definió el procedimiento a seguir para realizar un correcto análisis con los datos que se poseían, dicho procedimiento es el siguiente:

1. Definir la base teoría a utilizar para desarrollar el modelo.
2. Obtener los parámetros de entrada correctos y necesarios según la teoría.
3. Concretar las diferentes partes que hacen el modelo.
4. Delimitar los parámetros para así evitar resultados no físicamente consistentes.
5. Verificar el proceso para así validar el modelo usando los datos experimentales.

Con relación a la base teórica, la rata a través de la válvula mariposa que regula la cantidad de gases de escape que son reintroducidos es correctamente descrita a través de la ecuación de flujo compresible a través de una boquilla. Dicha ecuación es derivada del análisis de un flujo en una dimensión y además se considera los efectos reales mediante un coeficiente de descarga experimental.

$$\dot{m}_{EGR} = A_0 \frac{P_{in}}{\sqrt{RT_{in}}} \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

Dentro de la ecuación (1), encontramos lo siguiente:

- $\dot{m}_{EGR}$  = Flujo de masa (rata) de los gases de escape que son reintroducidos.
- $A_0$  = parámetro que contiene el coeficiente de descarga y el área de la válvula mariposa.
- $R$  = es la constante elástica de los gases de escape (también llamada constante individual de los gases). Un valor constante de  $R$  fue seleccionado sin considerar las condiciones del motor. La variación en el peso molecular promedio de los gases de escape fue verificada y tiene 1% de variación, por lo tanto, no es necesario considerarla.
- $k$  = relación de la capacidad de calor. Es el valor de la ley exponencial politrófica para el flujo enfriado (como ya se ha mencionado, los gases de escape que pasan a través de la válvula se enfrían).
- $P_{out}$  = presión de salida de la boquilla convergente (se asume igual presión a la de la entrada del compresor).
- $P_{in}$  = presión de entrada de la boquilla convergente (se asume igual a la presión por a la salida del enfriador de los gases de escape que son reintroducidos).
- $T_{in}$  = presión de entrada de los gases de escape a la válvula mariposa.

La ecuación (1) es usada si las condiciones de estancamiento son conocidas y la velocidad no es estrangulada, en el caso que estamos trabajando la velocidad del flujo nunca alcanza la velocidad de estrangulación (también denominada condiciones críticas), donde la relación de presión ( $P_{out}/P_{in}$ ) para todos los casos es mayor que 0.528 y menor a 1, lo que permite trabajar con la ecuación (1), existiendo solamente una pequeña diferencia de presión antes y después de la válvula mariposa.

*Construcción de los parámetros iniciales*



Los parámetros con los que se cuenta en el modelo son los siguientes:

- PEXHO2SENS: es la presión de salida del catalizador.
- TOUTWC: es la temperatura de salida del catalizador.
- PINCOMP: es la presión de entrada del compresor.
- QEGRH: es el flujo de masa de los gases de escape que son reintroducidos.

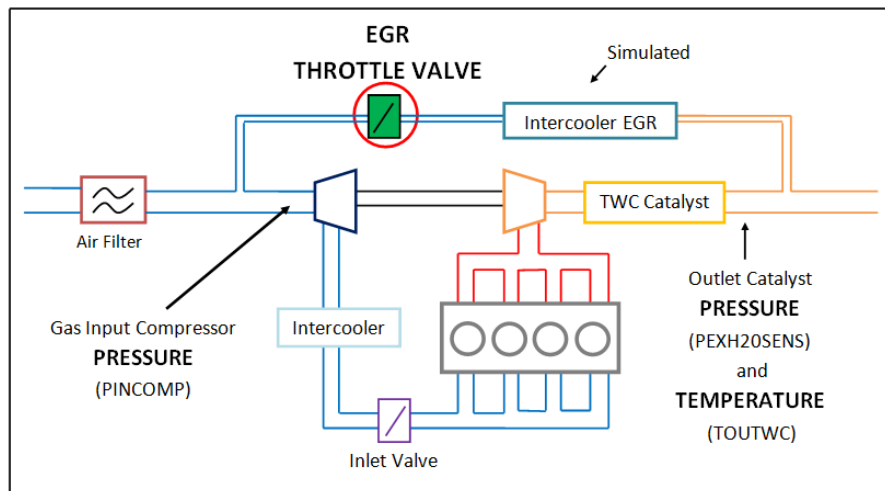


Figura 3. Representación esquemática del sistema de baja presión de los gases de escape que son reintroducidos con los datos disponibles correspondientes.

En la Fig. 3, es posible observar el sistema de baja presión, también se destacan los parámetros disponibles en la base de datos. Es claro que la temperatura y presión de entrada no son las correspondientes al punto antes de la válvula mariposa, en vez, son las temperaturas y presiones a la salida del catalizador, esto sucede debido a que los motores de producción en serie no tienen la misma cantidad de sensores que pueden ser instalados en un motor en un banco de pruebas debido a los costos de producción.

El nuevo modelo intenta reproducir las condiciones reales del motor, por lo tanto, dos mapas fueron utilizados para simular la temperatura y presión de entrada de la válvula mariposa, que son a su vez la temperatura y presión de salida del enfriador.

*Especificaciones generales del motor que son usadas para construir los mapas iniciales y los otros parámetros.*

Para obtener los diferentes mapas y parámetros que permiten crear el modelo fue utilizado un motor a gasolina de cuatro cilindros con las siguientes características:

Características	Valor	Unidades
Relación de compresión	9.8	[adim]
Diámetro del cilindro	72	[mm]

Desplazamiento	84	[mm]
Biela	129	[mm]

Tabla 1. Especificaciones generales del motor.

Los experimentos en el banco de pruebas fueron desarrollados en dos fases:

- Primero, a 2500, 3000, y 4000 rpm, con estos datos fueron contruidos los mapas para las presiones y temperaturas de entrada de la válvula mariposa.
- Segundo, a 2500 rpm – 1500 mbar, 2500 rpm – 1900 mbar y 4000 rpm - 1500 mbar, con esta base de datos fueron contruidos los otros mapas para calcular el ángulo de la válvula mariposa. Al mismo tiempo, todos los mapas tuvieron en cuenta las tres rpm mencionadas para cubrir un mayor rango.

Es importante mencionar que se tomó una muestra de la última base de datos para construir cada mapa. El proceso de selección de los datos fue simple, cada 100 datos es seleccionado un valor para ser utilizado en los mapas, de esta manera se obtuvieron 571 valores sobre 57100 datos, los valores restantes (56529) fueron utilizados para el proceso de verificación.

### Partes del modelo

#### 1. Unidad de conversión

En la siguiente figura (ver Fig. 4) se encuentran las diferentes unidades de conversión para cada dato de entrada y también en la tabla (ver Tabla 2) se encuentran las unidades antes y después de la conversión para una mayor comprensión.

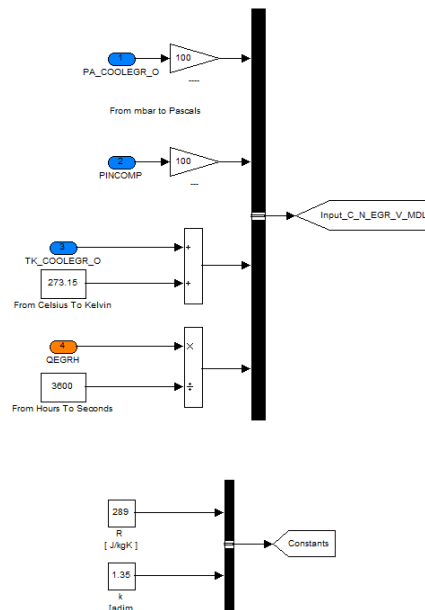


Figura 4. Representación en Simulink de la unidad de conversión para los valores de entrada.

Parámetro	Antes	Después
Presión	[mbar]	[Pa]
Temperatura	[°C]	[°K]
Flujo de masa	[kg/h]	[kg/s]

Tabla 2. Parámetros de entrada, antes y después de la conversión.

A su vez, en la Figura 4 se puede observar los valores asignados a las constantes que se utilizan. Los valores son los siguientes:

- $R = 289 \text{ J/kgK}$
- $k = 1.35$

## 2. PINCOMP / PA\_COOLEGR\_O bloque de verificación

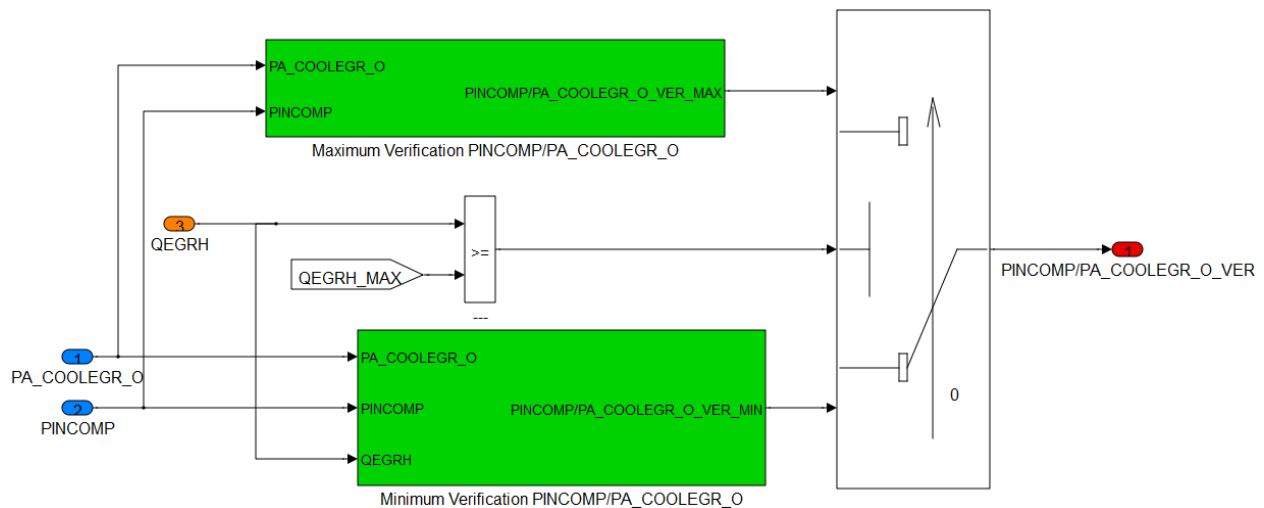


Figura 5. Bloque de verificación de la relación de presión.

El bloque de verificación es el que se encarga de remover todos los posibles valores de relación de presión por encima del valor permitido, es decir, mayores que 1, los cuales no son físicamente correctos ya que siempre tiene que existir una diferencia de presión cuando los gases pasen a través de la válvula. Como se puede observar en la Fig. 5, el bloque está compuesto de dos diferentes verificaciones (máxima y mínima), las entradas son:

- **PA\_COOLEGR\_O:** es la presión de salida del enfriador de los gases de escape que son reintroducidos.
- **PINCOMP:** es la presión de entrada del compresor.
- **QEGRH:** es el flujo de masa de los gases de escape que son reintroducidos.

En este caso el parámetro de salida es PINCOMP / PACOOLER\_O\_VER que representa la relación de presión verificada.

#### *PINCOMP / PA\_COOLEGR\_O bloque de verificación mínima*

Es el bloque responsable de evaluar todos los casos donde el flujo de masa de los gases de escape que son reintroducidos sea igual a cero, y así verificar que no existan valores erróneos en la relación de presión.

#### *PINCOMP / PA\_COOLEGR\_O bloque de verificación máxima*

Al igual que en el bloque anterior este se encarga de verificar todos los valores de relación de presión cuando el flujo de masa es igual o mayor a un máximo establecido experimentalmente.

### 3. Ao\_ Computation

La parte del cálculo de Ao consiste en trasladar la ecuación introducida en la parte teórica (ver ecuación 1) al formato Simulink. En la parte interna del bloque se encuentran dos mapas que conforman dos secciones distintas de la ecuación (dichos mapas esta representados en la Tabla 3), y a su vez tenemos sencillas operaciones matemáticas que permiten completar la ecuación correctamente.

En la figura que se presenta a continuación (ver Fig. 7) podemos observar la visión general del bloque, con sus distintas entradas y salida.

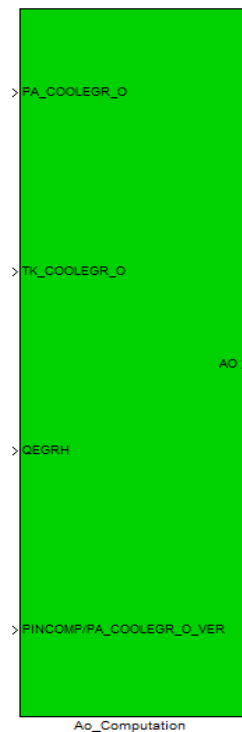


Figura 7. Visión general del bloque del cálculo de Ao.

### 4. EGR\_ANGLE

En la parte final es realizado el cálculo para obtener el EGR\_ANGLE, para este cálculo tenemos las siguientes entradas:

- AO que es valor obtenido en la sección anterior.
- Un mapa para crear la relación entre el ángulo de la válvula mariposa y el valor Ao.

#### 5. AO\_ANGLE\_RELATION mapa

Para realizar este mapa se tomo en cuenta la muestra seleccionada de la base de datos, donde se contaba con ambos parámetros Ao y el ángulo de la válvula mariposa, graficando dichos parámetros uno contra el otro se puede obtener la línea de tendencia, la ecuación de dicha línea y finalmente tenemos una relación entre dichos parámetros para cualquier condición.

Es importante señalar que se seleccionaron dos líneas de tendencia, una polinómica y una logarítmica, donde se observo que la línea polinómica tiene mayor exactitud en representar los datos.

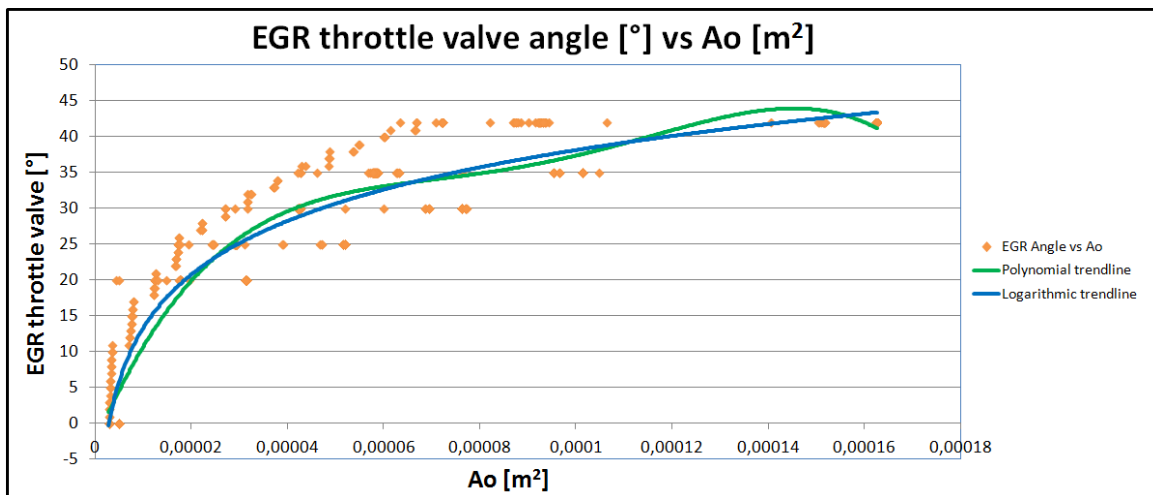


Figura 8. Ao vs EGR\_ANGLE con diferentes líneas de tendencia.

En la figura arriba representada se puede observar el resultado de dicho estudio.

6. Límites para el ángulo de la válvula mariposa que regula el paso de los gases de escape que son reintroducidos

Después de obtener el ángulo de la válvula mariposa, este pasa a través de dos filtros que limitan el máximo y mínimo valor del mismo. Los límites corresponden a la válvula completamente abierta y completamente cerrada. Para el modelo, fueron establecidos los siguientes valores:

- Válvula completamente abierta (52°): este máximo fue establecido considerando los datos provenientes del motor, y específicamente este fue el valor para la máxima cantidad de gases de escape que eran reintroducidos.

- Válvula completamente cerrada ( $8^\circ$ ): es el mínimo ángulo que se estableció teniendo en cuenta prevenir la unión de la válvula mariposa con las paredes del ducto.

## Resultados

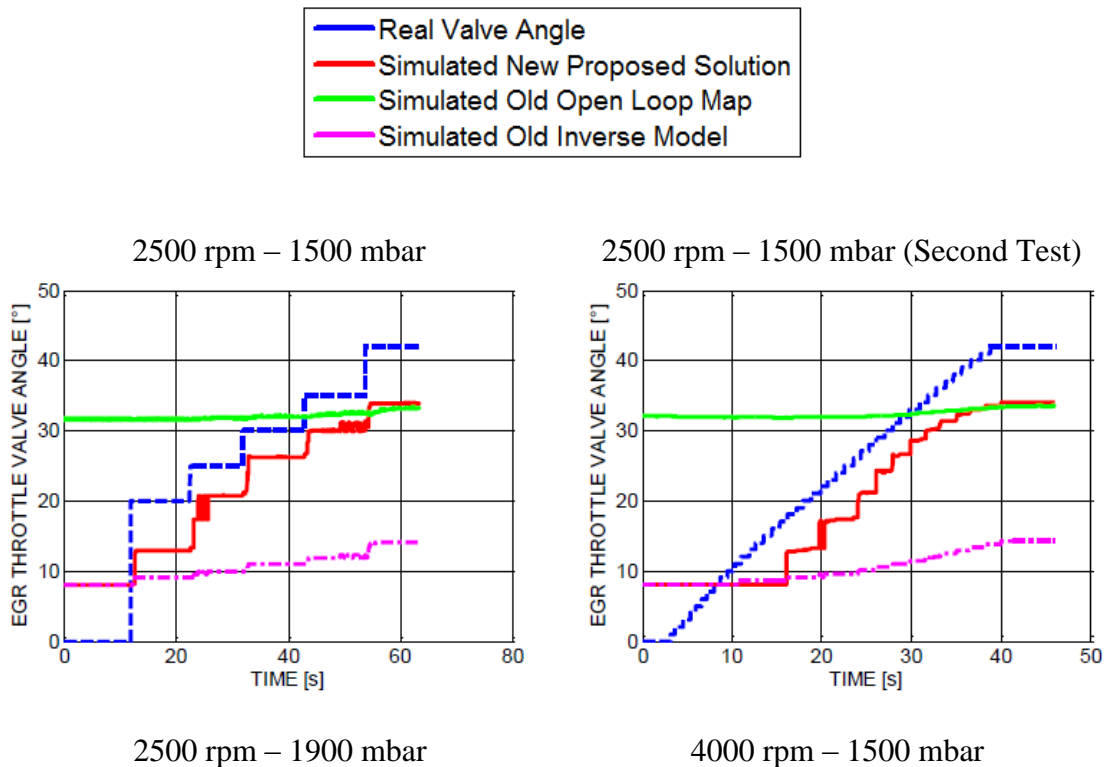
### 7. Fase de verificación del modelo

El siguiente paso es la prueba del modelo, con los datos que son distintos a los que se usaron para realizarlo. Los experimentos fueron en las siguientes condiciones:

1. 2500 rpm and 1500 mbar
2. 2500 rpm and 1500 mbar - Second Test
3. 2500 rpm and 1900 mbar
4. 4000 rpm and 1500 mbar

Una vez obtenidos los resultados de la simulación puede ser realizada la comparación con los otros dos métodos para obtener el ángulo de la válvula mariposa y ver cuál de todas las soluciones es la que arroja el mejor resultado. Es importante señalar que el Open Loop Map no está completamente calibrado debido a los datos faltantes para construir el mapa, entonces se observará una gran diferencia con respecto a las otras dos soluciones.

A continuación se puede observar una leyenda común para todos los gráficos donde se compara el nuevo modelo propuesto con los ya existentes y los distintos experimentos:



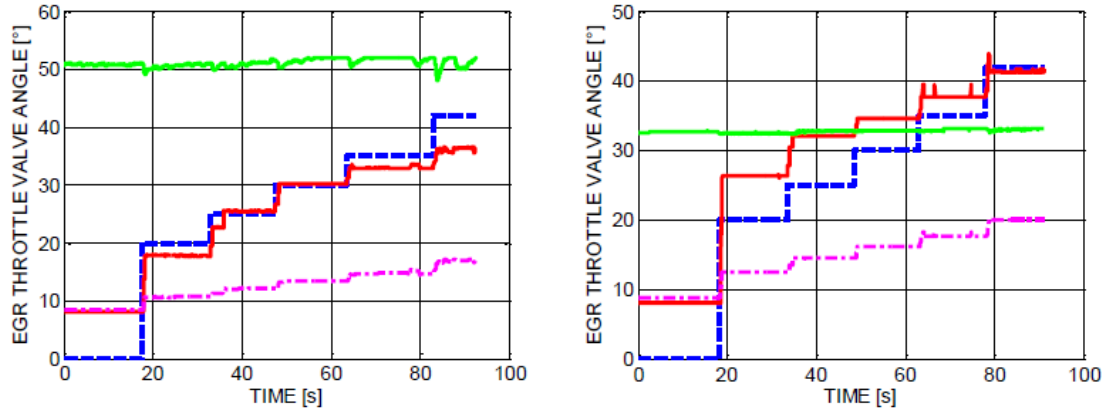


Figura 9. Experimentos realizados a las distintas velocidades del motor y a presiones distintas, comparando las tres alternativas para obtener el ángulo de la válvula mariposa.

## Discusiones

Como un análisis general de todos los resultados obtenidos destaca el hecho de que para los tres primeros experimentos llevados a cabo a 2500 rpm pero a diferentes presiones (1500 y 1900 mbar), la curva obtenida a través del nuevo modelo es siempre por debajo del valor real. Mientras, en el caso de 4000 rpm y 1500 mbar, la curva está por encima.

Al mismo tiempo, se puede observar que los resultados que pueden ser considerados más confiables son los correspondientes al tercer experimento, la causa de esto es que debido a que la fórmula aplicada considera un promedio de todos los datos experimentales y este experimento en particular se encuentra en el medio de los mismo, arroja una mayor aproximación que estando en los extremos ya que estos últimos darían un mayor error.

## Conclusiones

En los distintos experimentos se observó que el nuevo modelo propuesto arroja una mayor precisión que los modelos anteriores, lo cual sugiere un mejoramiento para alcanzar la meta de simular a través de un software computacional las distintas condiciones que se pudiesen presentar.

A pesar de que se cuenta con una mayor precisión, estos resultados todavía no podrían ser considerados como confiables, debido a que este tipo de sistemas de control requieren de una gran precisión y es necesario disminuir la diferencia entre los datos reales y los que se generan por computadora.

## Futuros desarrollos

Entre las futuras mejoras que se pudiesen realizar esta mejorar experimentos únicos para este caso, eliminando cualquier variable externa que pudiese afectar el resultado.

Además mejorar el proceso de adquisición de datos para construir modelos que realicen un resultado más preciso.

Y por ultimo añadir el retardo asociado al viaje del gas a través del ducto para así obtener resultados más realistas