



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Grado en Ingeniería Mecánica**

**SIMULACION DE UNA MCIA ALIMENTADO
CON GAS NATURAL UTILAZANDO EL
SOFTWARE AVL BOOST**

Autor:

Fernández González, Abel

Tutor:

Melgar Bachiller, Abel

**Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, Julio 2017.



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
Grado en Ingeniería Mecánica**

**SIMULACION DE UNA MCIA ALIMENTADO
CON GAS NATURAL UTILAZANDO EL
SOFTWARE AVL BOOST**

Autor:

Fernández González, Abel

Tutor:

Melgar Bachiller, Abel

**Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Valladolid, Julio 2017



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa Avl, por ceder la herramienta para la realización de este trabajo.

En segundo lugar a mi tutor, Andrés Melgar Bachiller, por el interés y apoyo prestado, sin el cual no hubiera sido posible la finalización de este trabajo fin de grado.

Y por último a mi familia, padres y hermana, cuyo ánimo y apoyo han sido imprescindibles para llegar a completar este documento.



SIMULACION DE UN MCIA ALIMENTADO CON GAS NATURAL UTILIZADO EL SOFWARE AVL BOOST

RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se ha modelado el funcionamiento de un motor de combustión interna alternativo (MCIA) que utiliza como combustible gas natural.

El modelo se ha definido con el software AVL BOOST, con el cual se han analizado las diversas condiciones de entrada de las variables y su influencia en las prestaciones del motor.

Se inicia definiendo todos los parámetros característicos del motor a estudiar y una descripción detallada de la configuración del modelo en BOOST.

Posteriormente se comparan los resultados obtenidos experimentalmente en el banco de ensayos con las simulaciones realizadas.

PALABRAS CLAVE

AVL BOOST, Motor de Combustión Interna Alternativo, Gas natural, Banco de pruebas y Combustión.



SIMULACION DE UN MCIA ALIMENTADO CON GAS NATURAL UTILIZADO EL SOFTWARE AVL BOOST

ÍNDICE

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS	7
1.1 INTRODUCCION	7
1.2 OBJETIVOS.....	7
2. DESCRIPCION INSTALACION EXPERIMENTAL	9
2.1 INTRODUCCION	9
2.1 ELEMENTOS DE MEDIDA.....	11
2.2.1 Medida de presión en cámara de combustión.....	11
2.2.2 Medida de caudal – mass flow.....	11
2.2.3 Medida de temperatura	14
2.2.4 Medida de presiones.....	14
2.3 SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES.....	15
2.3.1 Suministro de H2	15
2.3.2 Suministro de Gas natural	15
2.3.3 Mezcla del aire y combustible.....	16
3. MODELO AVL BOOST Y PARÁMETOS CONSIDERADOS	17
3.1 INTRODUCCION	17
3.2 MODELO	18
3.2.1 Modelo gráfico avl boost	18
3.2.2 Inicialización del modelo	19
3.2.2.1 Aspectos generales de entrada.....	19
3.3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS	25
3.3.1 Sistema de Admisión.....	26
3.3.4 Colector de admisión.....	38
3.3.2 Sistema control, Pid controler (Controlador PID).....	39
3.3.3 Motor	46
3.3.4 Cilindros.....	48
3.3.5 Sistema Escape	59
4. VALIDACIÓN MODELO Y RESULTADOS OBTENIDOS SIMULACION	63
4.1 INTRODUCCION	63
4.2 PROCESO SEGUIDO PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO	63
4.3 SISTEMA DE CONTROL	64
4.3.1 Angulo apertura mariposa Aire	64

4.3.2 Angulo apertura mariposa Gas Natural	66
4.3.3 PID par motor	68
4.4 REGIMEN DE GIRO MOTOR	69
4.5 ANALIS DIAGRAMA PRESION ADMISION.....	70
4.6 ANALIS DIAGRAMA DE PRESSION CILINDRO.....	71
4.7 PRESION MEDIA INDICADA (pmi)	73
4.8 CONSUMO ESPECÍFICO INDICADO	74
4.9 TEMPERATURA CILINDRO	75
5. CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO.....	77
6. BIBLIOGRAFIA	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Banco de ensayos laboratorio.....	10
Figura 2. Dimensiones válvulas admisión y escape.....	10
Figura 3. Caudalímetros instalación.....	11
Figura 4. Balance de energía caudalímetro.....	12
Figura 5. Mass flow controller.....	13
Figura 6. Actuador mass-flow.....	13
Figura 7. Máquina electrolisis generación H2.....	15
Figura 8 . Modelo gráfico completo.....	18
Figura 9. Creación modelo avl boost.....	19
Figura 10. Sistema control simulación.....	20
Figura 11. Tareas de simulación.....	20
Figura 12. Definición duración simulación.....	21
Figura 13. Configuración del combustible aportado modelo.....	22
Figura 14. Condiciones iniciales utilizadas en el modelo.....	23
Figura 15. Definición sistema de reinicio programa.....	24
Figura 16. Definición elemento salida programa.....	24
Figura 17. Partes del modelo.....	25
Figura 18. Sistema de admisión completo.....	26
Figura 19. Admisión gas natural.....	26
Figura 20. Condiciones iniciales frontera admisión gas natural.....	27
Figura 21. Coeficientes de flujo frontera admisión gas natural.....	27
Figura 22. Características conducto “6”.....	28
Figura 23. Definición mariposa admisión Gas Natural.....	29
Figura 24. Coeficientes de flujo mariposa admisión Gas Natural.....	29
Figura 25. Características conducto “7”.....	30
Figura 26. Tabla variación diámetro conducto “7”.....	31
Figura 27. Admisión aire.....	31
Figura 28. Condiciones iniciales frontera admisión aire.....	32
Figura 29. Coeficientes de flujo frontera admisión aire.....	32
Figura 30. Características conducto “2”.....	33
Figura 31. Definición mariposa admisión aire.....	34
Figura 32. Coeficientes de flujo mariposa admisión aire.....	34
Figura 33. Característica conducto “3”.....	35
Figura 34. Admisión O2.....	36
Figura 35. Admisión H2.....	36
Figura 36. Condiciones iniciales aire frontera admisión H2 y O2.....	36
Figura 37. Coeficientes de flujo frontera admisión H2 y O2.....	37
Figura 38. Características conducto “8” y “9”.....	37
Figura 39. Colector admisión.....	38

Figura 40. Características conducto “5”	38
Figura 41. Inicialización conducto “5”	39
Figura 42. Sistema control admisión Aire.....	41
Figura 43. Valores PID control admisión Aire	41
Figura 44. Configuración sensor y actuador PID aire	42
Figura 45. Sistema control admisión Gas Natural	43
Figura 46. Valores PID control admisión Gas natural	43
Figura 47. Configuración sensor y actuador PID Gas natural	44
Figura 48. Sistema control par motor	45
Figura 49. Valores PID control admisión par motor	45
Figura 50. Configuración sensor y actuador par motor	46
Figura 51. Definición general motor	47
Figura 52. Angulo de encendido del motor.....	48
Figura 53. Parámetros característicos del cilindro.....	49
Figura 54. Condiciones inicialización del cilindro	50
Figura 55. Definición de la combustión	51
Figura 56. Definición ley Vibe	52
Figura 57. Definición transferencia calor en el cilindro.....	53
Figura 58. Definición válvula de escape.....	54
Figura 59. Curva de levantamiento de válvula de escape	55
Figura 60. Coeficiente de válvula de escape.....	56
Figura 61. Definición válvula admisión.....	57
Figura 62. Curva de levantamiento de válvula de admisión	58
Figura 63. Coeficientes flujo válvula admisión.....	59
Figura 64. Colector de escape.....	59
Figura 65. Características conducto “1”	60
Figura 66. Inicialización conducto “1”	60
Figura 67. Condiciones iniciales colector escape	61
Figura 68. Coeficientes de flujo colector escape	61

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla composición Gas natural.....	16
Tabla 2. Variación velocidad motor en un ciclo.....	70

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación [1] Primera Ley Termodinámica	12
Ecuación [2] Balance de energía caudal	12
Ecuación [3] Potencia calorífica	12
Ecuación [4] Flujo másico	12
Ecuación [5] Error proporcional PID	39
Ecuación [6] Error integral PID	40
Ecuación [7] Error derivativo PID.....	40
Ecuación [8] Error total generado PID.....	40

Ecuación [9] Factor de escala	53
Ecuación [10] Presión media efectiva	73
Ecuación [11] Consumo específico indicado	74

INDICE DE GRAFICAS

Gráfico 1. Error PID admisión aire	64
Gráfico 2. Valor ángulo apertura mariposa aire generado por PID	65
Gráfico 3. Valor gasto aire generado por PID.....	65
Gráfico 4. Error PID admisión gas natural.....	66
Gráfico 5. Valor ángulo apertura mariposa gas generado por PID.....	67
Gráfico 6. Valor gasto gas generado por PID	67
Gráfico 7. Error PID par motor.....	68
Gráfico 8. Valor par motor generado por el PID.....	68
Gráfico 9. Régimen de giro controlado por PID par motor	69
Gráfico 10. Variación velocidad motor	70
Gráfico 11. Diagrama presión admisión.....	71
Gráfico 12. Diagrama presión interior cilindro.....	72
Gráfico 13. Diagrama presión interior cilindro ampliado.....	72
Gráfico 14. Presión el cilindro frente al volumen en el interior del cilindro....	73
Gráfico 15. Presiones medias en el cilindro	74
Gráfico 16. Consumo específico indicado.....	75
Gráfico 17. Temperatura en el cilindro.....	75

1. INTRODUCCION Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCION

En este trabajo fin de grado se realiza la simulación de un motor de cuatro tiempos de encendido por compresión, en el que el combustible aportado es gas natural. El funcionamiento del motor ha sido estudiado en el banco de ensayos del departamento de motores de la escuela de ingenieros industriales, cuyos resultados se utilizan para la validación del modelo teórico creado utilizando el software AVL BOOST. Dicha validación se basa en el contraste de valores y forma de determinados gráficos característicos.

1.2 OBJETIVOS

Para la realización de este trabajo fin de grado se han establecido los siguientes objetivos:

- Inicializar la creación de un modelo teórico capaz de reproducir el banco de ensayo existente en el laboratorio de motores de la escuela. El modelo creado debe simular los procesos termodinámicos producidos durante un ciclo en la instalación.
- Validar el modelo creado mediante el contraste de los resultados obtenidos en el banco de ensayos real. Se debe reproducir la realidad mediante el uso del modelo, por esta razón los resultados de la simulación deben coincidir con los reales dentro de un rango.
- Analizar la influencia de los parámetros que rigen la entrada de combustible (gas natural) y aire controlados mediante el sistema de control actuado por los PID.

2. DESCRIPCION INSTALACION EXPERIMENTAL

2.1 INTRODUCCION

2.2 ELEMENTOS DE MEDIDA

2.2.1 Medida de presión en cámara

2.2.2 Medida de caudal

2.2.3 Medida de temperatura

2.2.4 Medida de Presión

2.3 SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES

2.3.1 Suministro de H₂

2.3.2 Suministro de Gas natural

2.3.3 Suministro aire

2.1 INTRODUCCION

En esta sección se expone la instalación empleada para obtener los datos experimentales de este trabajo, así como una descripción de los elementos e instrumentos presentes en ella.

Dicha instalación experimental se encuentra ubicada en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica pertenecientes a la Escuela de Ingenierías Industriales de Valladolid en la Sede Paseo del Cauce.

La instalación está constituida por un motor monocilindrico donde se realizan una serie de ensayos. Los resultados que se obtienen en dichos ensayos se utilizaran en capítulos posteriores para contrastar la validez del modelo teórico creado.

El motor inicialmente estaba diseñado para trabajar con aporte de combustible diésel, realizando una serie de modificaciones se ha conseguido adecuar para poder trabajar con combustibles gaseosos.

Las modificaciones que se realizan dotan al motor de versatilidad para trabajar con diferentes combustibles gaseosos, a destacar Hidrogeno y Gas Natural. En este trabajo, se analiza el caso de gas natural, aunque se haya dimensionado el resto de componentes.

En la figura 1, se muestra el motor empleado como banco de pruebas en los ensayos que se han realizado:

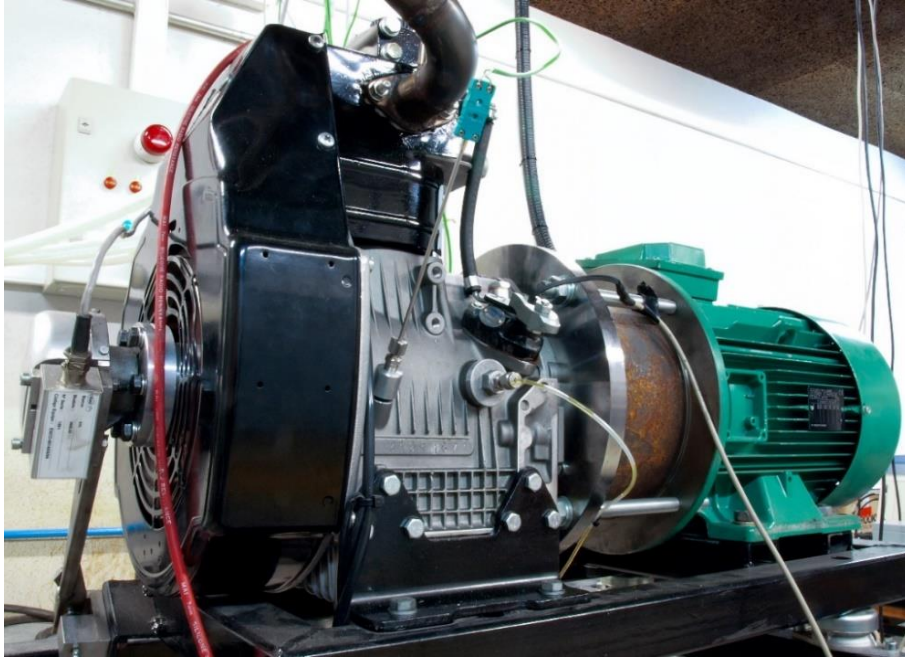


Figura 1. Banco de ensayos laboratorio

En la figura 2, se muestran las dimensiones de la válvula de admisión y escape, las cuales se encargan de abrir y cerrar las canalizaciones por donde entra el aire de admisión y por donde salen los gases de escape del cilindro. Habitualmente la forma de ambas válvulas es similar, pero existen diferencias tanto en el material como en las dimensiones. Las válvulas de admisión son siempre más grandes que las de escape, porque es más difícil introducir el aire en el cilindro que sacar los gases quemados.

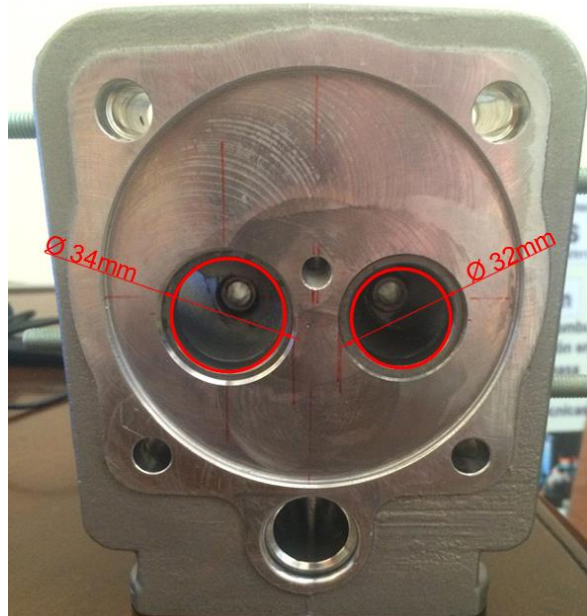


Figura 2. Dimensiones válvulas admisión y escape.

2.1 ELEMENTOS DE MEDIDA

2.2.1 Medida de presión en cámara de combustión

La presión en la cámara de combustión facilita comprender lo que realmente está ocurriendo en interior del cilindro del motor. Un correcto análisis de este dato permite diagnosticar los diversos procesos que se llevan a cabo durante la combustión.

Para la obtención del diagrama del motor se utilizan unos transductores de presión piezoeléctricos, consiste en cristales de cuarzo. Se expone un extremo de cristal a la presión producida en el interior del cilindro, según va aumentando la presión el cristal se comprime generando una carga eléctrica proporcional a la presión.

Un aspecto importante a considerar es que el captador únicamente mide diferencias de presión por lo que es necesarios definir otro sistema para la obtención de información adicional. En la instalación de este proyecto el captador utilizado en un AVL modelo GU21D.

2.2.2 Medida de caudal – mass flow

Para ser capaces de conocer el caudal másico que se aporta a nuestro motor, la instalación consta de cuatro caudalímetros másicos de tipo térmico de la marca comercial Brooks. La disposición de dichos elementos en la instalación puede observarse en la figura 3.

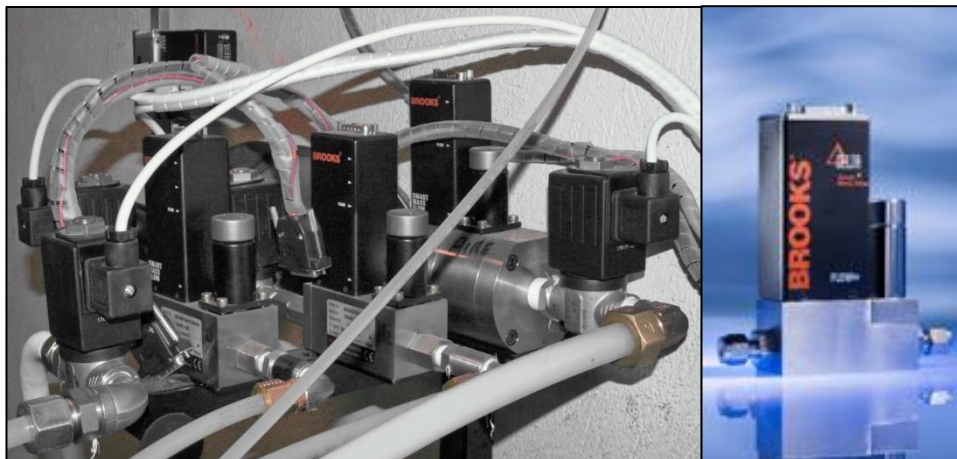


Figura 3. Caudalímetros instalación

Los caudalímetros de tipo térmico son capaces de conocer el gasto másico basándose en dos técnicas. La primera es por la elevación de temperatura que experimenta un fluido al pasar un cuerpo caliente y la segunda por la pérdida de calor que se sufre un cuerpo caliente sumergido en un fluido.

Ambas técnicas parten de la insensibilidad de los fluidos a la variación de su calor específico en función de la presión y de la temperatura. Aplicando la primera ley de la termodinámica ecuación [1], donde la variación de energía

interna (ΔU) se obtiene entre la diferencia entre el calor que cede el sistema (Q) y el trabajo realizado por dicho sistema (W).

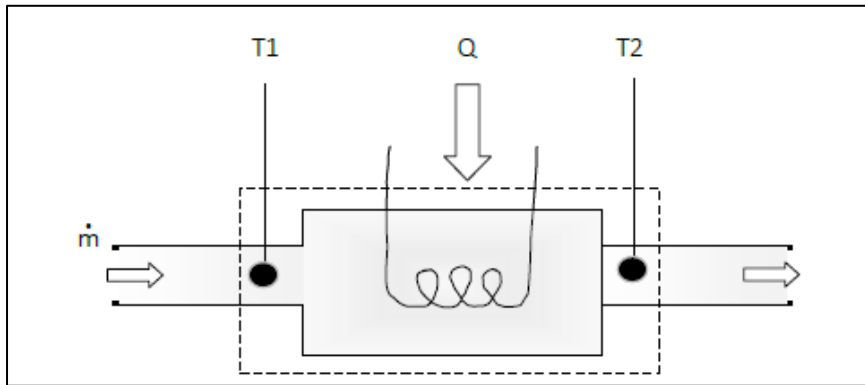


Figura 4. Balance de energía caudalímetro.

Como se está trabajando con gases se reduce la ecuación anterior a la a un simple balance de energía para obtener la relación de las variables de interés en este caso.

$$\Delta U = Q - W \quad \text{Ecuación [1]}$$

$$Q = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \quad \text{Ecuación [2]}$$

$$Q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad \text{Ecuación [3]}$$

Como se conoce la potencia calorífica (Q) entregada por la resistencia aplicando efecto Joule y las temperaturas de entrada y salida (T_1 , T_2), se obtiene el flujo másico que atraviesa el caudalímetro con el dato de la capacidad calorífica del gas que circula a través de él.

$$\dot{m} = \frac{Q}{C_p \cdot (T_2 - T_1)} \quad \text{Ecuación [4]}$$

La admisión de los siguientes gases se controla usando caudalímetros:

- Hidrógeno; caudalímetro modelo 5851S
- Oxígeno; caudalímetro modelo 5851S
- Gas Natural; caudalímetro modelo 5851S, calibrado con metano.
- Aire atmosférico; caudalímetro modelo 5853S
- Hidrógeno; caudalímetro modelo 5851S

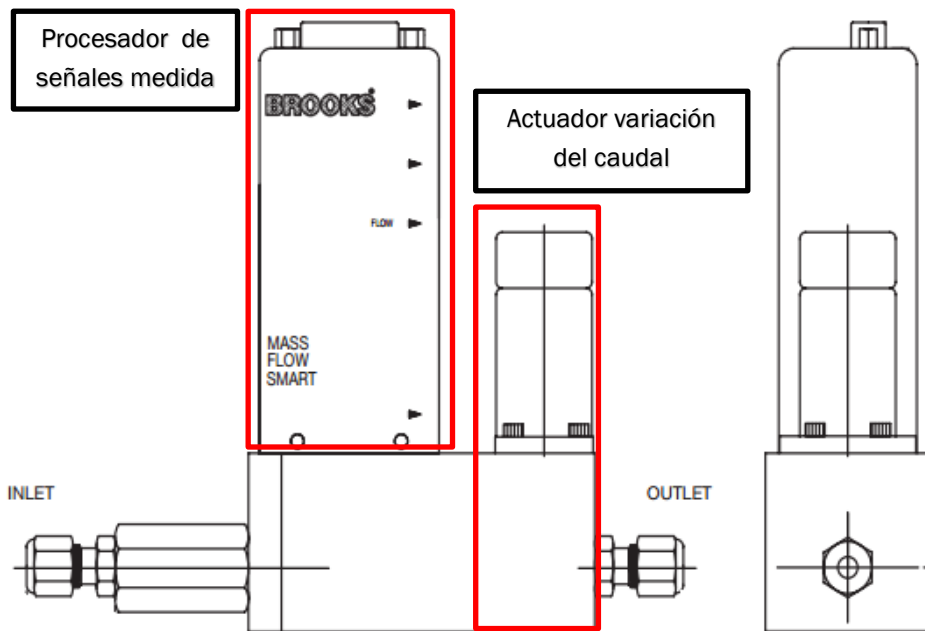


Figura 5. Mass flow controller

En la figura5 se aprecia la configuración del mass-flow empleado. El flujo atraviesa en componente de izquierda a derecha según la leyenda de la figura (inlet, outlet).Este componente está formado por dos elementos principales, uno es un procesador de las señales de medida (temperatura, presión,...) que realiza los cálculos oportunos sobre las variables, para alcanzar el valor de consigna asignado al gasto másico y otro es el actuador que regula la variación de caudal con la señal del procesador.

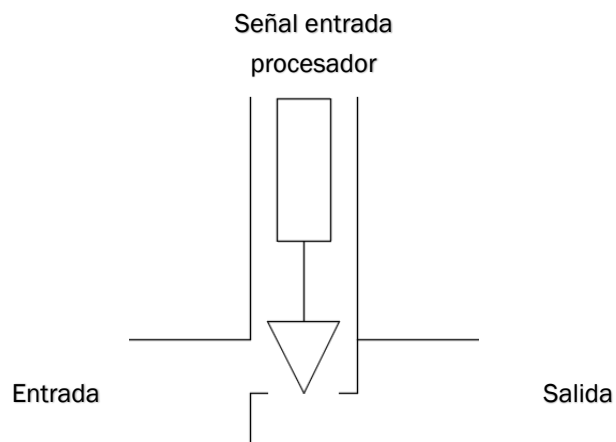


Figura 6. Actuador mass-flow

El sistema de actuación modifica el valor del flujo másico regulando el paso de caudal en función de la señal de entrada recibida del procesador, como se aprecia en la figura 6.

Como sistema de seguridad para la instalación todos los caudalímetros están protegidos con una electroválvula con solenoide, las cuales se pilotan a través de un software para realizar la apertura únicamente con motor en funcionamiento.

2.2.3 Medida de temperatura

Para la obtención de diversos parámetros que se consideran importante el funcionamiento de un motor como la temperatura del aceite o el rendimiento volumétrico es necesario registrar esta magnitud. Por esto la instalación dispone de varios termopares tipo k de dimensiones diametrales 3mm. La ubicación de dichos termopares se describe a continuación:

- Admisión = el termopar se encarga de medir las temperaturas de los diferentes gases de admisión, ubicándose en punto más próximo posible a la pipa de admisión del motor orientado a favor de flujo.
- Escape = el termopar mide las temperatura de los gases de escape ubicándose en la salida de la pipa de escape, la orientación de dicho termopar es perpendicular a el flujo.
- Aceite = este termopar permite el control de la temperatura del motor permitiendo monitorizar la evolución de la temperatura, permite sustituir la varilla de medición de aceite.

2.2.4 Medida de presiones

En la instalación es necesario conocer diferentes presiones del sistema además de la presión de la cámara de combustión. Con la obtención de dichos valores se puede realizar un diagnóstico completo de la combustión y tener seguridades en la realización de los ensayos.

Las presiones medidas en la instalación se encuentran ubicadas en los siguientes elementos:

- Colector admisión = mide la presión de admisión mediante un transductor DRUCK PTX 1400 (rango 0-1.6 bar absoluta), en la zona más próxima a la pipa de admisión.
- Bloque motor = mide la presión de los gases del cárter mediante un transductor DRUCK PTX 1400 (rango 800-1200 mbar absoluta), en la parte superior del bloque.
- Filtro de aceite = mide la presión del aceite mediante un transductor DRUCK PTX 1400 (rango 0-4 bar manométrica).

2.3 SUMINISTRO DE COMBUSTIBLES

2.3.1 Suministro de H₂

El hidrogeno con el que se han realizado los ensayos en la instalación real se genera a partir de una máquina de electrolisis alimentada por agua. La máquina que produce dicho gas está representada en la figura 5 con marca comercial “Hydroenergy”.



Figura 7. Máquina electrolisis generación H₂

2.3.2 Suministro de Gas natural

El suministro de gas natural a la instalación se obtiene de la red de abastecimiento a la propia universidad. La composición de dicho combustible no es fija y puede variar en función de la procedencia de dicho gas. Para realizar los diferentes análisis tomamos como valores fijos la siguiente composición.

Componente	Fracción molar
Hidrógeno [H ₂]	0
Monóxido de carbono [CO]	0
Metano [CH ₄]	0,86
Dióxido de carbono [CO ₂]	0,02027
Agua [H ₂ O]	0
Nitrógeno [N ₂]	0,01094
Oxígeno [O ₂]	0
Etano [C ₂ H ₆]	0,09387
Propano [C ₃ H ₈]	0,0142
Butano [C ₄ H ₁₀]	0,00248
Pentano [C ₅ H ₁₂]	0,00039
Octano [C ₈ H ₁₈]	0
Decano [C ₁₀ H ₂₂]	0

Tabla 1. Tabla composición Gas natural

2.3.3 Mezcla del aire y combustible

Como se ha definido antes el gasto de cada combustible se controla con las válvulas ubicadas en la salida respectiva de cada caudalímetro. Para mantener el dosado constante las válvulas regulan la cantidad de aire y combustible que son necesarias en cada momento. El proceso permite regular la admisión de los diversos combustible y aire, simultáneamente puede usar para realizar mezclas de varios combustibles. Para finalizar el mezclado previo a la entrada del conducto de admisión del motor existe una pequeña cámara para asegurar la mezcla.

3. MODELO AVL BOOST Y PARÁMETOS CONSIDERADOS

3.1 INTRODUCCION

En esta parte del documento se exponen todos los elementos que han sido utilizados durante la creación del modelo Avl Boost, definiendo los parámetros y características fundamentales de los mismos. Las dimensiones introducidas en el modelo se han obtenido a partir de las dimensiones reales del banco de ensayos. Se ha realizado una descripción detallada de los aspectos más relevantes tanto de la configuración de la simulación como de los elementos, para que pueda ser usado este capítulo del trabajo como elemento de partida en futuras modificaciones o actualizaciones de la instalación real.

3.2 MODELO

3.2.1 Modelo gráfico avl boost

En la figura6 se visualiza el modelo gráfico completo, como el resultado final obtenido de la implementación de los elementos.

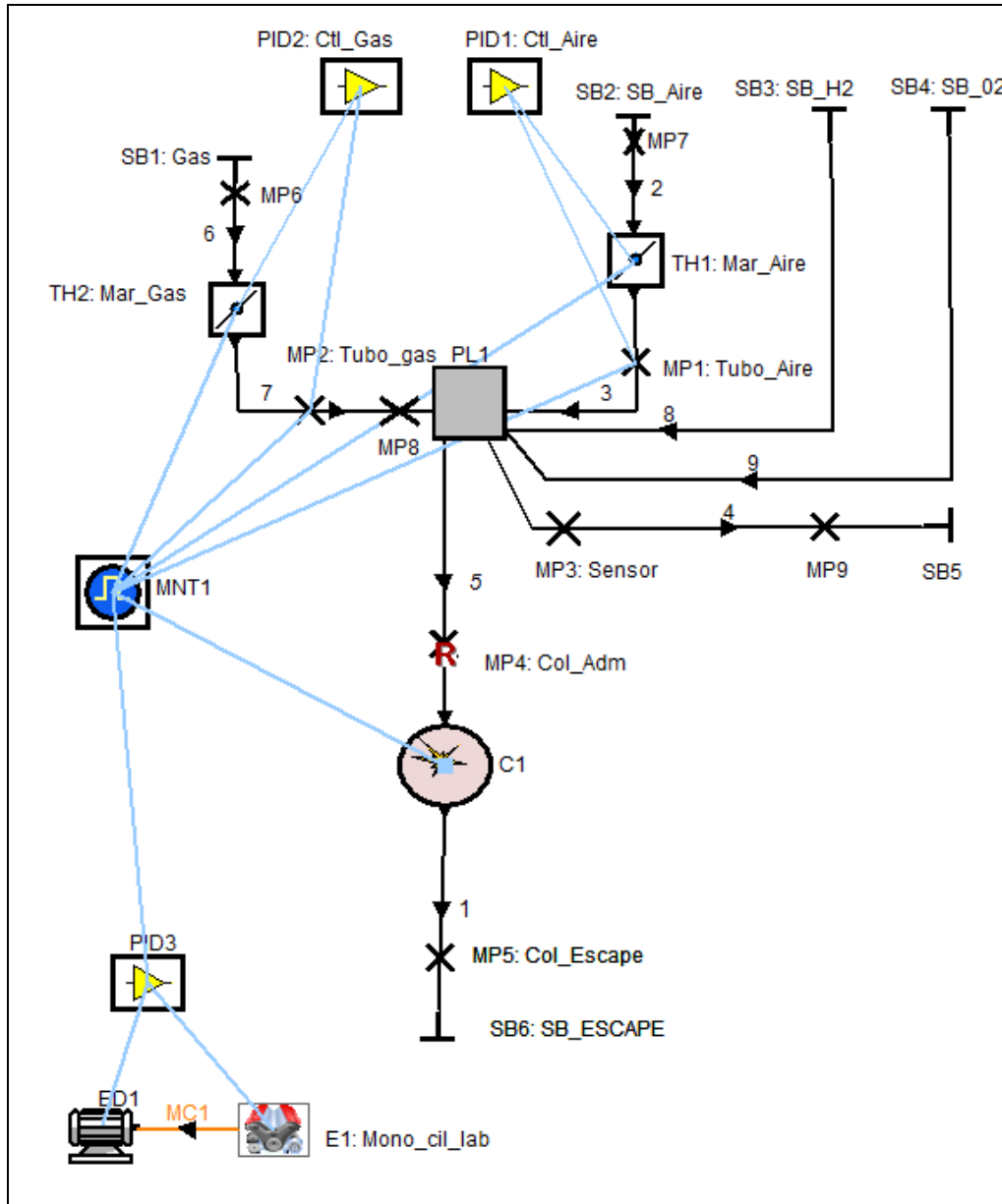


Figura 8 . Modelo gráfico completo

3.2.2 Inicialización del modelo

En este apartado se definen los parámetros de entrada que deben introducirse en el modelo que se ha desarrollado, antes de empezar a introducir cualquier otro elemento en nuestra área de trabajo.

Se incluyen capturas de imágenes del programa Avl boost para facilitar el guiado del proceso realizado. En la figura7 se muestra la definición por parte del programa del área de trabajo, menú principal, barra de herramientas y elementos posibles a seleccionar.

Menú principal y Barra de herramientas

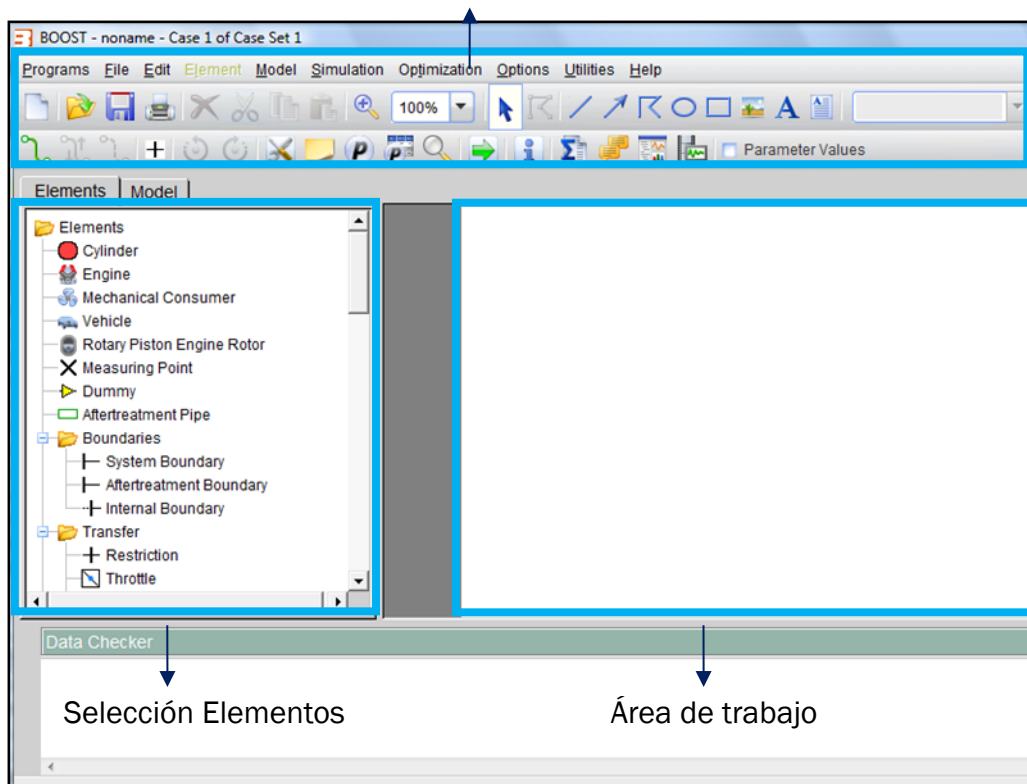


Figura 9. Creación modelo avl boost

3.2.2.1 Aspectos generales de entrada

Se ha comenzado configurando como se va a realizar la simulación del modelo, accediendo en la barra de herramientas → Simulation → Control.

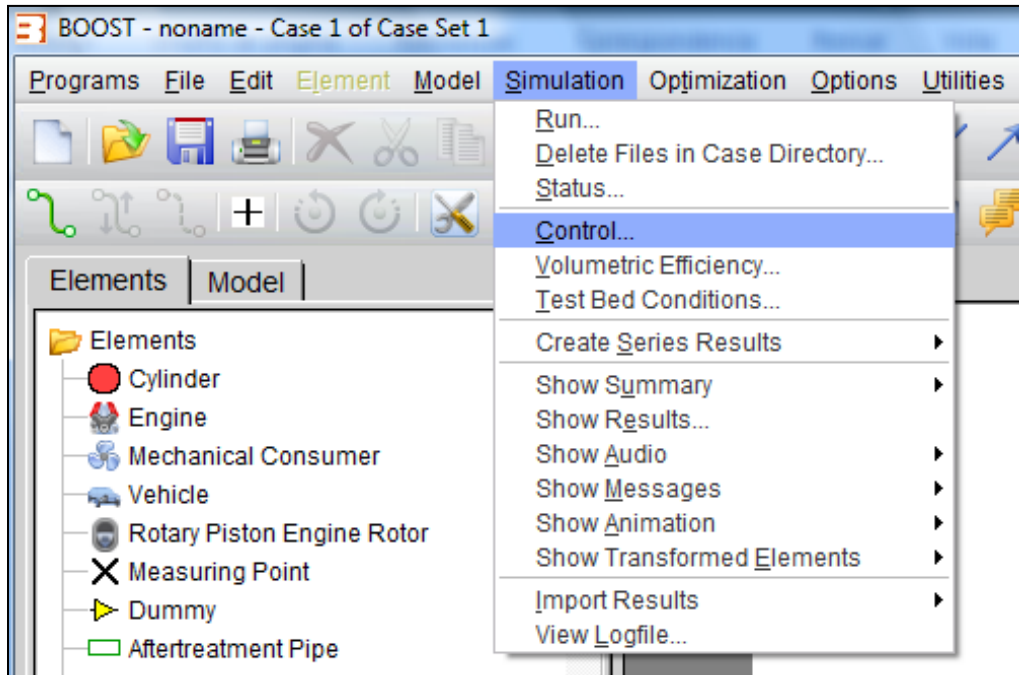


Figura 10. Sistema control simulación

- Simulación Tasks (Tareas de simulación)

En la figura9, se ha seleccionado la opción Cycle Simulation (Simulación de Ciclo) que consiste en el cálculo de los gases intercambiados y los de la combustión.

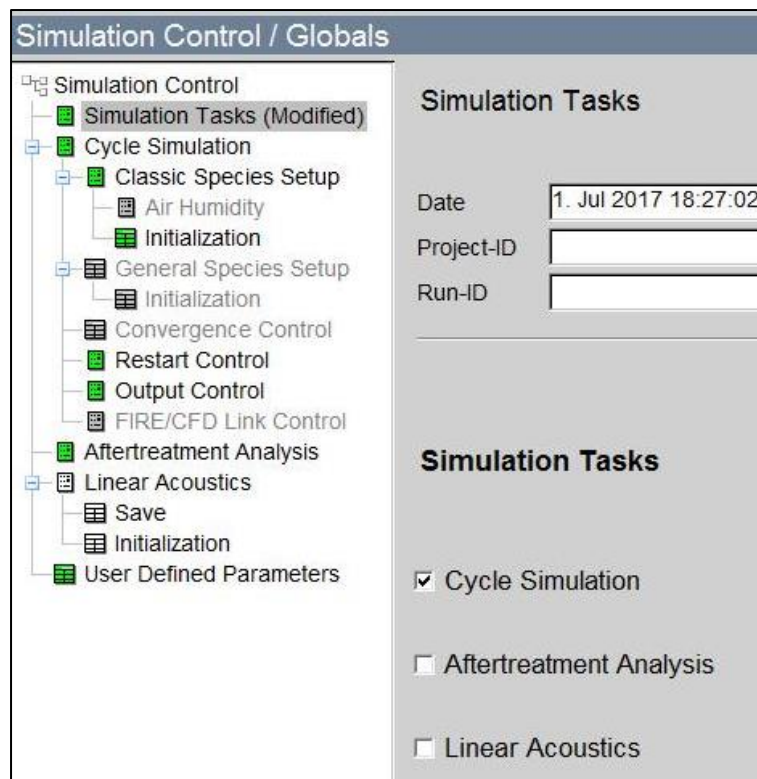


Figura 11. Tareas de simulación

- **Cycle Simulation (Simulación de ciclo)**

El modelo desarrollado se ha configurado con la opción de Classic Species Transport (Transporte Clásico de Especies). Esta opción elegida determina la forma en la que va a resolver el programa todas las ecuaciones internas, tanto de conservación de los productos de la combustión como el fuel vapor (vapor de combustible).

En la figura 10 se ha impuesto que cada simulación realizada finalice transcurridos 30 ciclos de cálculo y la discretización del tamaño de celdas por tubería igual a 25mm.

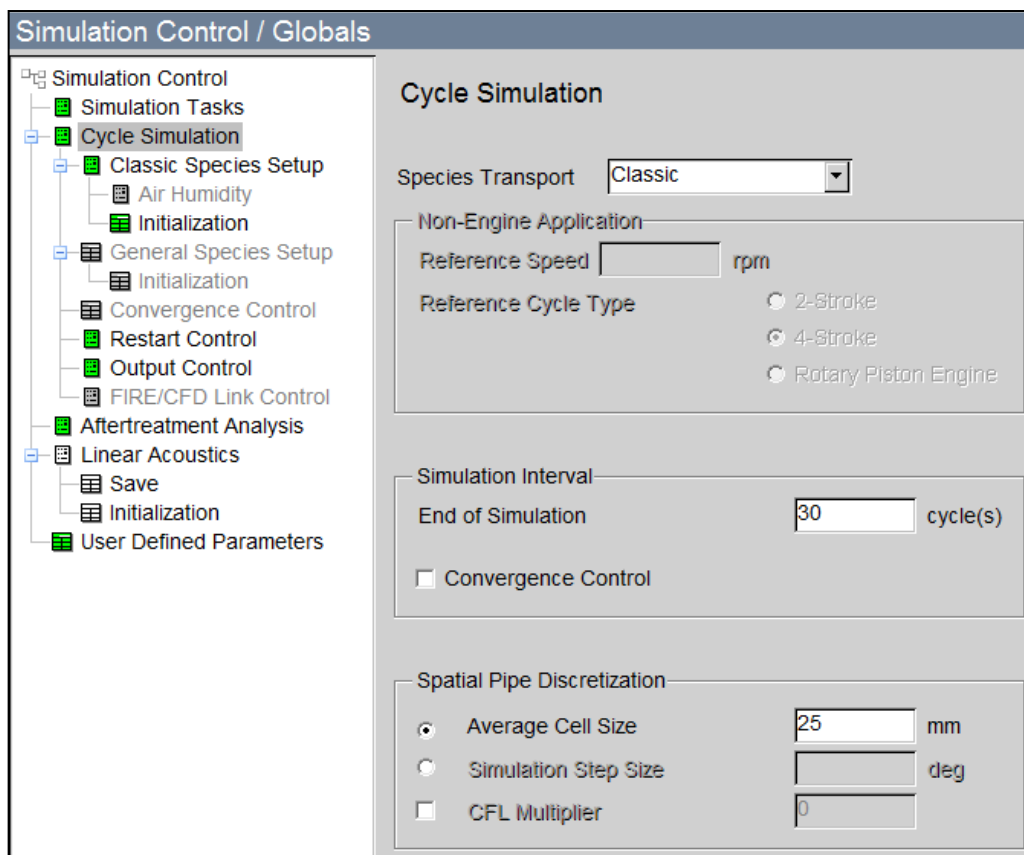


Figura 12. Definición duración simulación

- **Classic Species Setup (Configuración de Especies Clásica)**

En esta parte de la configuración de la simulación se permite seleccionar un combustible estándar, que se encuentre definido en la base de datos del programa. Si el combustible simulado no es ninguno de los estándares o está formado por varios, se puede definir mediante el uso de la herramienta BOOST Gas Properties Tool.

En nuestro caso el combustible utilizado es gas natural, el cual se encuentra definido en la base de datos del software como Methane (metano) por lo que no ha sido necesario la definición. Posterior a la selección del combustible, se

debe definir temperatura y presión inicial para que el programa pueda inicializar la simulación, dichas propiedades se verán modificadas según la simulación vaya ejecutándose.

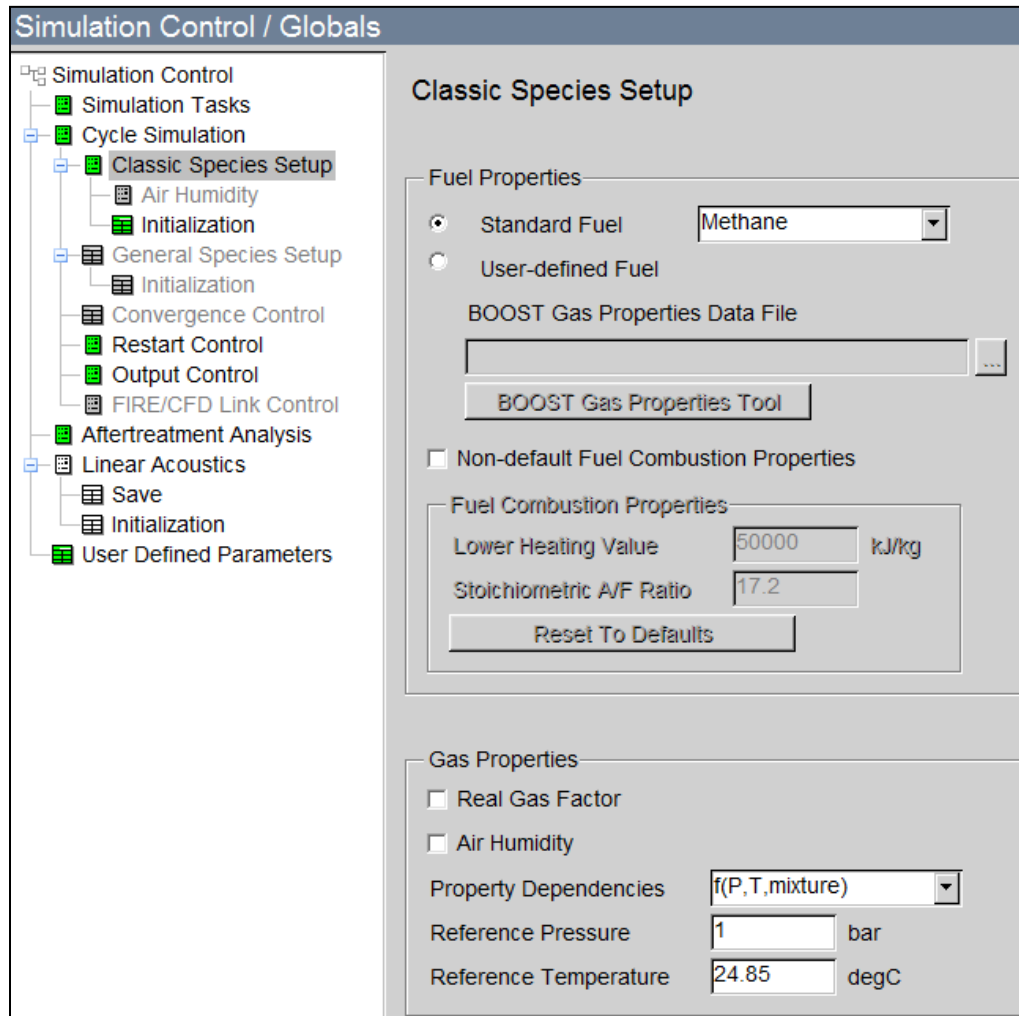


Figura 13. Configuración del combustible aportado modelo

- Inicialización (Inicialización)

En esta apartado se definen todas las condiciones iniciales que posteriormente van a ser utilizadas por los distintos elementos de nuestro modelo, en las que se especifica el flujo que circula a través de ellos, ya sea combustible, productos de combustión, aire o una mezcla de alguno de los anteriores.

Estas condiciones iniciales son empleadas por el programa para poder inicializar la simulación, las cuales van modificándose a lo largo de los ciclos corrigiendo las suposiciones de inicialización hasta obtener los valores estables de la solución final.

En la figura 12 se muestran todas las condiciones iniciales que se han definido para el conjunto completo de elementos de nuestro modelo. Dichas condiciones se definen con cinco variables características:

- Press (Presión)
- Temp (Temperatura)
- Fuel-Vapour (Vapor de Combustible)
- Comb.Products (Productos de la combustión)
- A/F Ratio (Inversa dosado relativo).

Simulation Control / Globals

Simulation Control

- Simulation Tasks
- Cycle Simulation
 - Classic Species Setup
 - Air Humidity
 - Initialization
 - General Species Setup
 - Initialization
 - Convergence Control
 - Restart Control
 - Output Control
 - FIRE/CFD Link Control
 - Aftertreatment Analysis
 - Linear Acoustics
 - Save
 - Initialization
 - User Defined Parameters

Initialization

Ratio:

	Press.	Temp.	Fuel Vapour	Comb. Products	A/F Ratio
	bar	degC	[-]	[-]	[-]
1	2	24.85	0	0	0
2	1.04	24.85	1	0	0
3	1.5	24.85	0	0	0
4	0.9	24.85	0.1	0	0
5	1.1	24.85	0	1	1
6	0.9	24.85	0	0	0
7					
8					
9					
10					

Figura 14. Condiciones iniciales utilizadas en el modelo

Los Sets que es como denomina el programa a cada grupo de valores iniciales corresponden con los siguientes elementos.

El Set 1 define la entrada del aire, Set 2 la entrada del Gas natural, Set 3 la entrada tanto del hidrogeno como la del oxígeno, Set 4 las condiciones en el conducto de admisión, Set 5 las condiciones en el conducto de escape y por último el Set 6 que define las condiciones del conducto donde situamos un sensor de medida.

- Restart Control (Control de reinicio)

En la figura13 se muestra como se ha definido el proceso una vez finalizada la primera simulación. En este modelo se utilizan los valores finales obtenidos en la simulación anterior para obtener un ajuste más fino y rápido hacia el resultado final, siendo necesarios 60 ciclos para obtener una respuesta estable del sistema.

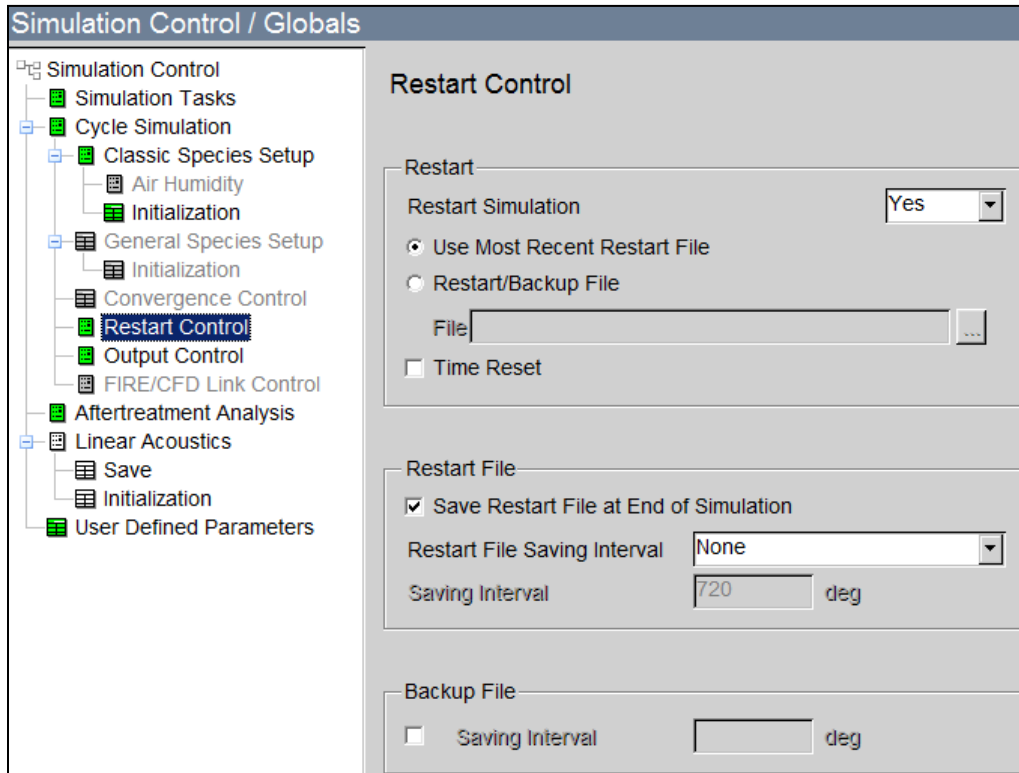


Figura 15. Definición sistema de reinicio programa

- Output Control (Control de salida)

El programa nos da la opción de definir el número de ciclos que nos presenta, se ha seleccionado que solo presente el último ciclo de la simulación.

Por último en la figura14, se han definido tanto la presión como la temperatura ambiente que tienen como fin, el cálculo de los diferentes rendimientos del motor asociados a las condiciones ambientales.

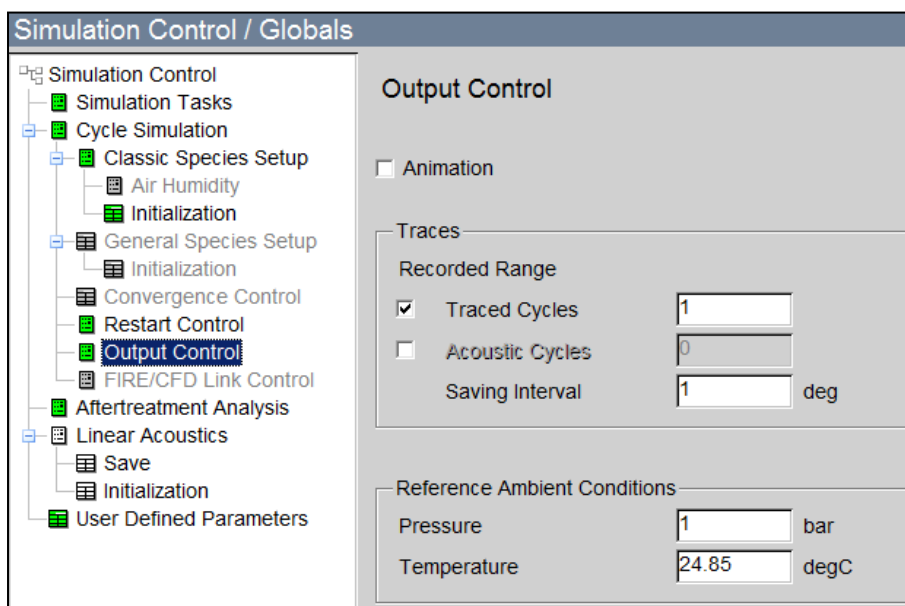


Figura 16. Definición elemento salida programa

3.3 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS

En este apartado se ha definido los parámetros característicos de los elementos que han sido utilizados para la creación del modelo. En la figura 15 se muestran los principales partes en las que se subdivide el modelo:

- Sistema de admisión (incluido el sistema control)
- Motor combustión interna alternativo (engine) - cilindro
- Sistema de escape

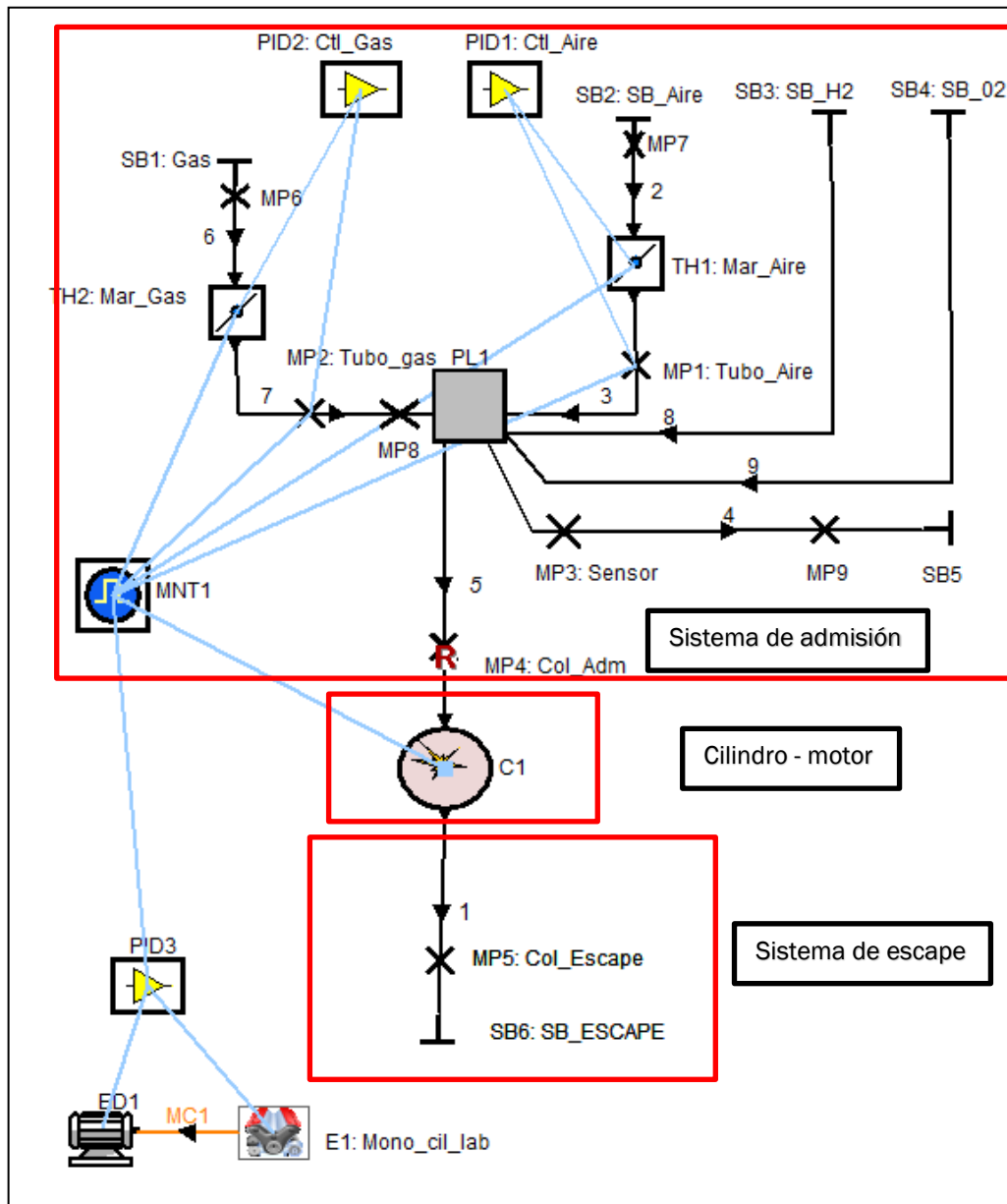


Figura 17. Partes del modelo

3.3.1 Sistema de Admisión

El subgrupo considerado como sistema de admisión agrupa a todos los elementos presentados en la figura 16. A continuación se ha realizado una descripción detallada de cada admisión de forma independiente, con especial interés en el caso simulado: admisión de gas natural y oxígeno.

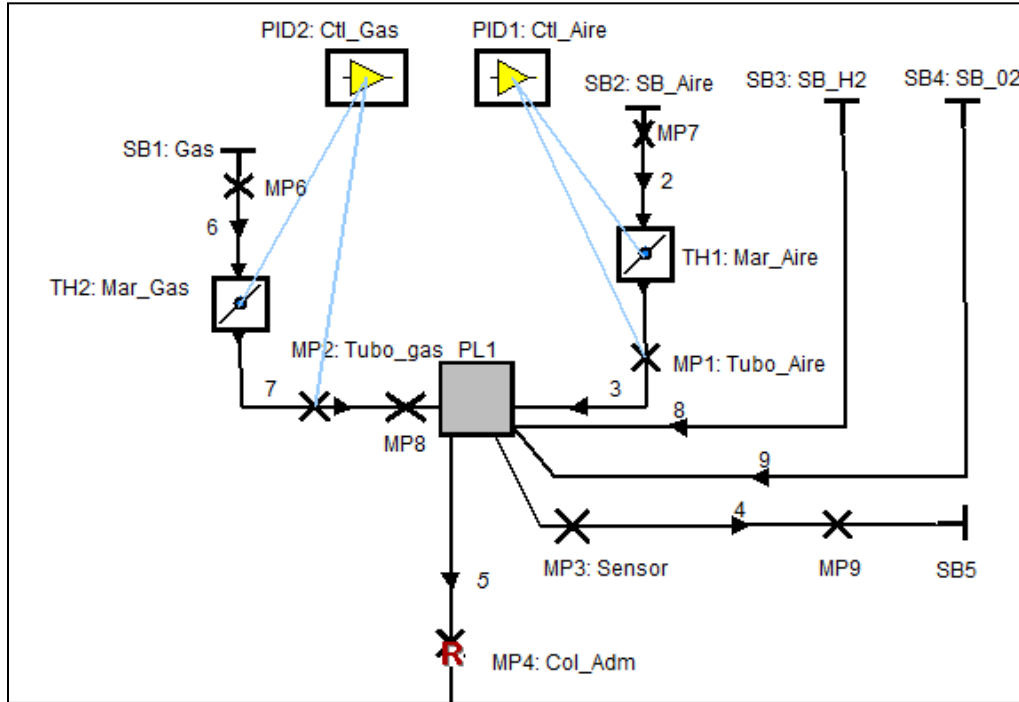


Figura 18. Sistema de admisión completo

3.3.1 Admisión de gas natural

En la figura 17, se muestran todos los elementos que han sido utilizados para la definición del proceso de entrada de gas natural. La dirección del flujo de gas natural es la mostrada por las flechas de la figura.

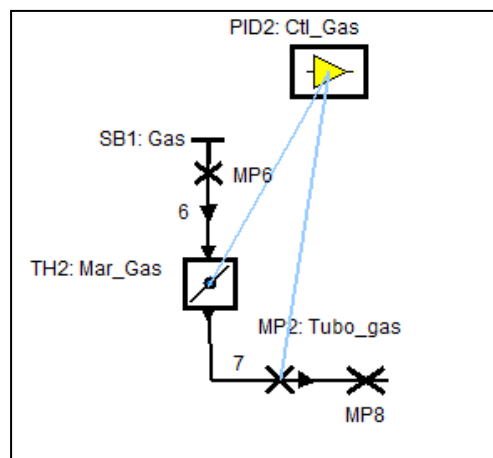


Figura 19. Admisión gas natural

3.3.1.1 Frontera de Entrada “SB1”

Este elemento representa las condiciones iniciales en las que se suministra el gas natural siendo estas las definidas en la figura18. Como ya se citó en apartados anteriores, todos los componentes relacionados con la admisión de gas natural se corresponden con los valores del Set2. Cabe destacar que como el gas natural es un combustible la concentración de fuel vapour tiene que ser parametrizada con el valor 1.

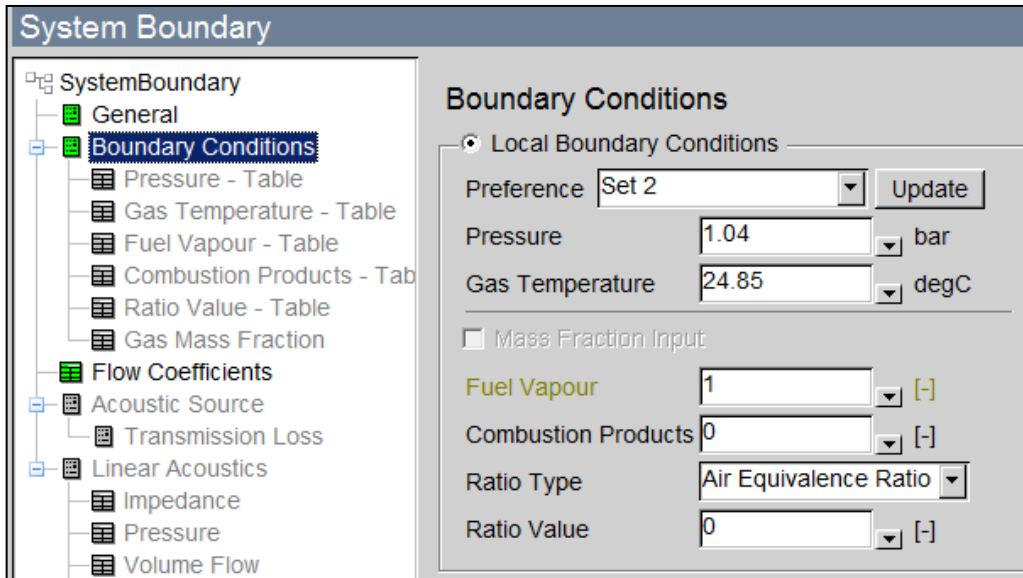


Figura 20. Condiciones iniciales frontera admisión gas natural

Los coeficientes de flujo en el conducto de entrada de dicho gas natural son los definidos en la figura19.

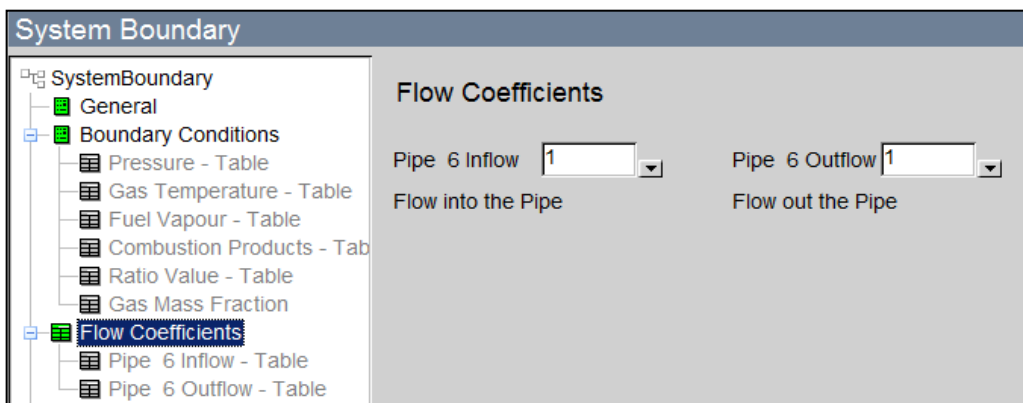


Figura 21. Coeficientes de flujo frontera admisión gas natural

3.3.1.2 Conducto Gas Natural “6”

Este conducto no existe en la instalación real, pero ante la imposibilidad de unir la condición de entrada (SB1) con la válvula de mariposa del gas (throttle2) para crear un controlador mass-flow, ha sido necesario su definición. Las

dimensiones de dicho conducto no influyen en la simulación al ser despreciables en longitud frente a las del conducto real, quedando definidas en la figura20.

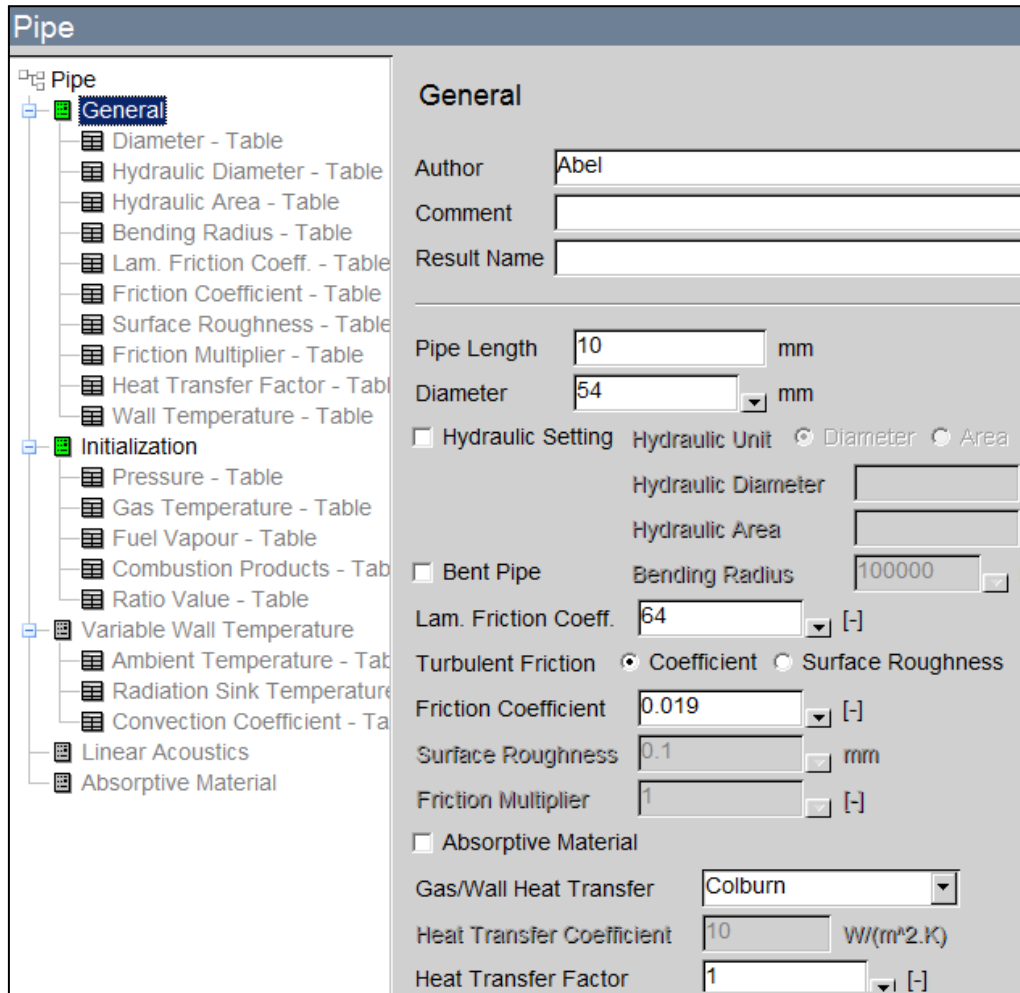


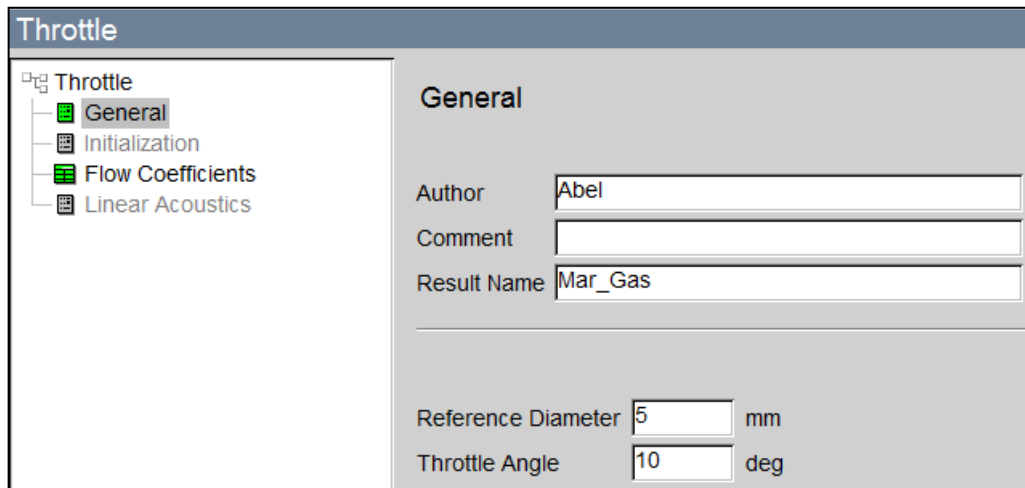
Figura 22. Características conducto "6"

3.3.1.3 Válvula de mariposa ("Throttle 2")

Este componente permite ajustar el flujo que circula por él. Normalmente produce una pérdida de presión, al producirse una reducción de la sección de la tubería y por lo tanto un estrangulamiento. En nuestro modelo se ha utilizado para crear un regulador de flujo másico (mass-flow).

En la figura21, se describen las dimensiones básicas en la que se ha utilizado un nombre auxiliar para facilitar un futuro análisis de los resultados "Mar_Gas":

- Diámetro de la válvula de mariposa (Reference Diameter)
- Posición angular inicial de la mariposa (Throttle Angle).



Throttle

- Throttle
 - General
 - Initialization
 - Flow Coefficients
 - Linear Acoustics

General

Author: Abel

Comment:

Result Name: Mar_Gas

Reference Diameter: 5 mm

Throttle Angle: 10 deg

Figura 23. Definición mariposa admisión Gas Natural

Los coeficientes de flujo de este componente se describen en función de la posición angular de la mariposa, figura22. Estando relacionado directamente los coeficientes de flujo con el grado de apertura de dicha mariposa. Los valores de inicialización se corresponden con el Set2.

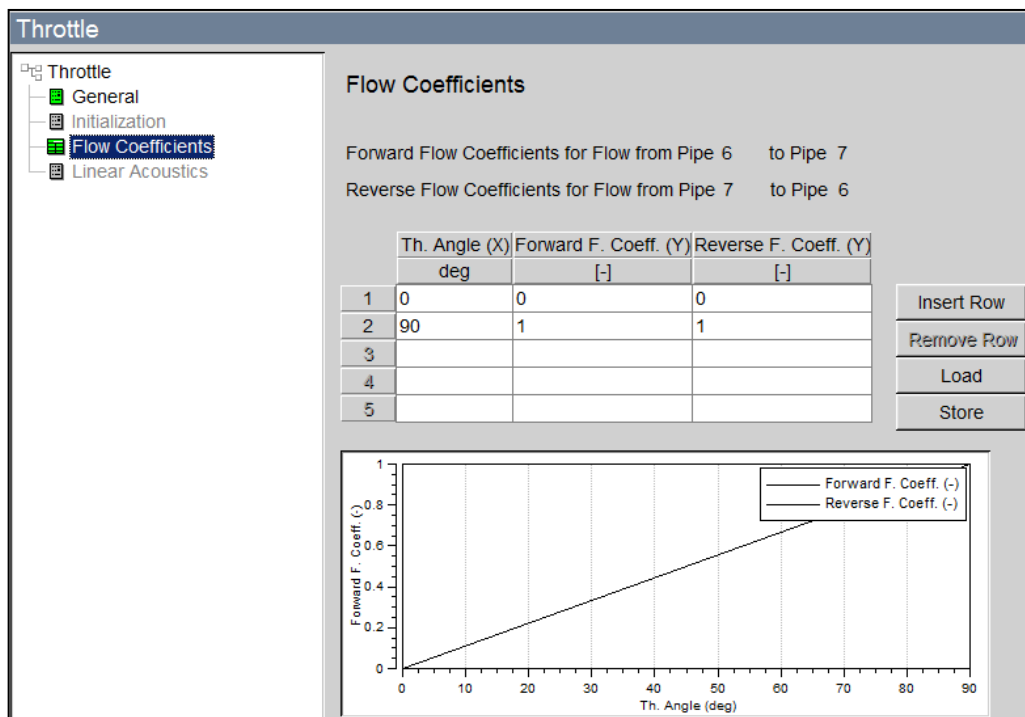


Figura 24. Coeficientes de flujo mariposa admisión Gas Natural

3.3.1.4 Conducto Gas Natural “7”

La longitud del conducto es igual a 2180mm y de diámetro variable en función de la longitud. Para poder introducir los valores de sección variable se ha

creado una tabla en función del diámetro. Esta tabla se ha introducido en el programa seleccionando la opción “Table” dentro del diámetro, figura23.

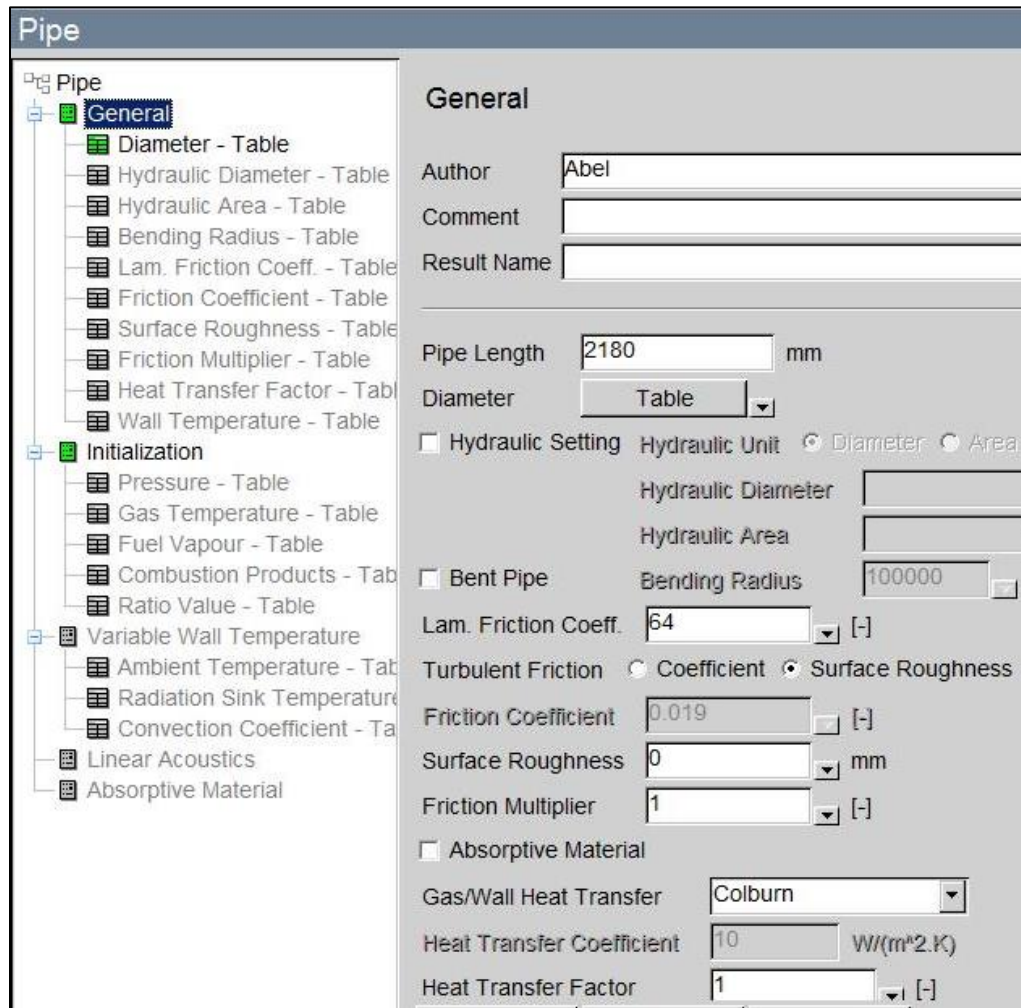


Figura 25. Características conducto “7”

Como se muestran en la figura24, los primeros 2100 mm de conducto tienen diámetro 12mm y en los últimos 180 mm se produce el cambio de diámetro a 20 mm.

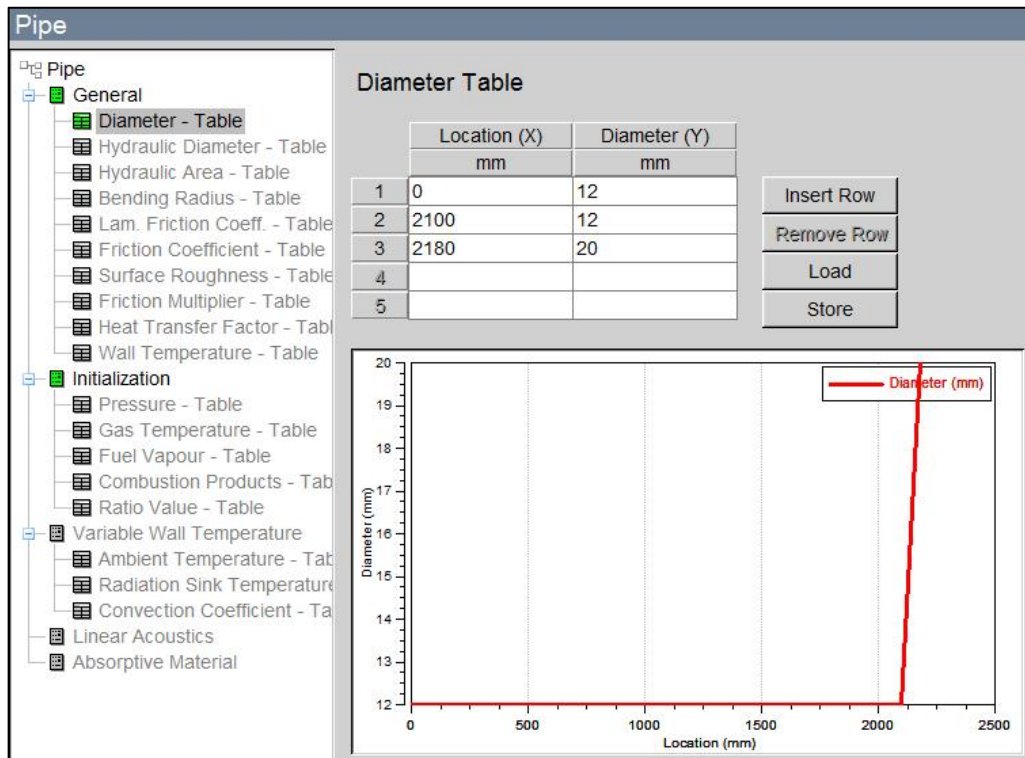


Figura 26. Tabla variación diámetro conducto "7"

Deben de imponerse las condiciones iniciales, como nos encontramos en lo referente al conducto de gas natural son igual al Set2.

3.3.2 Admisión de aire

En la figura25 quedan representados todos los elementos que han sido utilizados para definir el proceso de entrada de aire. El flujo de aire en el modelo sigue las fechas definidas en la figura.

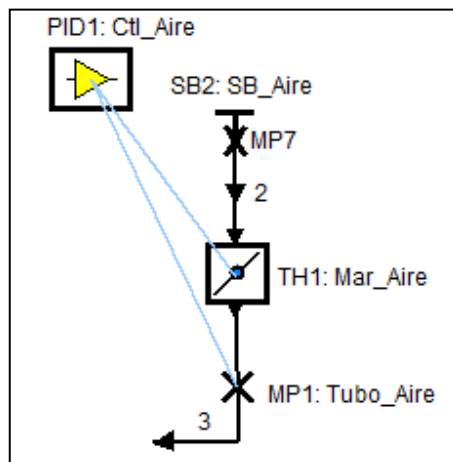


Figura 27. Admisión aire

3.3.2.1 Frontera de Entrada “SB2”

Este componente representa las condiciones iniciales en las que se suministra el aire siendo estas las definidas en la figura 26. Como ya se citó en apartados anteriores, las condiciones fronteras de admisión de aire se corresponden con los valores del Set1, temperatura ambiente 24,85°C y presión 2 bares. Como el aire no se comporta como combustible principal en el motor el fuel vapour se ha parametrizado con el valor 0.

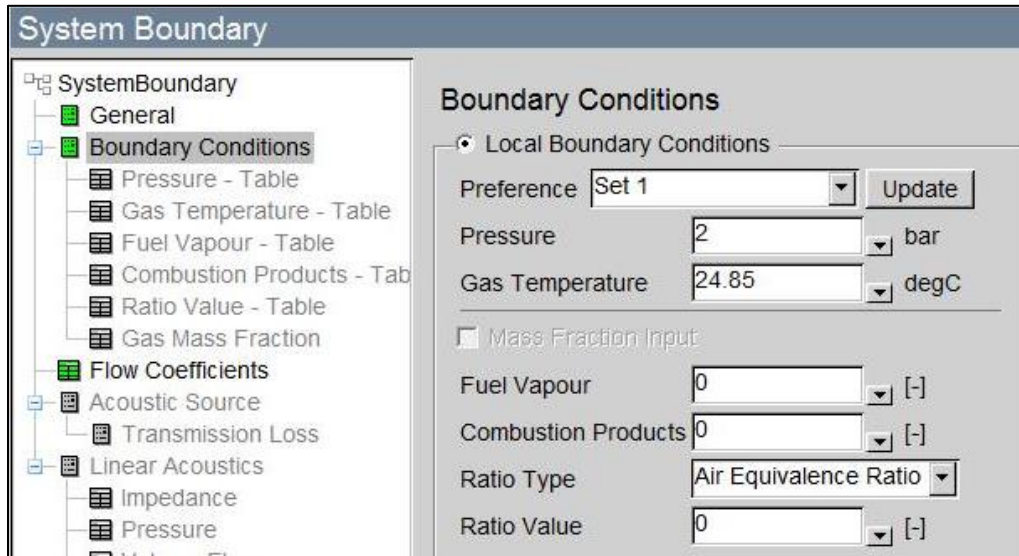


Figura 28. Condiciones iniciales frontera admisión aire

Los coeficientes de flujo en el conducto de entrada de aire son los representados en la figura 27.

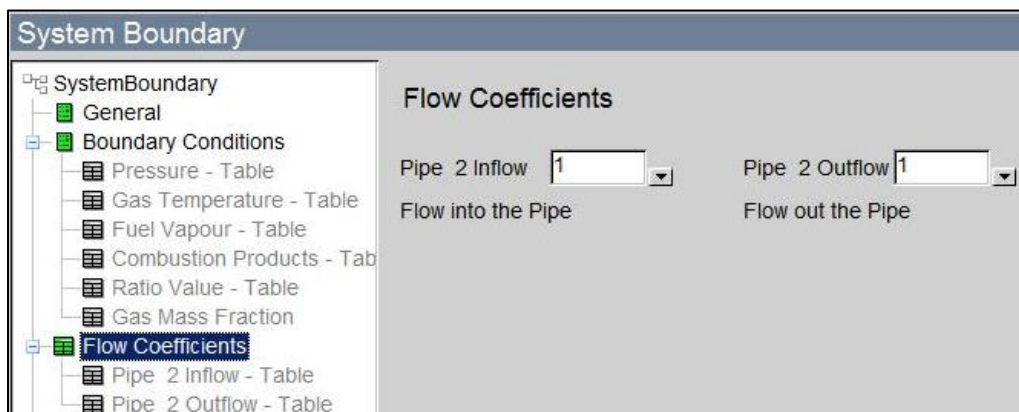


Figura 29. Coeficientes de flujo frontera admisión aire

3.3.2.2 Conducto Admisión Aire “2”

Este conducto no existe en la instalación real, pero como en el caso de admisión de combustible para definir el mass-flow de entrada de aire ha sido necesario su definición la condición de entrada (SB2) y la válvula de mariposa

regulación de aire (throttle1) Las dimensiones de dicho conducto no influyen en la simulación al ser despreciables en longitud frente a las del conducto real, quedando definidas en la figura28.

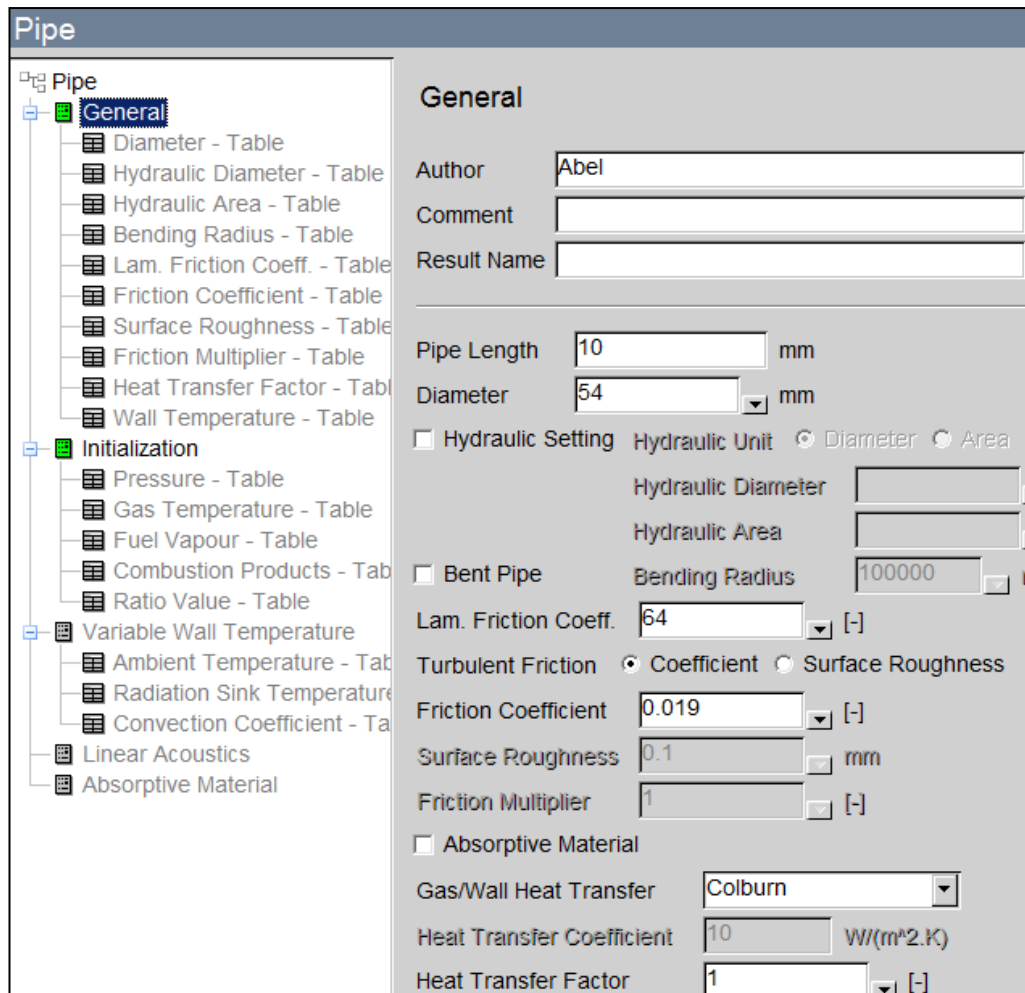


Figura 30. Características conducto "2"

3.3.2.3 Válvula de mariposa ("Throttle 1")

Elemento que ha sido definidor para regular el flujo de aire que entra la admisión. Genera una pérdida de presión al producirse una reducción de la sección de la tubería y por lo tanto un estrangulamiento. En nuestro caso utilizamos este elemento para crear un mass-flow como regular de caudal másico, de forma semejante al definido para flujo de combustible.

En la figura29, se describen las dimensiones básicas de dicho elemento en la que se ha definido un nombre auxiliar para facilitar su visualización "Mar_Aire", el diámetro de la válvula de mariposa (15mm) y la posición angular inicial en la que se encuentra dicha mariposa (65°)

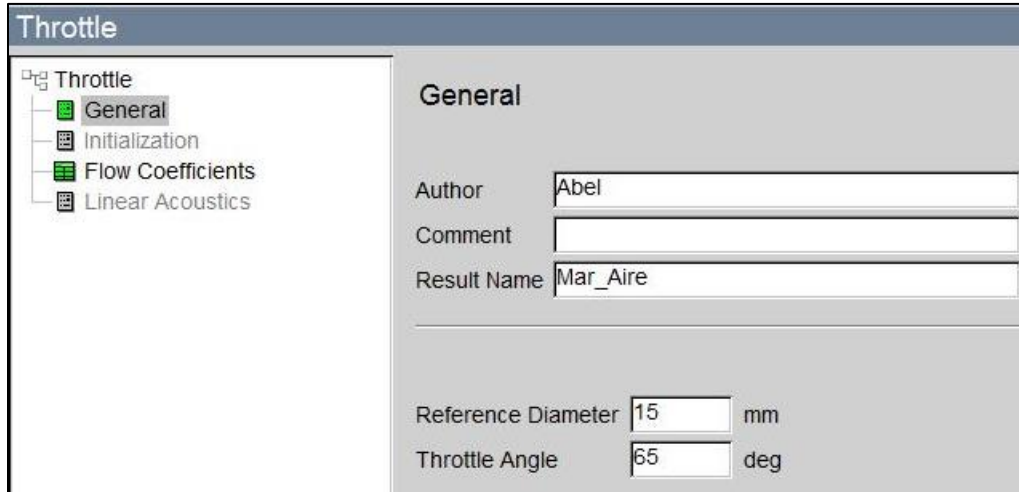


Figura 31. Definición mariposa admisión aire

Los coeficientes de flujo de este componente se describen en función de la posición angular de la mariposa, figura30. Estando relacionado directamente los coeficientes de flujo con el grado de apertura de dicha mariposa. Los valores de inicialización se corresponden con el Set1.

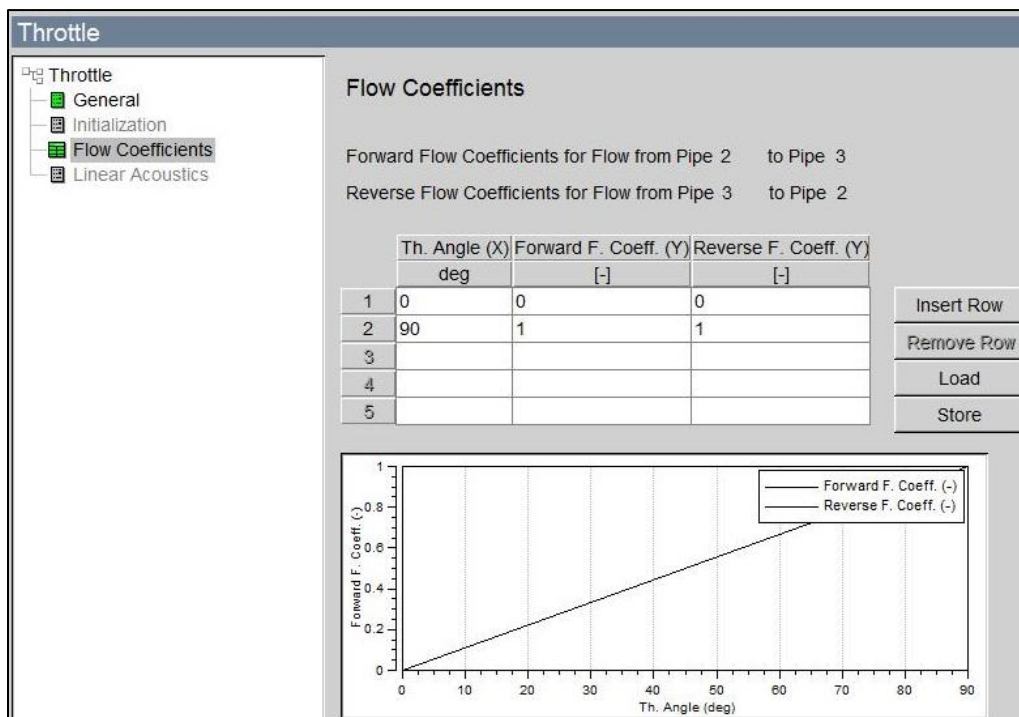


Figura 32. Coeficientes de flujo mariposa admisión aire

3.3.2.4 Conducto Aire “3”

La longitud del conducto es igual a 2180mm y de diámetro 12mm, en este elemento se ha considera conducto recto por eso no se selecciona la opción de bent pipe y sección constante figura31.

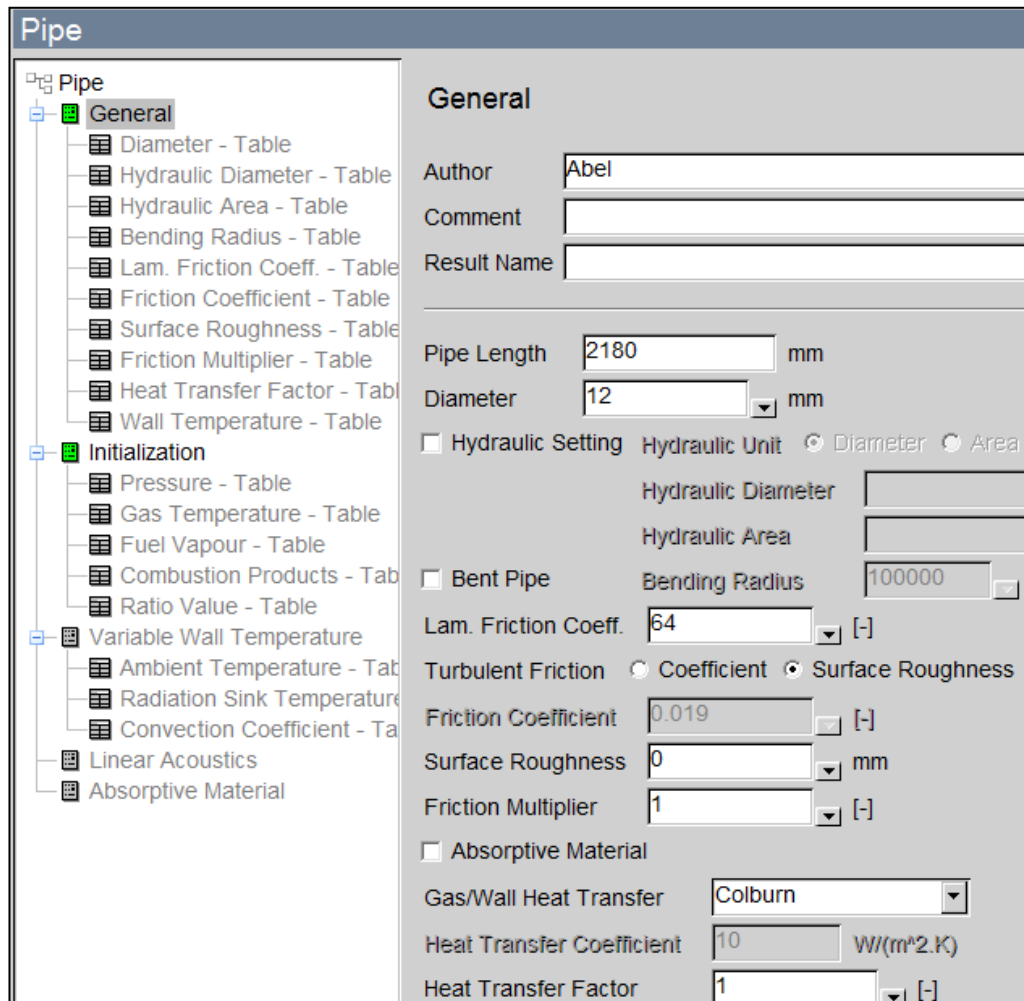


Figura 33. Característica conducto "3"

Deben de imponerse las condiciones iniciales, como el conducto se encuentra en la admisión de aire el valor set correspondiente a la inicialización es igual al Set1.

3.3.3 Admisión de hidrogeno y oxigeno

Este componente representa las condiciones iniciales en las que se suministra el aire siendo estas las definidas en la figura 28. Como ya se citó en apartados anteriores, las condiciones fronteras de admisión de aire se corresponden con los valores del Set1, temperatura ambiente 24,85°C y presión 2 bares. Como el aire no se comporta como combustible principal en el motor el fuel vapour se ha parametrizado con el valor 0.

En la figura32 y 33, quedan representados todos los elementos que han sido utilizados para definir el proceso de entrada de hidrógeno y oxígeno. En este proyecto no se ha simulado combustión de hidrogeno y oxigeno como

combustible, pero el modelo está definido para poder simularse de forma completa con dichos gases.

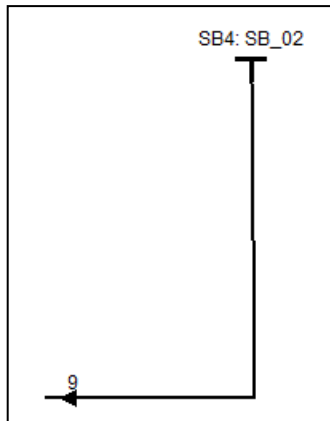


Figura 34. Admisión O₂

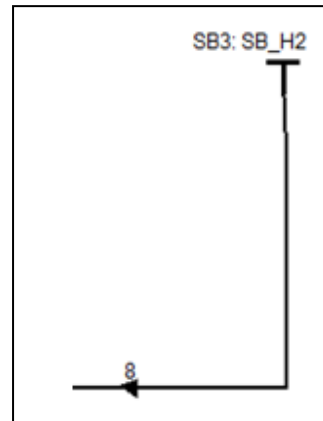


Figura 35. Admisión H₂

A continuación se ha definido cada uno elemento de una forma más precisa:

3.3.3.1 Frontera de Entrada “SB3” y “SB4”

Estos elementos definen las condiciones iniciales en las que se ha suministrado el hidrogeno y oxigeno como se muestra en la figura34, correspondientes al Set3. La temperatura de entrada es la ambiente 24,85 °C y la presión 1,5 bar.

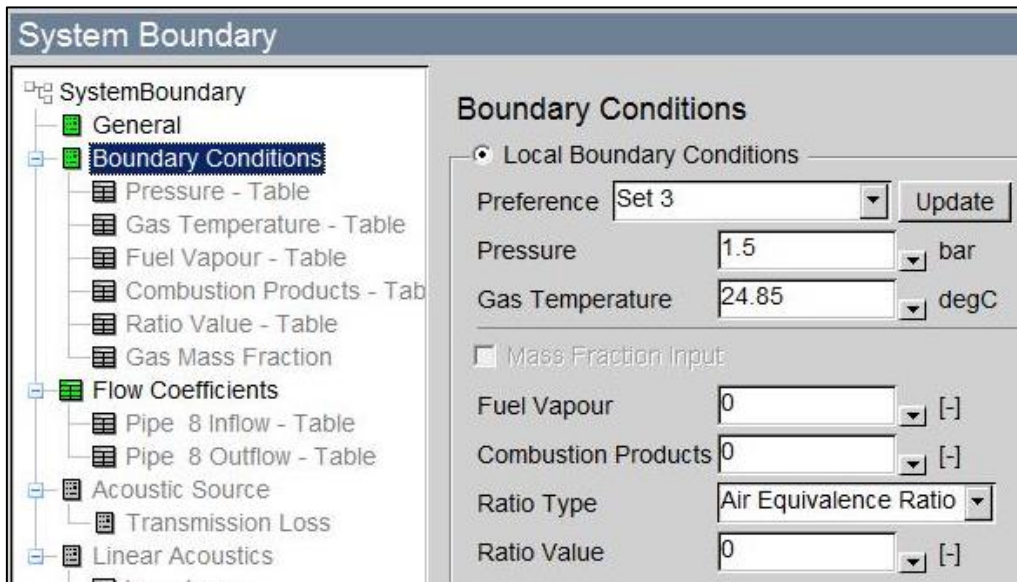


Figura 36. Condiciones iniciales aire frontera admisión H₂ y O₂

Los coeficientes de flujo en el conducto de entrada de dichos gases son los representados en la figura35.

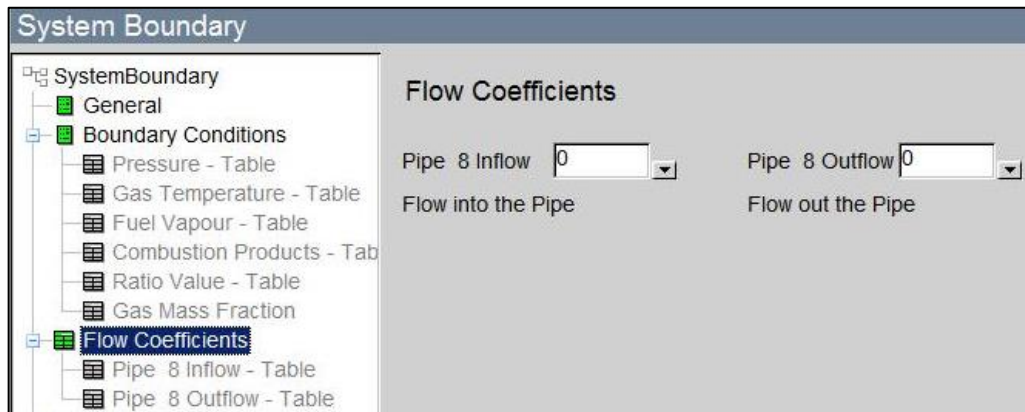


Figura 37. Coeficientes de flujo frontera admisión H2 y O2

3.3.3.2 Conducto Admisión Hidrogeno “8” y Oxigeno “9”

La longitud del ambos conductos es igual a 1460mm y de diámetro 8mm como se ha muestra en la figura36.

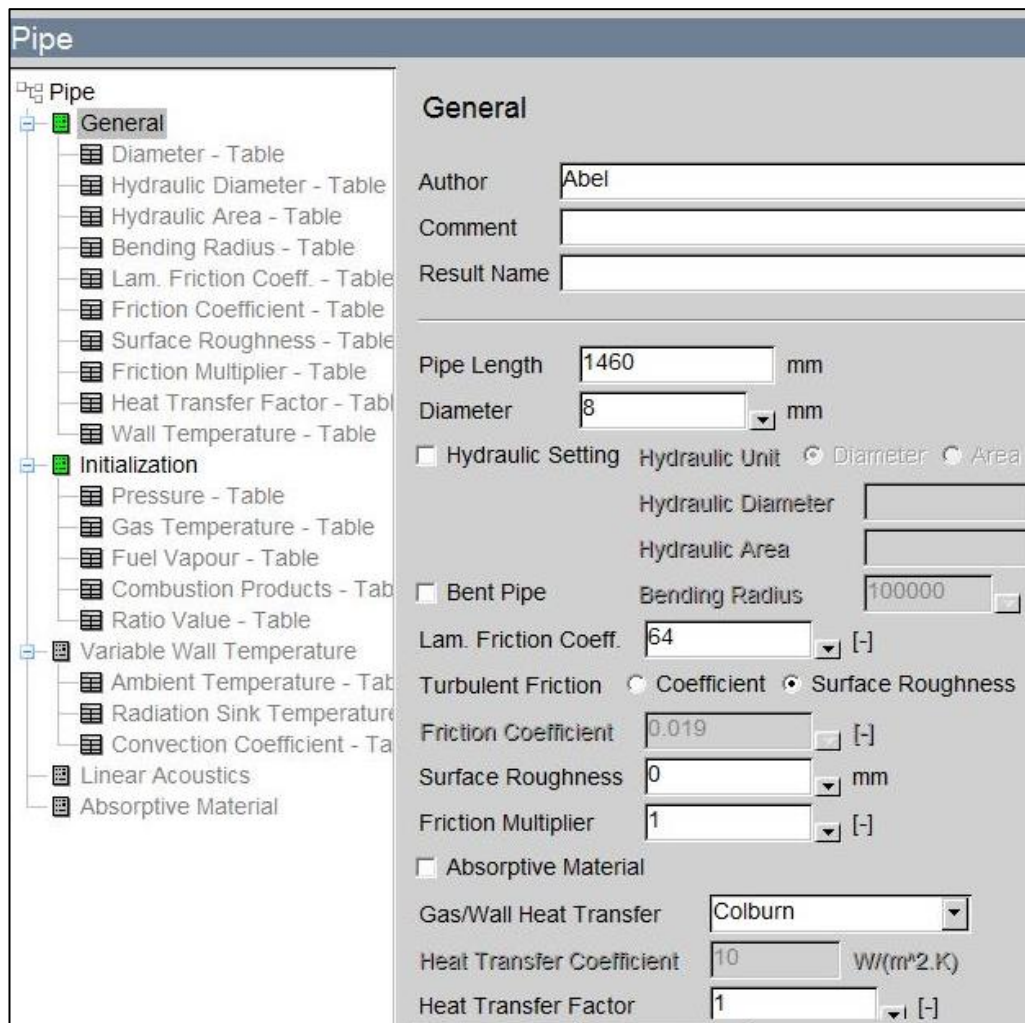


Figura 38. Características conducto “8” y “9”

Se han establecido las condiciones iniciales, al pertenecer a la admisión de H₂ y O₂ son igual a la configuración del Set 3.

3.3.4 Colector de admisión

En la figura 37, quedan representados todos los elementos que han sido utilizados para definir el colector de admisión del cilindro.

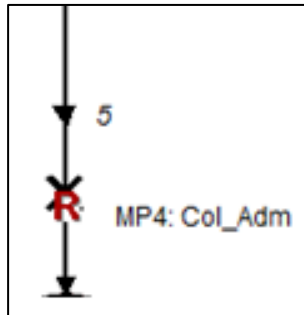


Figura 39. Colector admisión

3.3.4.1 Conducto colector admisión mezcla "5"

La longitud de ambos conductos es igual a 100mm y de diámetro 26mm como se ha muestra en la figura 38.

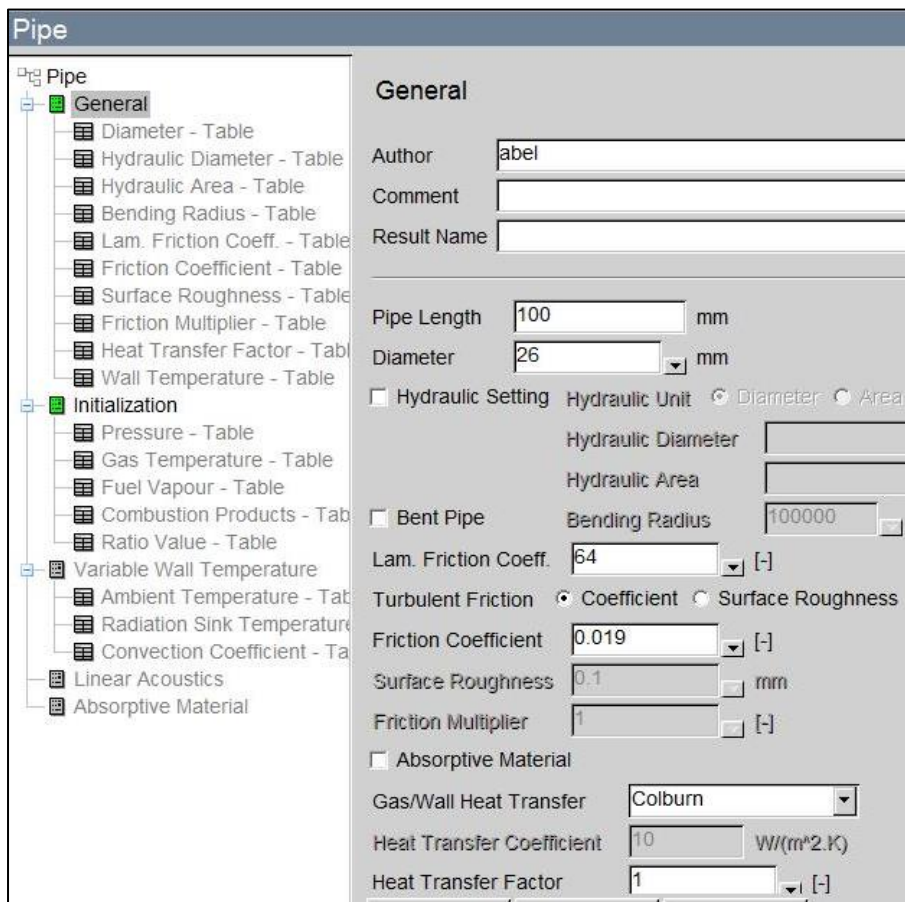


Figura 40. Características conducto "5"

Se han establecido las condiciones iniciales, al encontrarnos en el colector de admisión de mezcla aire y combustible igual a la configuración del Set 4, como se muestra en la figura39.

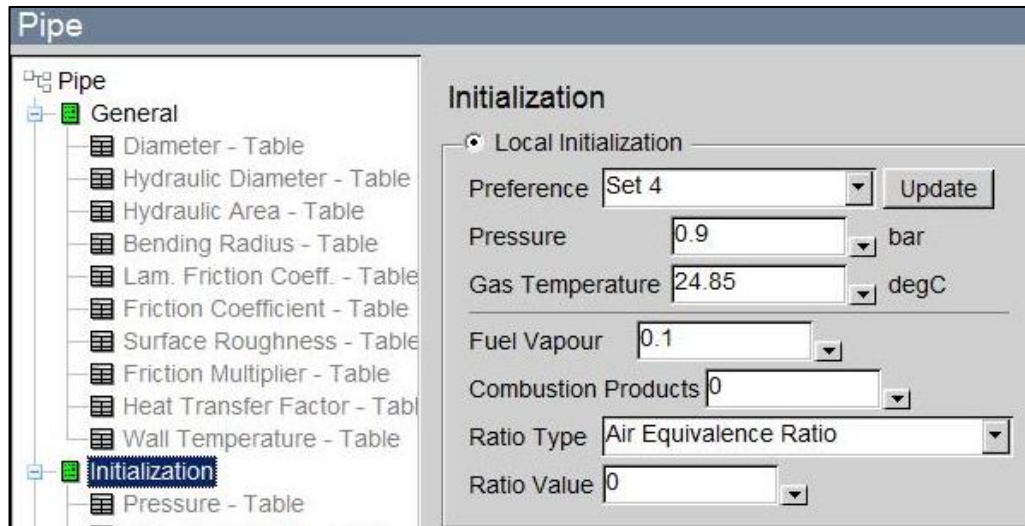


Figura 41. Inicialización conducto "5"

Cabe destacar que como la mezcla posee combustible la concentración de fuel vapour debemos caracterizarla como 0,1 aunque durante la simulación el propio software controlara dicha parámetro.

3.3.2 Sistema control, Pid controler (Controlador PID)

Comenzados definiendo que este tipo de elemento, es un elemento de control. Se utiliza en nuestro modelo junto a la válvula de mariposa para simular un controlador de flujos másico al que denominaremos controlador **mass-flow**. Al ser dicho PID un controlador por realimentación, calcula el error que existe entre el valor de la variable que estamos controlando, mediante el sensor específico y el valor que hemos impuesto como consigna a alcanzar a dicha variable.

Según el valor de este error el controlador emite una señal u otra. Modificando el grado de apertura angular de la mariposa. Intentando minimizar en cada iteración el error cometido hasta alcanzar el valor de consigna.

Este tipo de elemento se caracteriza con tres variables fundamentales:

- Proportional (proporcional): este valor afecta directamente a la estabilidad del proceso. Siendo igual al error multiplicado por K_p la ganancia.

$$P_i = K_p * e_i$$

Ecuación [5]

- Integral: valor responsable de la reducción del error, intentando hacer dicho valor nulo. Siendo igual a la integral del error multiplicado por K_i la ganancia.

$$I_i = K_i * \int_0^t e_k * dt \quad \text{Ecuación [6]}$$

- Differential (derivativo): valor que afecta al tiempo de respuesta del sistema. Siendo igual a la derivada del error multiplicada por K_d la ganancia.

$$D_i = \frac{K_d}{\Delta t_i} * (e_i - e_{i-1}) \quad \text{Ecuación [7]}$$

El sistema de control utilizado queda definido por la variable AV_i , como la suma de los tres valores definidos anteriormente.

$$AV_i = P_i + I_i + D_i \quad \text{Ecuación [8]}$$

Durante la definición de nuestro modelo, el término integral es el más crítico ya que caracteriza el comportamiento del sistema. Consideramos el termino derivativo despreciable frente al integral y proporcional.

Para el ajuste de estos valores se realizaron diferentes simulaciones con el modelo intentando reducir el valor del error a valor nulo, con la mayor rapidez posible. Para estas simulaciones ha sido especialmente útil el elemento monitor, el cual nos permite observar la evolución en tiempo real de las variables controladas.

A continuación se muestra de forma más detallada la configuración de cada controlador PID utilizado en el modelo:

- **PID Admisión Aire**

En la figura40, se muestra remarcado los elementos que actúan sobre el control de entrada de aire en nuestro sistema. El problema del sistema de control creado reside en que el control se encuentra en el plenum del modelo pero en dicho punto no podemos medir. Para solucionar esto colocamos puntos de medida en el punto extremo de cada conducto controlado, que equivale a medir en el plenum.

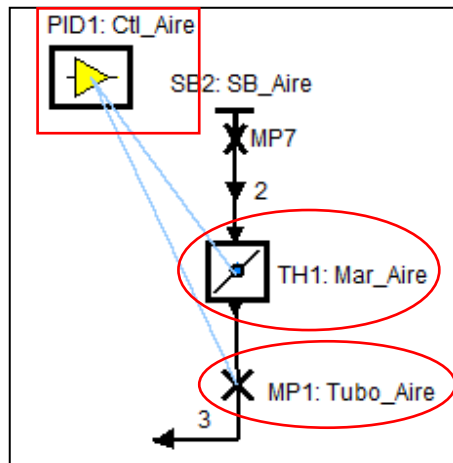


Figura 42. Sistema control admisión Aire

A continuación se muestran los valores obtenidos realizando el ajuste del modelo para reducir el error en la admisión de aire a valores nulos:

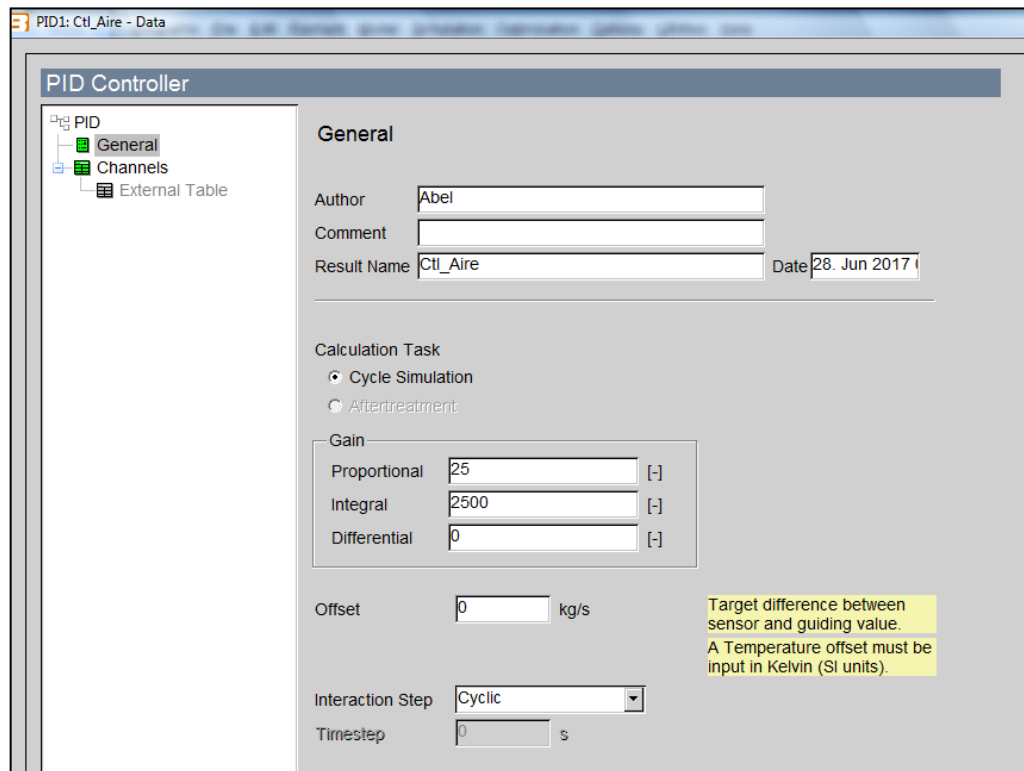


Figura 43. Valores PID control admisión Aire

Como ya se adelantó en apartados anteriores el actuador en la admisión de aire se realiza sobre el ángulo de apertura de la mariposa (throttle 1), quedando definido el controlador PID en la figura 41.

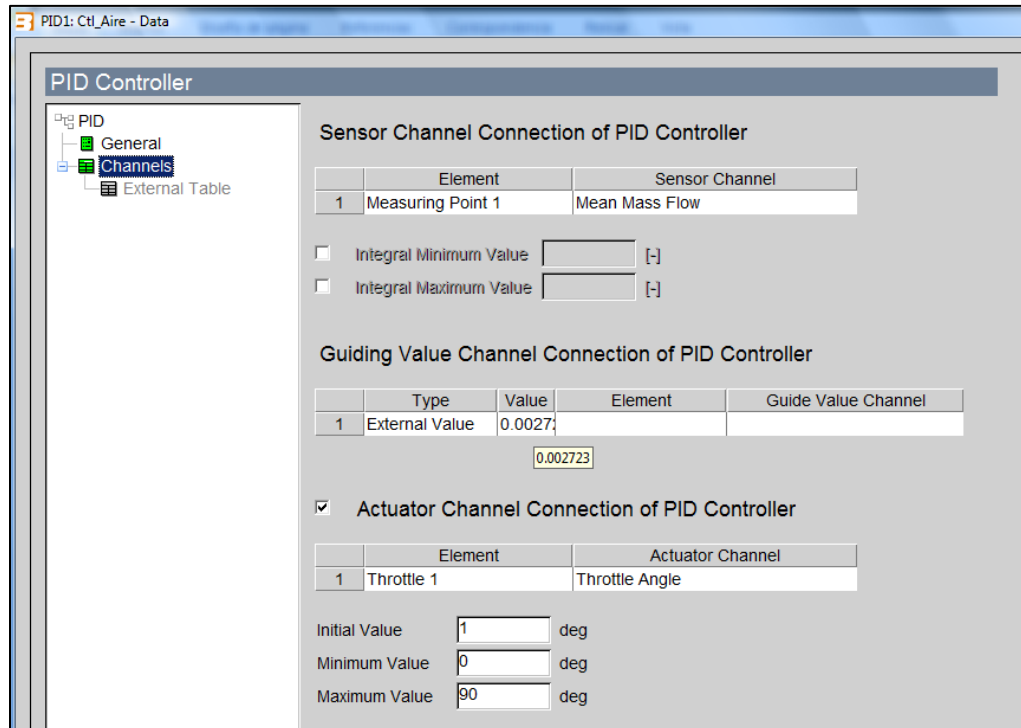


Figura 44. Configuración sensor y actuador PID aire

El sensor del controlador se fija en el MP1 (Measuring Point 1), que como definimos antes se encuentra en el extremo final del conducto de entrada, figura42. Dicho punto de medida se comporta como un transductor de presión donde el software calcula las propiedades termodinámicas del aire. El valor del sensor es la variable medida, el cual se utiliza como guía para llegar a la consigna definido como fija. En este caso el valor fijado es igual a 0.002723 kg/s.

Tal y como se describió anteriormente para el ajuste de la configuración de los valores del PID se ha utilizado un elemento del software denominado monitor, cuyos resultados se muestran en los siguientes apartados.

- PID Admisión Gas

En la figura43, se muestra remarcado los elementos que actúan sobre el control de entrada de gas natural en nuestro sistema. El problema del sistema de control creado reside en que el control se encuentra en el plenum del modelo pero en dicho punto no podemos medir. Para solucionar esto colocamos puntos de medida en el punto extremo de cada conducto controlado, que equivale a medir en el plenum.

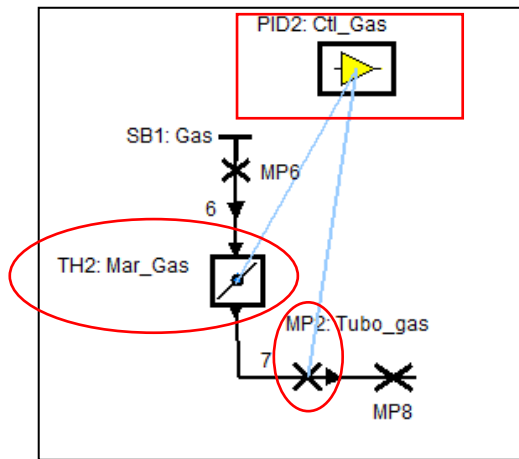


Figura 45. Sistema control admisión Gas Natural

A continuación se muestran los valores que se han obtenido realizando el ajuste del modelo para reducir el error en la admisión de gas natural a valores nulos:

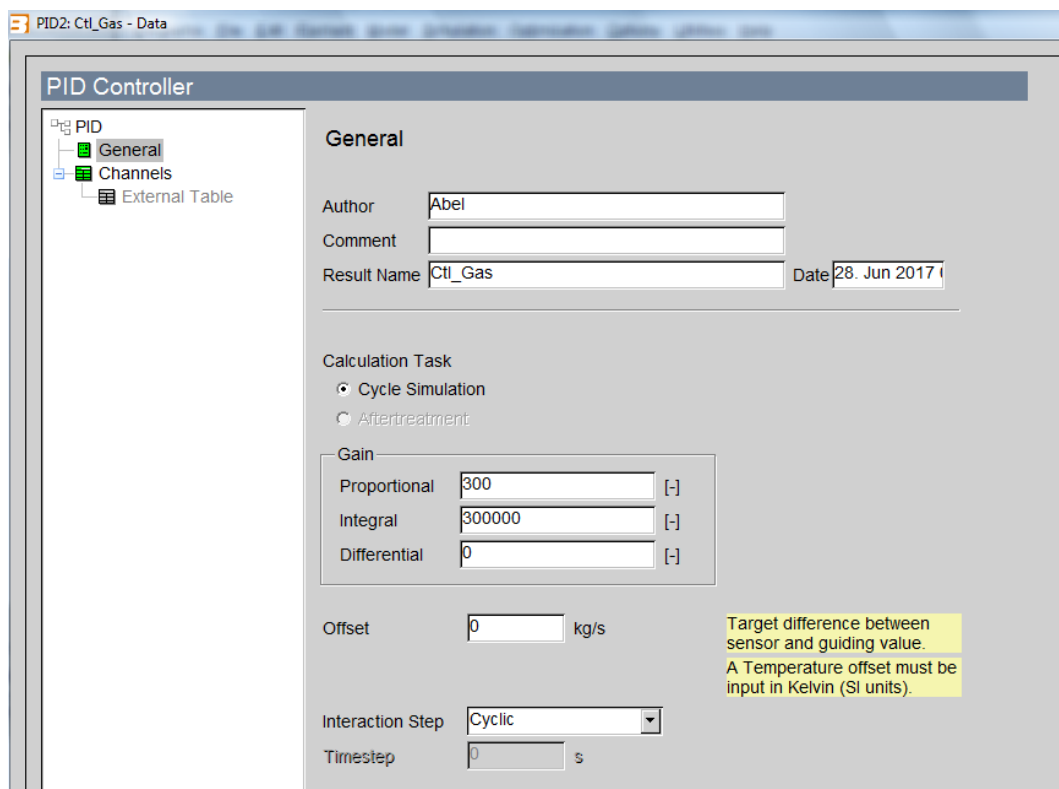


Figura 46. Valores PID control admisión Gas natural

Como ya se adelantó en apartados anteriores el actuador en la admisión de gas natural se realiza sobre el ángulo de apertura de la mariposa (throttle 2), quedando definido el controlador PID en la figura44.

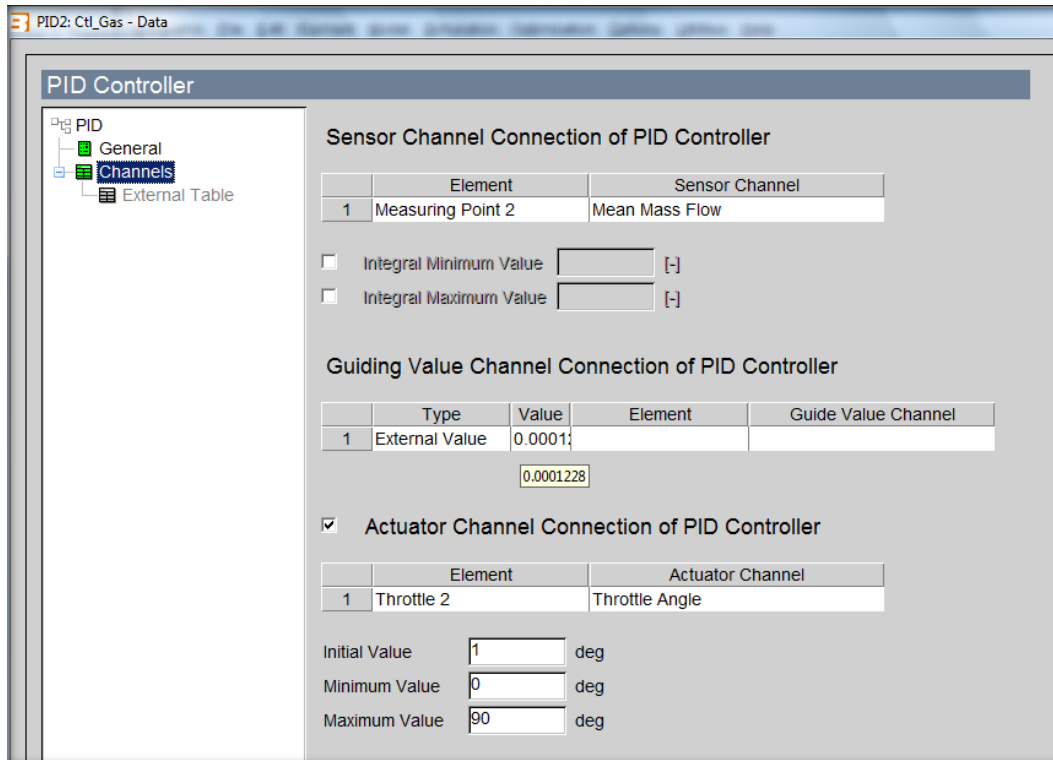


Figura 47. Configuración sensor y actuador PID Gas natural

El sensor del controlador se fija en el MP2 (Measuring Point 2), que como definimos antes se encuentra en el extremo final del conducto de entrada figura45. Dicho punto de medida se comporta como un transductor de presión donde el software calcula las propiedades termodinámicas del gas natural. El valor del sensor es la variable medida, el cual se utiliza como guía para llegar a la consigna definido como fija. En este caso el valor fijado es igual a 0.0001228 kg/s.

Tal y como se describió anteriormente para el ajuste de la configuración de los valores del PID se ha utilizado un elemento del software denominado monitor, cuyos resultados se muestran en los siguientes apartados.

- PID par motor

En la figura46, se muestra remarcado los elementos que actúan sobre el control de par motor, la cual es transformada en energía eléctrica mediante el transformador eléctrico.

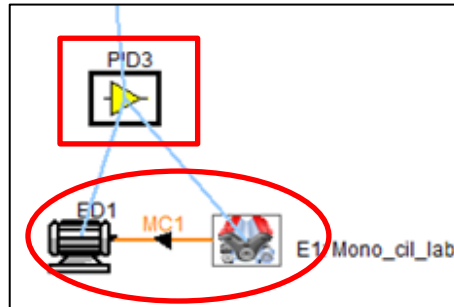


Figura 48. Sistema control par motor

A continuación se muestran los valores que se han obtenido realizando el ajuste del modelo para reducir el error del par motor a valores mínimos:

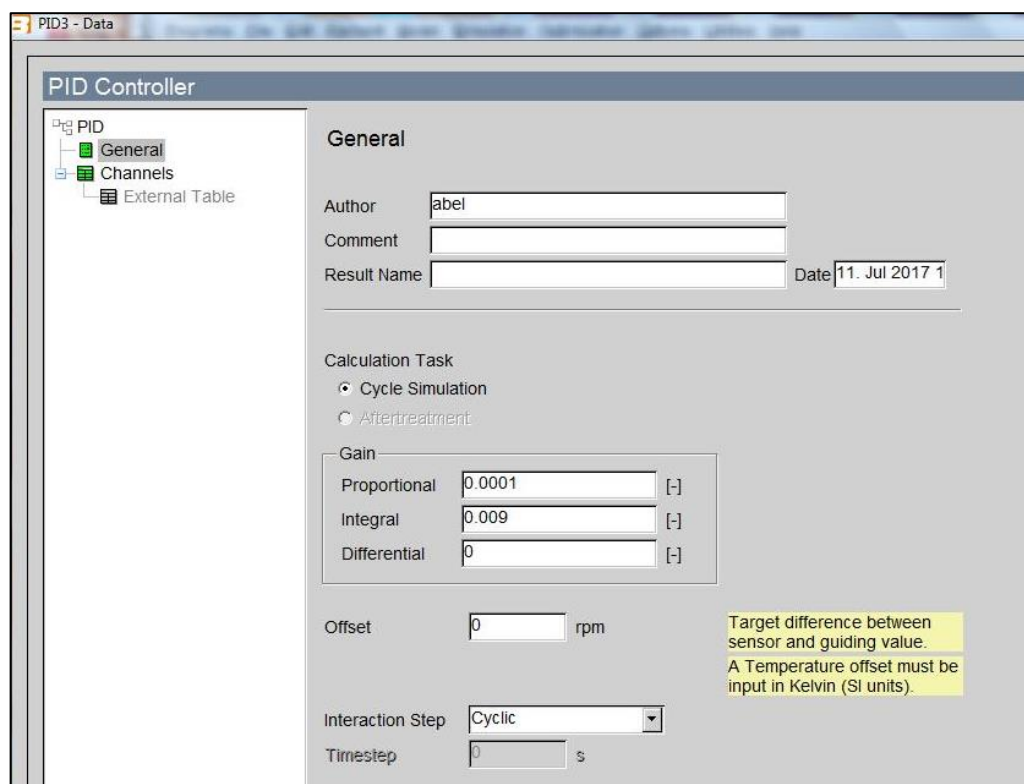


Figura 49. Valores PID control admisión par motor

Para poder realizar el control el actuador modifica el par del motor mediante el elemento eléctrico definido en el modelo (electric device 1), quedando definido el pid según la figura47.

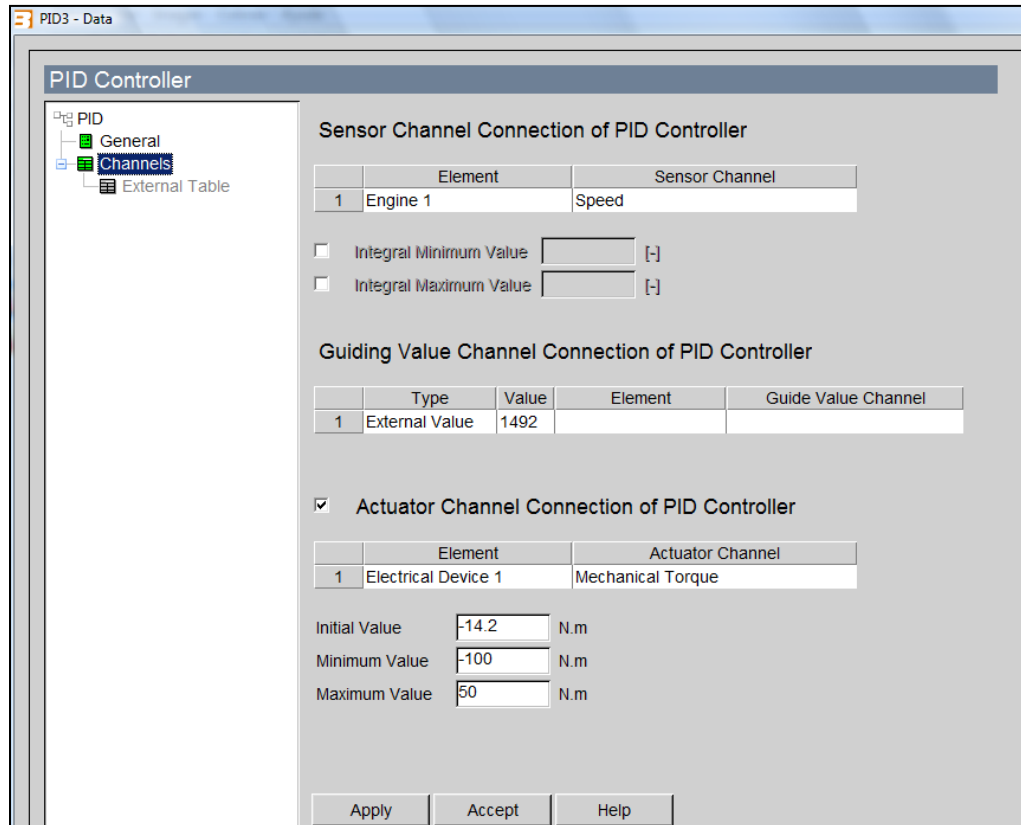


Figura 50. Configuración sensor y actuador par motor

El sensor del controlador se fija en el motor. El valor del sensor es la variable medida, el cual se utiliza como guía para llegar a la consigna definido como fija. En este caso el valor fijado es igual a 1492 rpm, referido a la velocidad del motor.

Tal y como se describió anteriormente para el ajuste de la configuración de los valores del PID se ha utilizado un elemento del software denominado monitor, los resultados se muestran en los siguientes apartados.

3.3.3 Motor

En este apartado se han configurado todos los parámetros característicos del motor utilizado en el modelo, además de los reglajes del mismo atendiendo a la combustión. No se consideran las pérdidas por fricción, aunque se sabe que afectan negativamente tanto al consumo de combustible que aumenta, como a la obtención de un trabajo de salida menor. Debido a que no se poseen los datos suficientes para poder introducir dichas pérdidas en el modelo.

Parámetros generales

Se ha comenzado definiendo en la imagen 3 el régimen de giro de nuestro que motor, que se mantiene constante a 1500 rpm. Además se caracteriza el tipo, en nuestro caso un motor de combustión interna de cuatro tiempos (4-Stroke), sin realizar un control sobre la presión media efectiva (BMEP Control)

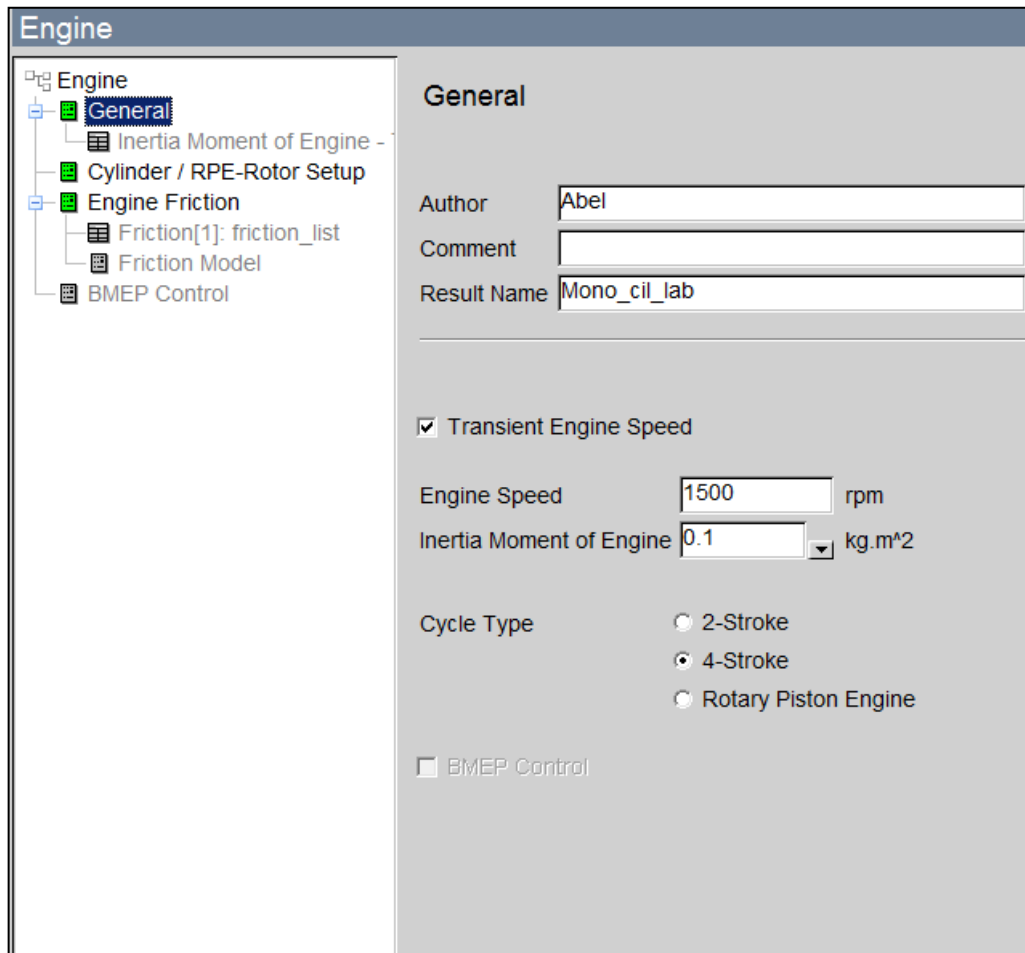


Figura 51. Definición general motor

- **Angulo de encendido motor**

El modelo al estar compuesto únicamente por un cilindro, solamente se ha definido el ángulo de encendido de un cilindro como se observa en la imagen 4. Si nuestro modelo constara de dos o más cilindros se tendría que especificar el ángulo de encendido de todos los cilindros del modelo. El ángulo introducido corresponde a la distancia angular desde el punto inicial que corresponde con el ángulo 0° del cigüeñal. En nuestro monocilindro el ángulo de encendido se ha situado en 360° para hacerlo coincidir con el PMS.

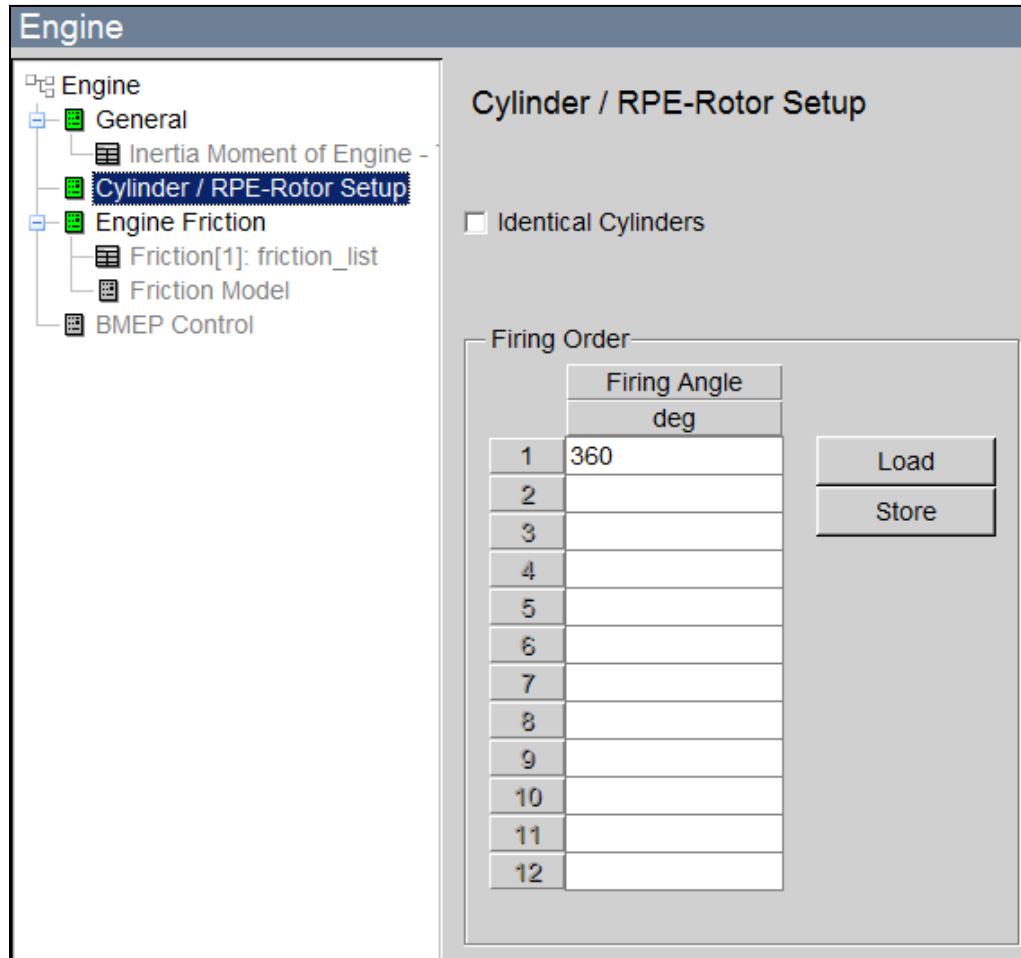


Figura 52. Angulo de encendido del motor

3.3.4 Cilindros

3.3.4.1 Dimensiones Básicas

Para definir este elemento en nuestro modelo, el más complejo de configurar se deben de especificar tanto sus dimensiones principales, características del proceso de combustión, aspectos relativos a la transferencia de calor, condiciones iniciales y configuración tanto de las válvulas de admisión como de escape.

Como nota a considerar para la configuración correcta sobre todo de las leyes de combustión, hay que tener especial atención cuando se está seleccionando un ángulo de cero grados en el cigüeñal, el software está considerando que dicha referencia es igual al ángulo impuesto en la imagen correspondiente al encendido del cilindro.

En la figura 51, se definen los parámetros característicos del cilindro:

- Diámetro (Bore)
- Carrera (Stroke)

- Relación de compresión (Compression Ratio)
- Longitud de la biela (Con-Rod Length)
- Desplazamiento del bulón del pistón respecto al eje de simetría (Piston Pin Offset)
- Effective Blow-By Gap (espacio efectivo Blow-By)
- Mean Crankcase Pressure (presión principal en el cárter)

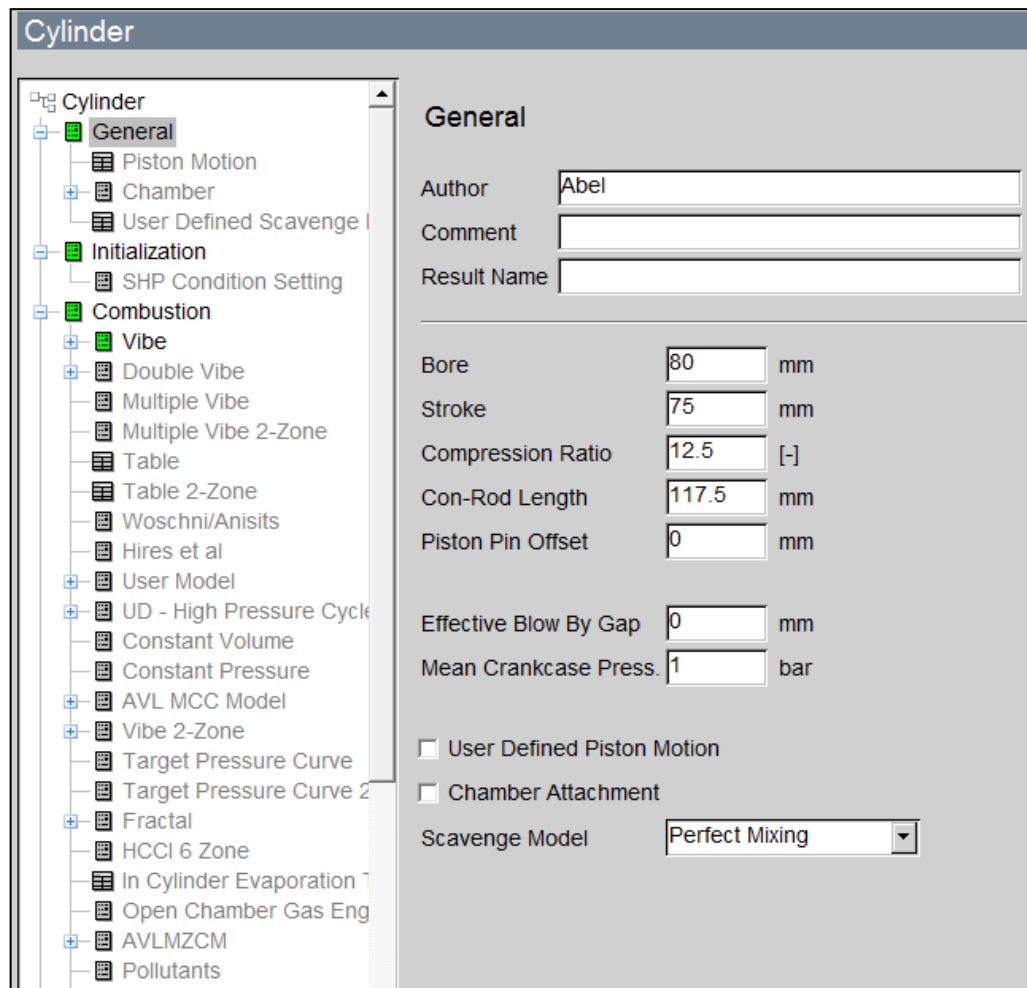


Figura 53. Parámetros característicos del cilindro

Existe la posibilidad de considerar blow-by que es un fenómeno de transferencia de gases durante la combustión a través de los segmentos de los pistones. Debido a que es difícil de cuantificar de forma real, en nuestro modelo idealizado no se ha considerado para evitar posibles errores. Aunque se conoce que es un fenómeno que afecta negativamente al lubricante por lo tanto una disminución de las prestaciones de nuestro motor.

Para finalizar este apartado hemos seleccionado el modelo de barrido de mezcla perfecta (Perfect Mixing), la cual considera que los gases permanecen de forma homogénea en el interior del cilindro.

Condiciones iniciales

Se establecen como condiciones iniciales las mostradas en la figura52. Dichos valores son los obtenidos en el cilindro al finalizar la combustión, antes de comenzar la apertura de la válvula de escape del cilindro.

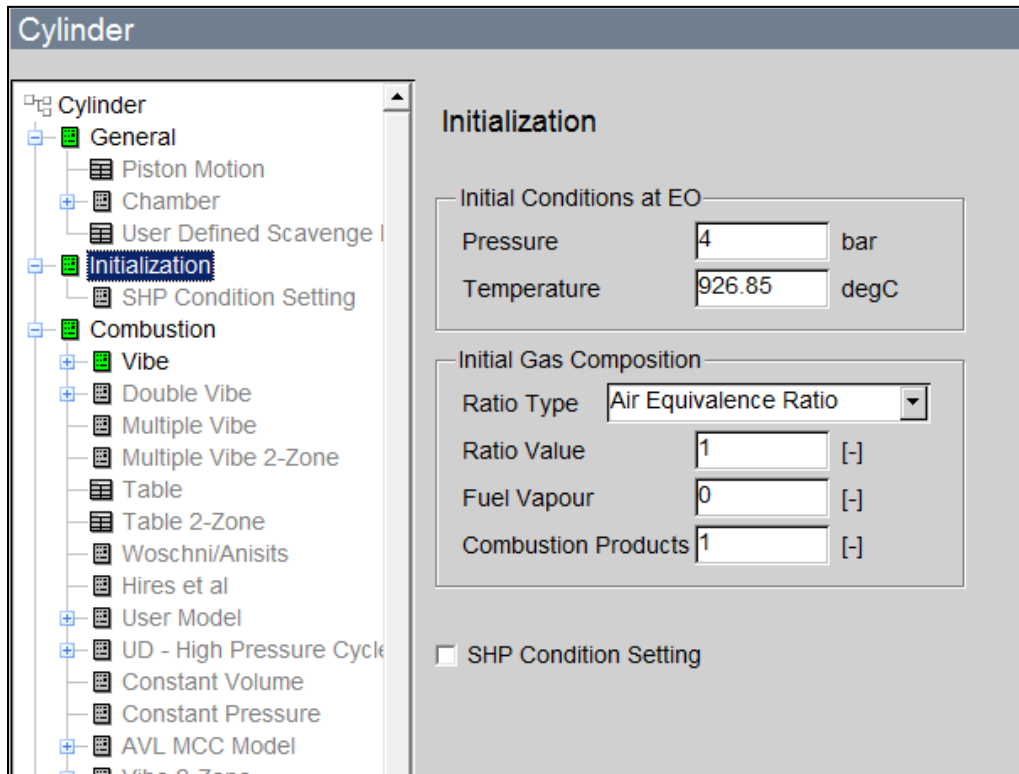


Figura 54. Condiciones inicialización del cilindro

3.3.4.2 Definición de la combustión

En el proceso de combustión se produce la liberación del calor, dependiendo de las condiciones del proceso. El calor liberado varía de forma y magnitud en función del momento en el que se produzca la combustión y del grado o forma de dicho proceso.

Se define la función de Vibe como la ley de variación de calor (heat release) como se muestra en la figura53. Esta función reproduce la liberación de calor real en nuestro modelo.

Para completar la definición del proceso. Se debe especificar cómo se realiza la mezcla, permitiendo elegir entre una preparación interna de la mezcla (internal mixture preparation) o externa de la mezcla (external mixture preparation). En nuestro modelo el combustible se inyecta en el conducto de admisión por lo que la opción elegida es external mixture.

Para finalizar se ha completado este cuadro de configuración del modelo con la temperatura a la que se encuentra el combustible (temperature fuel), que en nuestro caso es de 25°C, temperatura ambiente del ensayo real.

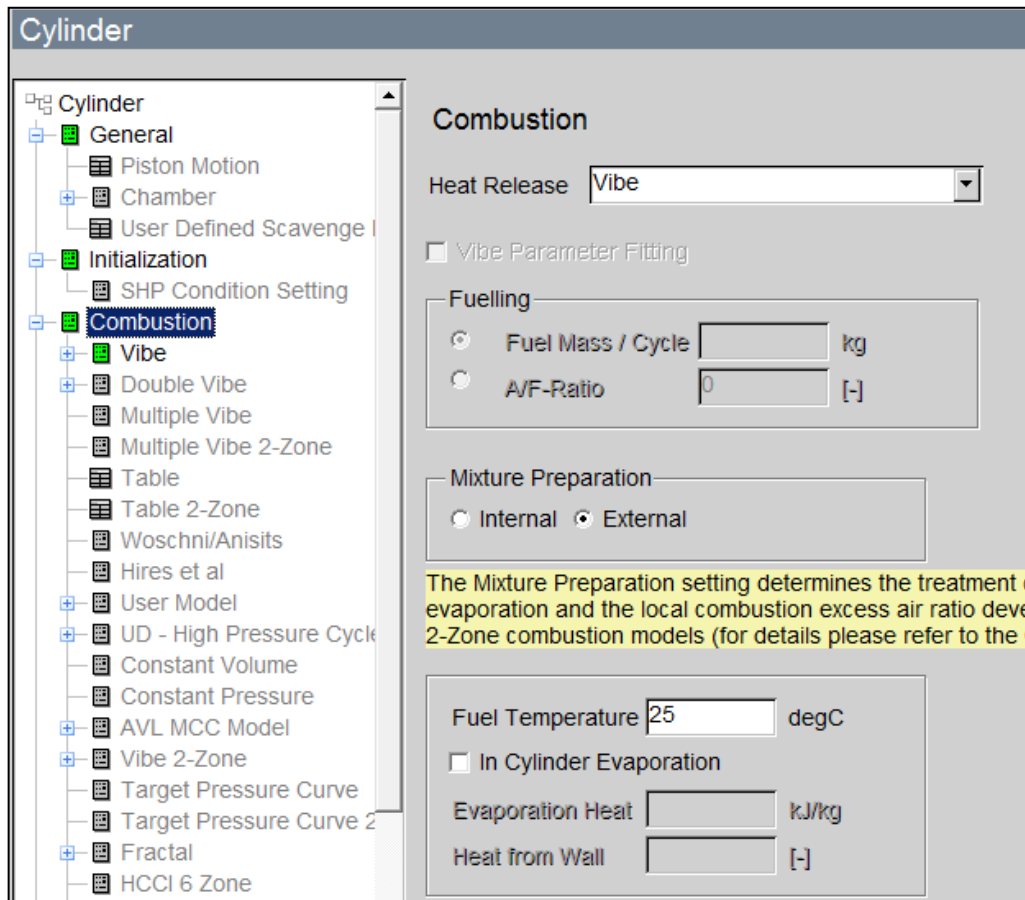


Figura 55. Definición de la combustión

3.3.4.3 Definición liberación de calor. Vibe.

Hemos definido anteriormente lo que va a ser nuestra función de liberación de calor, eligiendo la función vibe que se va a configurar seguidamente a través de cuatro parámetros:

- Angulo de inicio de la combustión (start of combustión)
- Duración de la combustión (combustión duration)
- Parámetro de forma m (shape parameter m)
- Parámetro de forma a (shape parameter a)

Un valor común del parámetro “a” es 6.9 que produce una combustión completa, maximizando la fracción de masa quemada. En nuestro modelo este ha sido el valor considerado para intentar reducir al máximo los inquemados. El parámetro “a” configura donde se localiza la liberación del calor siendo más tardía, según aumente dicho parámetro.

Los gráficos de tasa de liberación de calor (ROHR) y la fracción de masa quemada (Mass Fraction Burned) enfrentadas al ángulo del cigüeñal quedan definidos (Figura 54) al configurar los parámetros mencionados anteriormente.

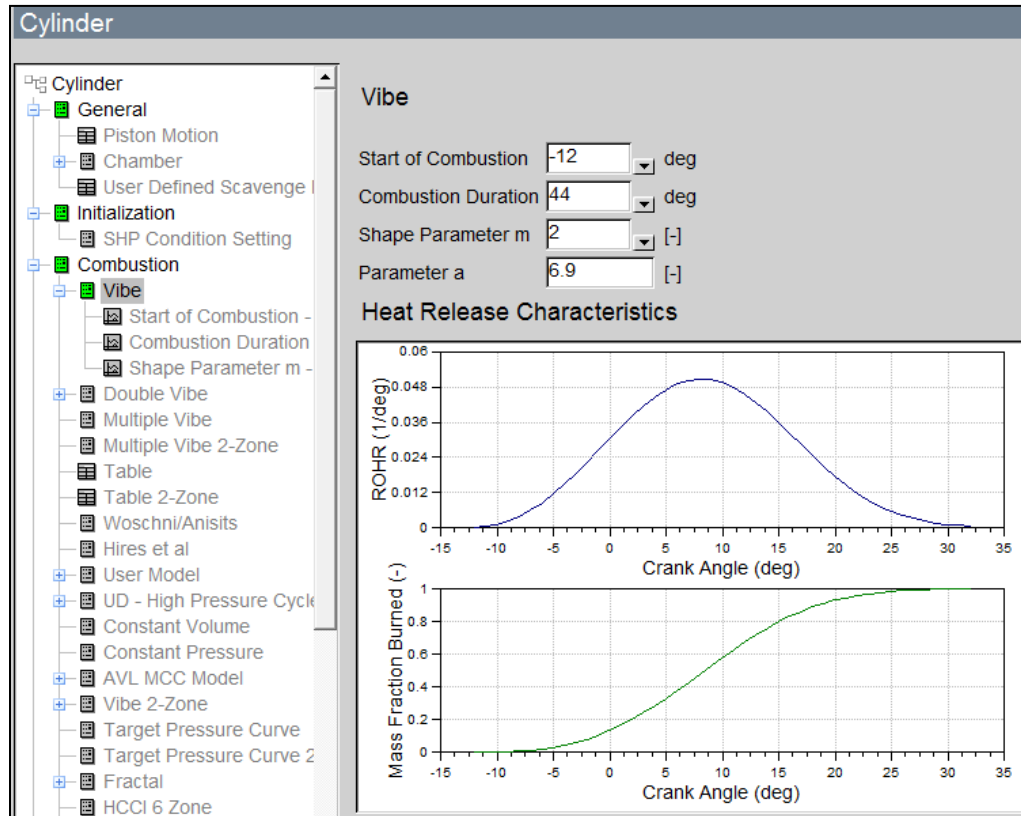


Figura 56. Definición ley Vibe

3.3.4.4 Método de transferencia de calor

La transferencia de calor se ha definido con el apoyo del modelo Woschni 1978 que posee en software Avl BOOST. Los parámetros necesarios para completar el método son la superficie exterior en el pistón (5800 mm²), la temperatura en la pared del mismo (341,85°C) y especificación del tipo de inyección del motor en nuestro caso inyección directa (DI).

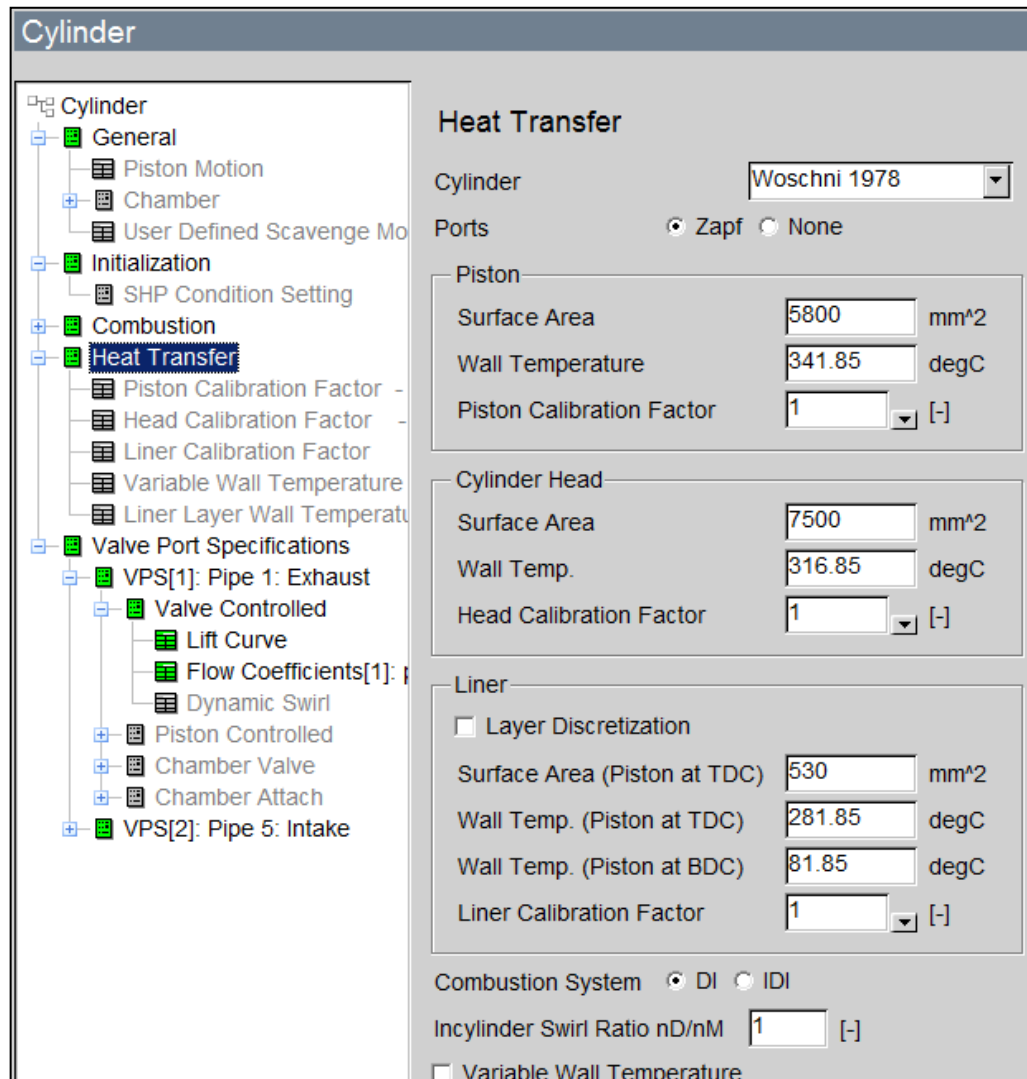


Figura 57. Definición transferencia calor en el cilindro

3.3.4.5 Especificación de los puertos de válvulas (Valve Port Specifications)

- Válvula de escape (Exhaust Valve)

Se comienza definiendo las propiedades configurables (figura 56) de la válvula de escape. Se han introducido el diámetro interior de su asiento (Inner Valve Seat Diameter), la holgura de la válvula (Valve Clearance) y el factor de escala para el área de flujo efectiva (Scaling Factor for Effective Flow Area)

El factor de escala se define según la siguiente expresión:

$$f_{sc} = n_v \cdot \frac{d_{vi}^2}{d_{pi}^2} \quad \text{Ecuación [9]}$$

Donde:

- n_v = número de válvulas (de admisión o de escape) en el cilindro

- dvi = diámetro interior de la válvula
- dpi = diámetro de la tubería conectada a la válvula

Los valores introducidos en la ecuación para calcular el factor de escala han sido $nv=1$; $dvi=32$; $dpi=26$.

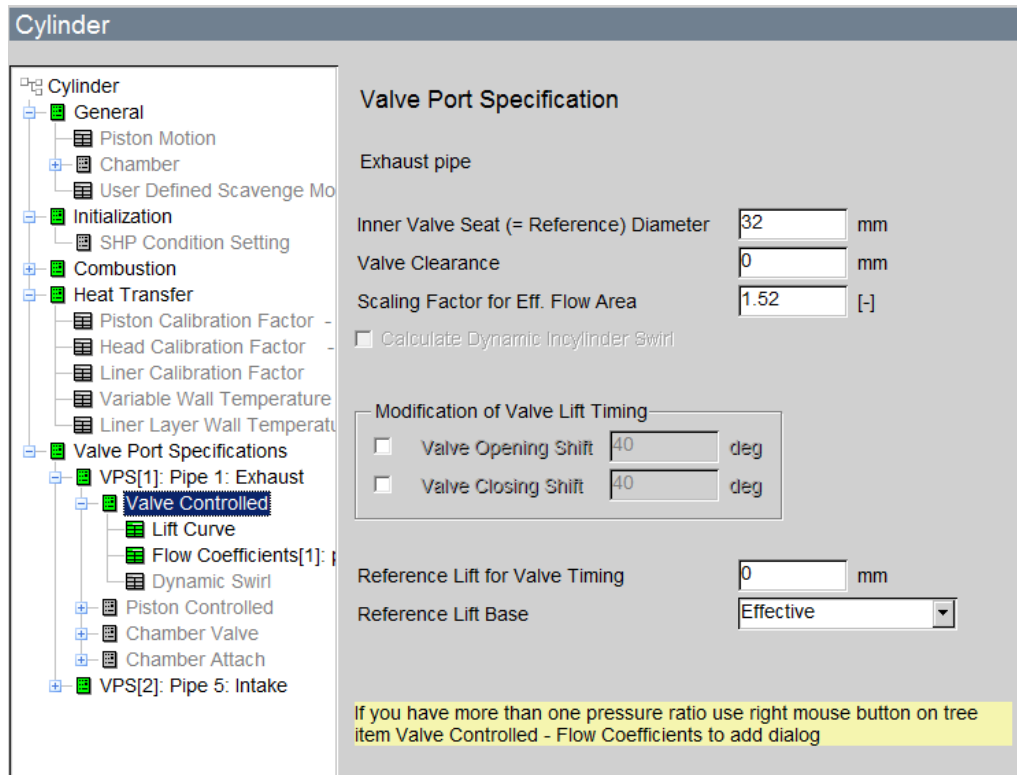


Figura 58. Definición válvula de escape

En la figura 61 se ha definido la curva de levantamiento de la válvula de escape, la cual se ha obtenido de forma experimental en el banco de ensayos. Posteriormente se ha creado un archivo.dat para facilitar la lectura de dichos valores a través del software mediante la opción load. El archivo auxiliar utilizado debe poseer dos columnas al igual que nuestra ley original, para ser admitido por el software Avl BOOST. Con la carga de los archivos obtenidos de forma experimental se ha buscado reproducir las condiciones reales de la instalación para ajustar el modelo lo máximo posible.

Durante la definición de la curva se ha considerado donde establece el software el cero absoluto, para no desfazar la apertura de válvulas un ciclo y provocar un error en el proceso de combustión.

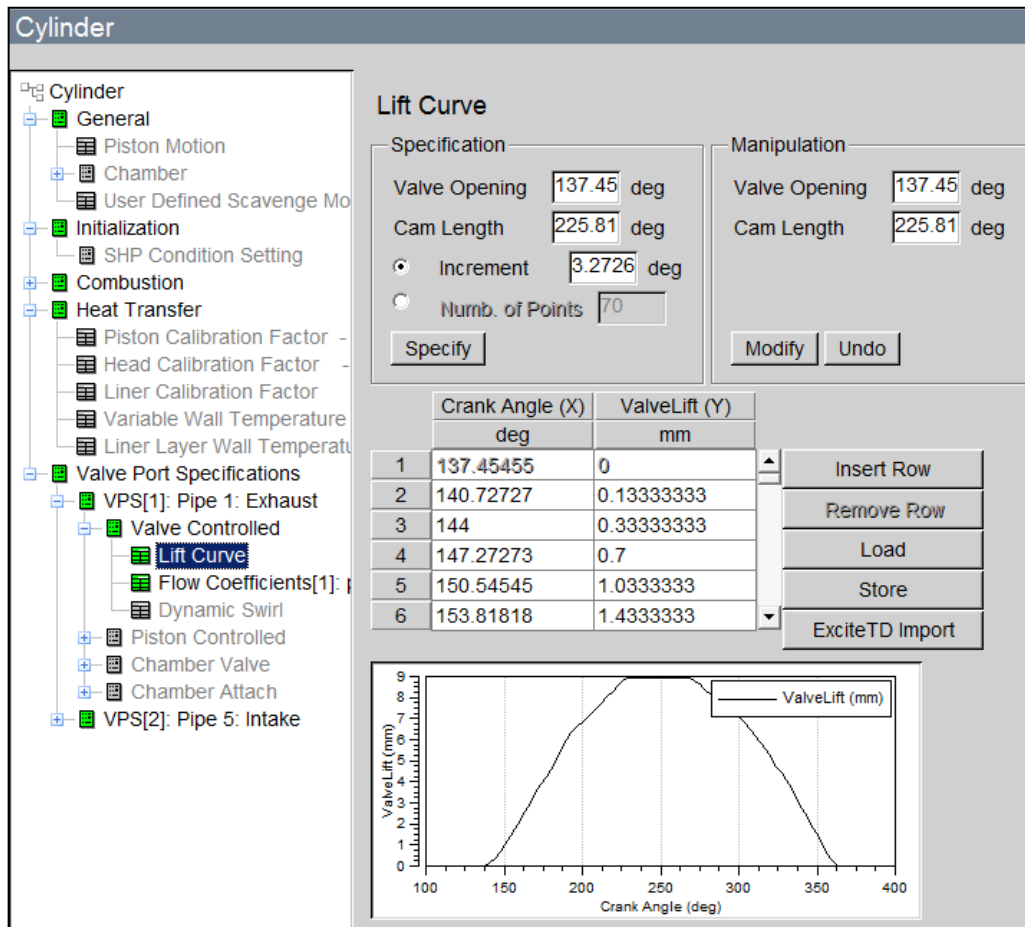


Figura 59. Curva de levantamiento de válvula de escape

En la figura 57 se establece la apertura de la válvula de escape en el ángulo 137.45° de cigüeñal. Esta válvula permanece abierta durante un periodo angular igual a 225.81° y con un levantamiento máximo aproximadamente en 250° . El valor incremental se ha definido de forma automática por el propio software al introducir la tabla de datos de la instalación experimental.

Para finalizar la configuración de la válvula de escape se especifican los valores de los coeficientes de flujo, eligiendo la opción de levantamiento de válvula efectivo (Effective Valve Lift).

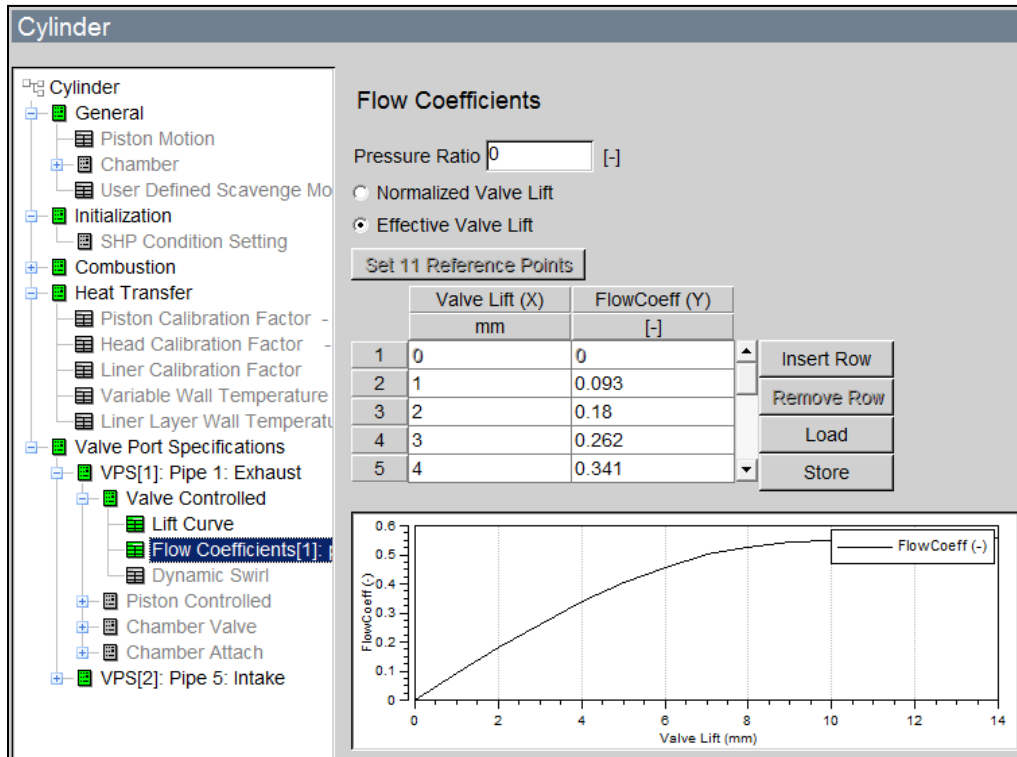


Figura 60. Coeficiente de válvula de escape

- Válvula de admisión (Intake Valve)

En la figura 63 se especifican las propiedades de la válvula de admisión en las cuales el factor de escala se modifica respecto a la válvula de escape.

Para calcular dicho valor se han sustituido los siguientes datos en la Ec.5:

$n_v=1$; $d_{vi}=34$ mm; $d_{pi}=20$ mm;

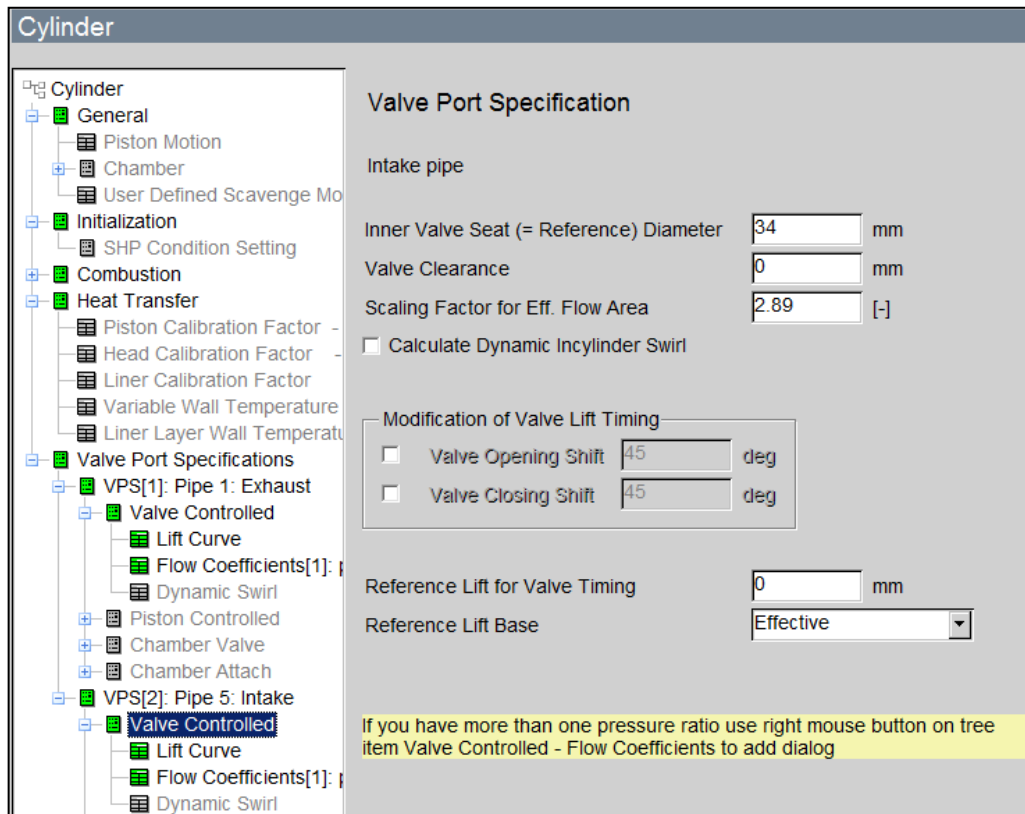


Figura 61. Definición válvula admisión

En la figura 60 se ha definido el levantamiento de válvulas de admisión de forma similar a la de admisión. Se han introducido los parámetros mediante la carga de los valores obtenidos de forma experimental mediante la utilización de un archivo auxiliar.

En dicha configuración observamos que la apertura de la válvula de admisión corresponde con un ángulo de cigüeñal de 356.72° . El tiempo que permanece abierta es igual a un ángulo de 219.27° y el levantamiento máximo se produce aproximadamente en 467° . Al igual que en la válvula de escape el valor incremental se ha definido de forma automática por el propio software al introducir la tabla de datos de la instalación experimental.

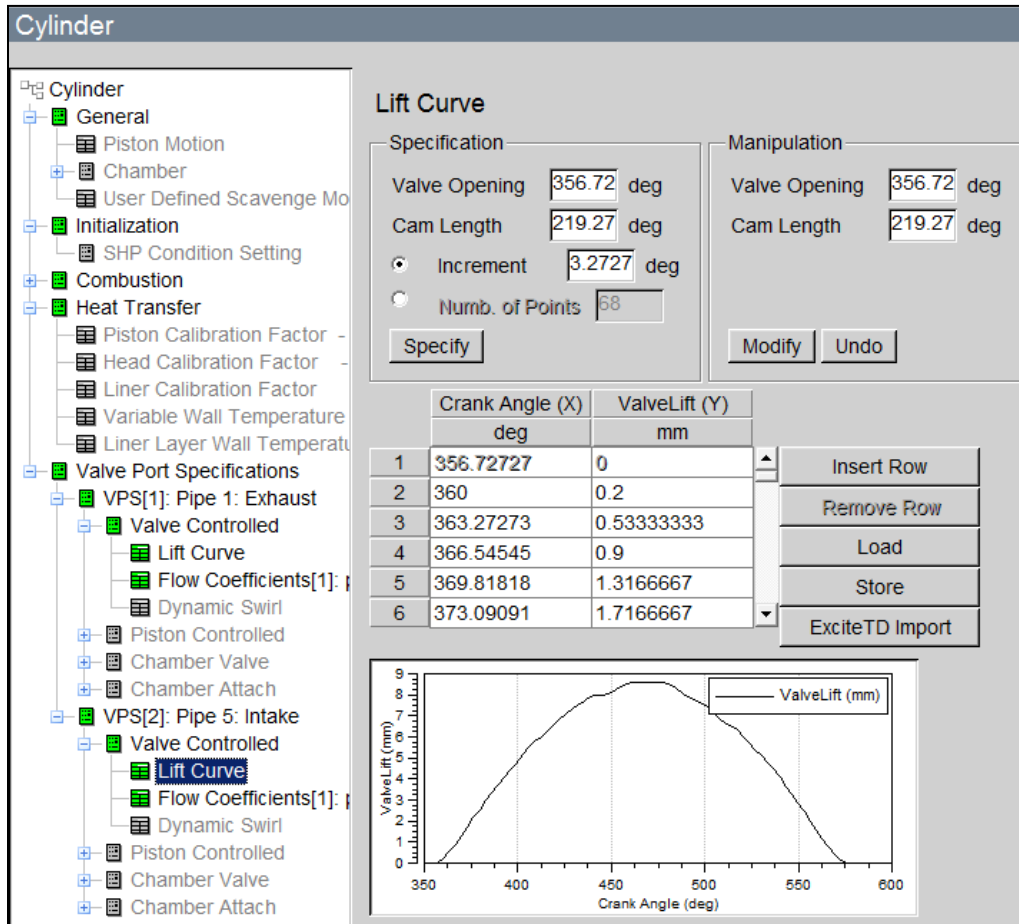


Figura 62. Curva de levantamiento de válvula de admisión

Para finalizar la configuración de la válvula de admisión se especifican los valores de los coeficientes de flujo en la figura 61. Eligiendo la opción de levantamiento de válvula efectiva (Effective Valve Lift), que no son iguales a los de escape aunque sus gráficas puedan llevar a parecerse.

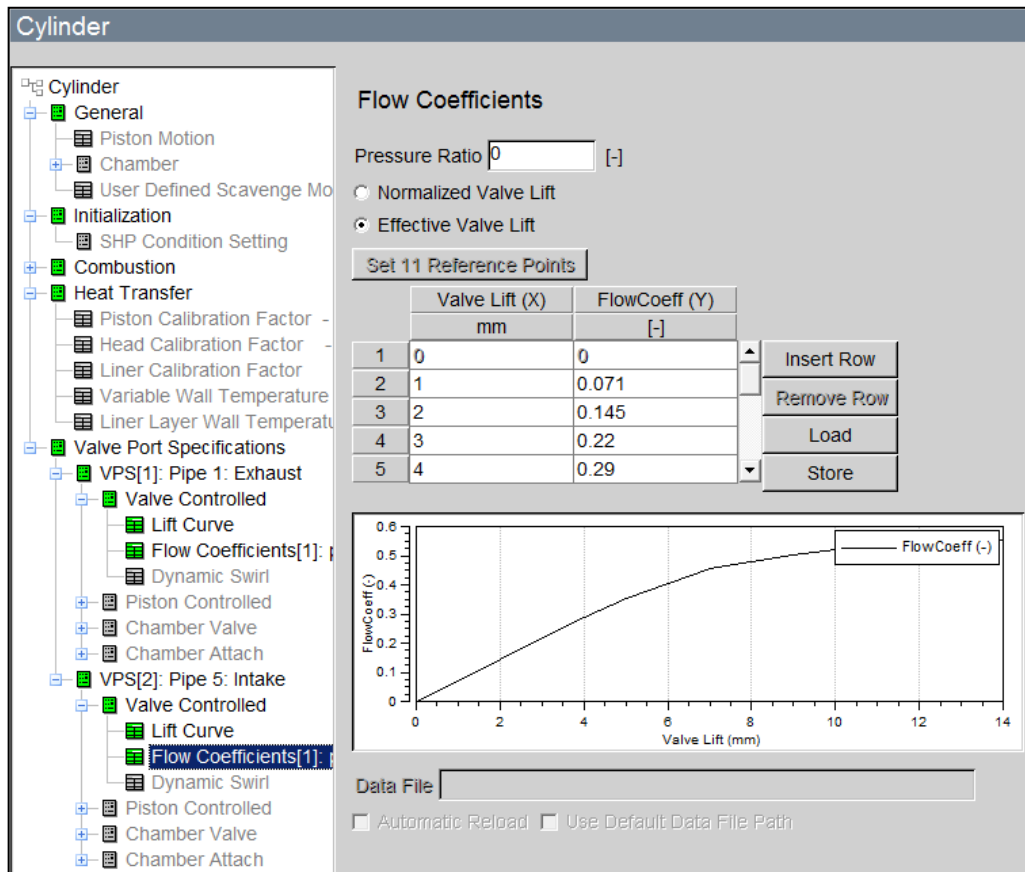


Figura 63. Coeficientes flujo válvula admisión

3.3.5 Sistema Escape

El subgrupo considerado como sistema de admisión escape se componen por todos los elementos presentados en la figura 62. Vamos a realizar una descripción más fina de cada uno de los principales conductos.

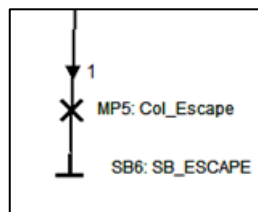
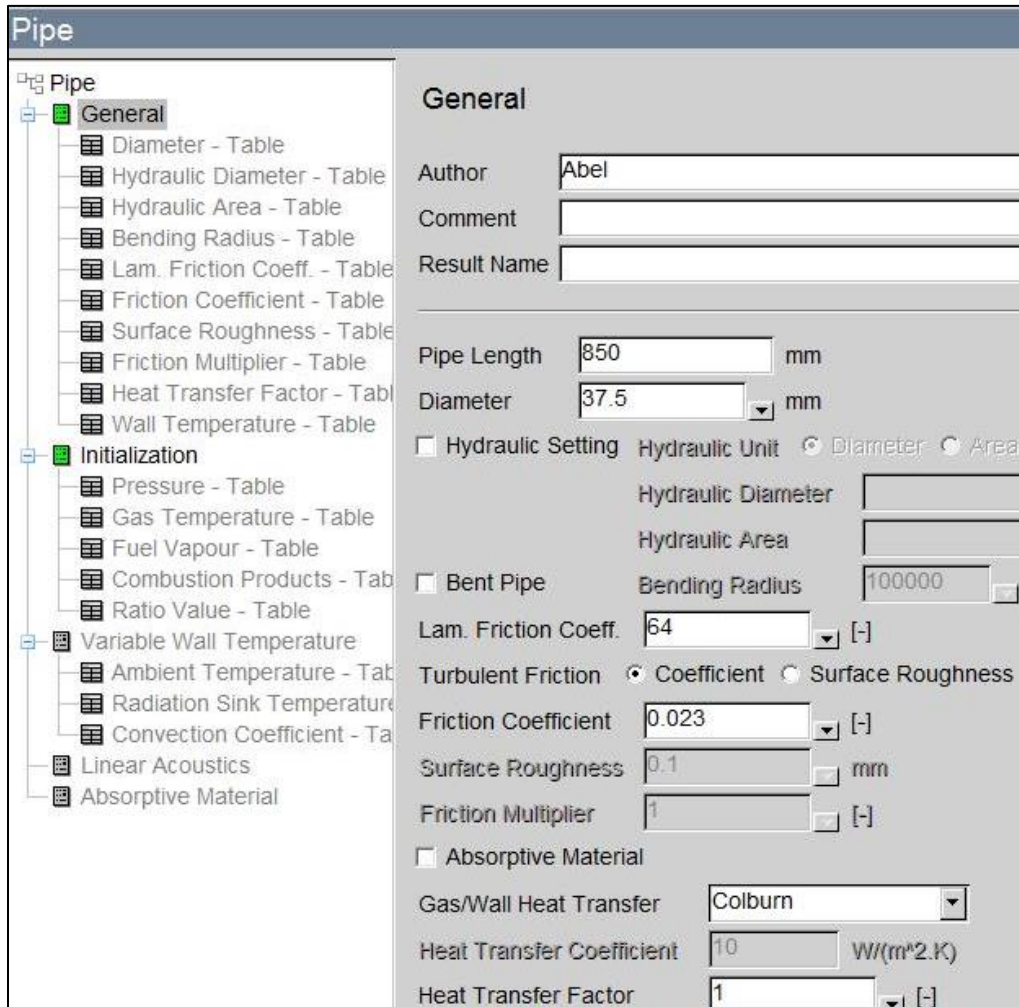


Figura 64. Colector de escape

3.3.5.1 Conducto conducto escape "1"

La longitud del conducto es igual a 850mm y fijo en función de la longitud del conducto, figura63.



Pipe

General

Author: Abel

Comment:

Result Name:

Pipe Length: 850 mm

Diameter: 37.5 mm

Hydraulic Setting Hydraulic Unit: Diameter Area

Hydraulic Diameter:

Hydraulic Area:

Bent Pipe Bending Radius: 100000

Lam. Friction Coeff.: 64 [-]

Turbulent Friction: Coefficient Surface Roughness

Friction Coefficient: 0.023 [-]

Surface Roughness: 0.1 mm

Friction Multiplier: 1 [-]

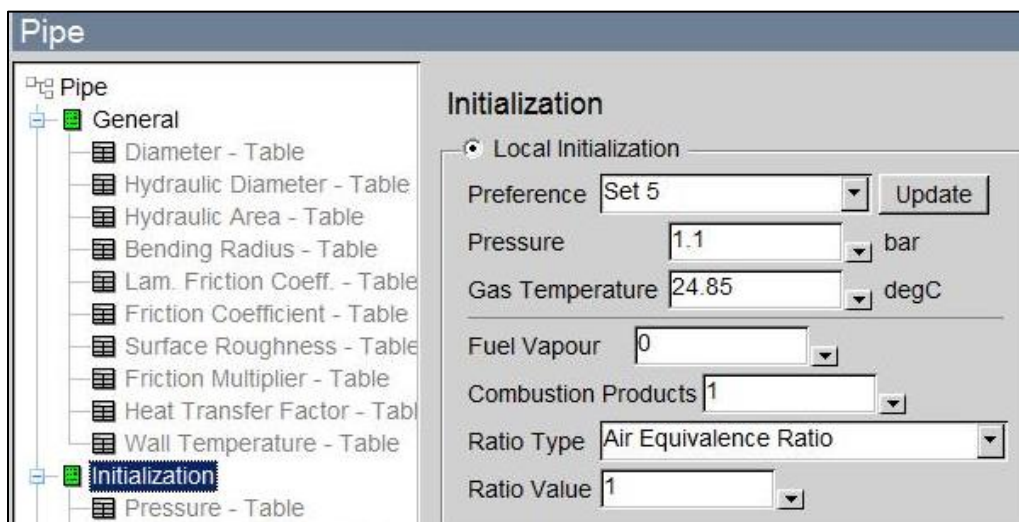
Absorptive Material

Gas/Wall Heat Transfer: Colburn

Heat Transfer Coefficient: 10 W/(m².K)

Heat Transfer Factor: 1 [-]

Figura 65. Características conducto "1"



Pipe

Initialization

Local Initialization

Preference: Set 5 Update

Pressure: 1.1 bar

Gas Temperature: 24.85 degC

Fuel Vapour: 0

Combustion Products: 1

Ratio Type: Air Equivalence Ratio

Ratio Value: 1

Figura 66. Inicialización conducto "1"

Se han impuesto las condiciones iniciales propias de la salida de gases de escape quedando definidas con el Set5 como se muestra en la figura 64.

3.3.5.2 Frontera de Entrada “SB6”

Este elemento representa las condiciones iniciales en las que se expulsan los gases de escape del cilindro correspondientes al Set2. Cabe destacar que como el gas natural es un combustible la concentración de fuel vapour se caracteriza como como se muestra en la figura65.

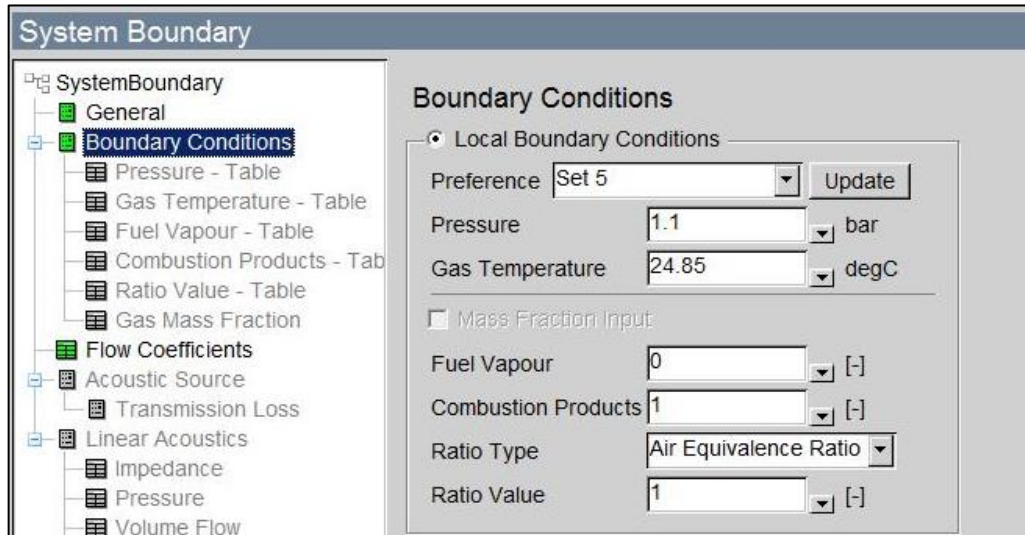


Figura 67. Condiciones iniciales colector escape

Los coeficientes de flujo en el conducto de entrada de dicho gas natural son los representados en la figura66.

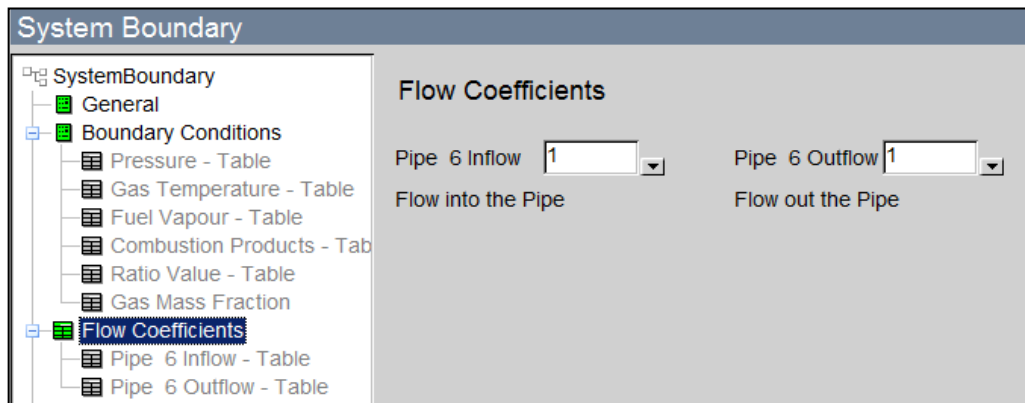


Figura 68. Coeficientes de flujo colector escape

4. VALIDACIÓN MODELO Y RESULTADOS OBTENIDOS SIMULACION

4.1 INTRODUCCION

En este capítulo se describe la metodología seguida para realizar la validación del modelo a partir de una serie de gráficos de la instalación real. La falta de determinados datos dificulta la creación del modelo, por lo que se han tomado valores lo más realistas posibles de dichos parámetros modificándolos a lo largo de las diferentes simulaciones realizadas para ajustar los resultados lo máximo posible.

Finalmente se muestra la gran cantidad de información que se puede extraer del modelo, donde se muestran resultados obtenidos con el software.

4.2 PROCESO SEGUIDO PARA LA VALIDACIÓN DEL MODELO

La principal dificultad que se ha encontrado en el ajuste del modelo ha sido que al modificar un único parámetros esto puedo variar múltiples resultados, desajustando valores bien ajustados previamente.

Para realizar el ajuste de este modelo se han realizado varias simulaciones con distintos órdenes de modificación de los parámetros. El método simulado con una respuesta más rápida y efectiva se describe a continuación:

- Primero; se establecen unas condiciones iniciales lógicas, explicadas en capítulos anteriores.
- Segundo; se ajusta la variación de admisión mediante la definición de las curvas de levantamiento de válvulas (admisión y escape) , para ello se ha implementado las curvas de la instalación real
- A continuación se ajusta la ley de liberación de calor mediante el ajuste tanto de la forma como de la duración de la combustión.
- Finalmente se ajustan los mass-flow mediante los valores de los los PID (se explica de forma más detallada en el análisis del sistema de control), para alcanzar los valores deseados en la presión de admisión y el cilindro.

Las modificaciones a realizar nos deben ser bruscas debido a que los valores deben encontrarse en un rango lógico. Con los pasos establecidos se alcanza la solución final cuando los valores que se buscan como solución adecuada se han estabilizado. Esta solución final no se alcanza en una sola iteración, en este modelo han sido necesarias 60 iteraciones para llegar la solución buscada.

4.3 SISTEMA DE CONTROL

En esta apartado se presentan los resultados en forma de gráficos de datos obtenidos del ajuste necesario para la validación de los mass-flow y par motor del modelo, como la evolución de los controladores PID a lo largo de la simulación.

4.3.1 Angulo apertura mariposa Aire

El PID que se ha definido en el apartado 3.3.2, actúa sobre el ángulo de apertura de la mariposa permitiendo así la regulación del caudal de aire inyectado en nuestro cilindro. Para alcanzar el valor consigna del gasto másico de aire ha sido necesario ir ajustando los valores del PID hasta reducir el error al mínimo posible a $2,29E-03$ prácticamente nulo, gráfico 1.

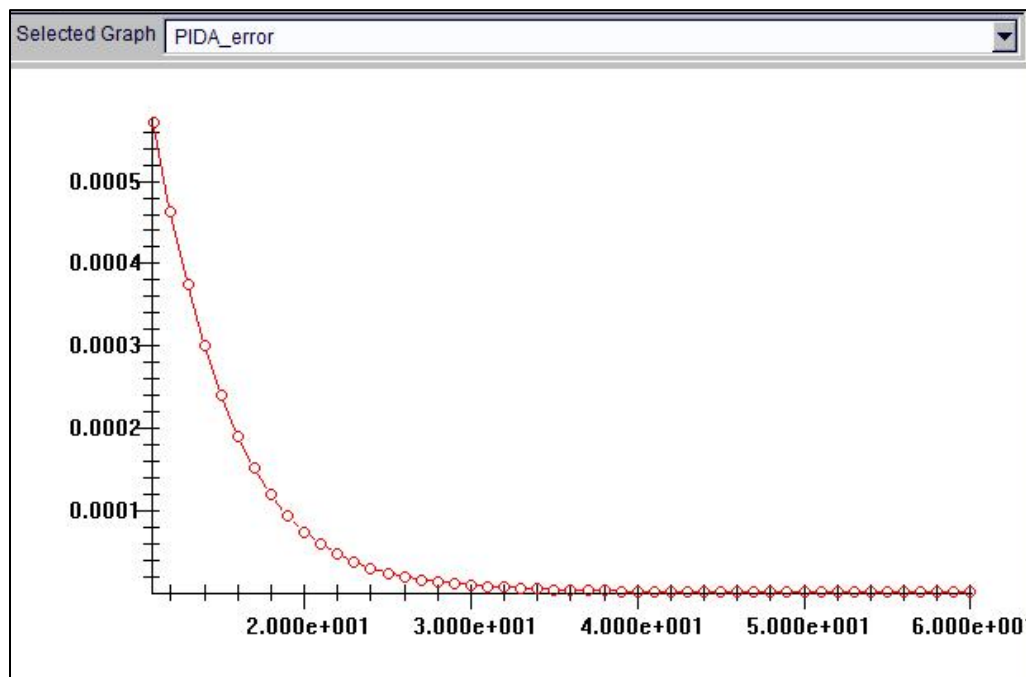


Gráfico 1. Error PID admisión aire

En el gráfico 2 se muestran los valores de la mariposa durante la evolución de los ciclos, inicialmente en régimen transitorio (20 ciclos) hasta alcanzar el valor final en régimen estacionario. El valor obtenido al final de la simulación es $2,96^\circ$.

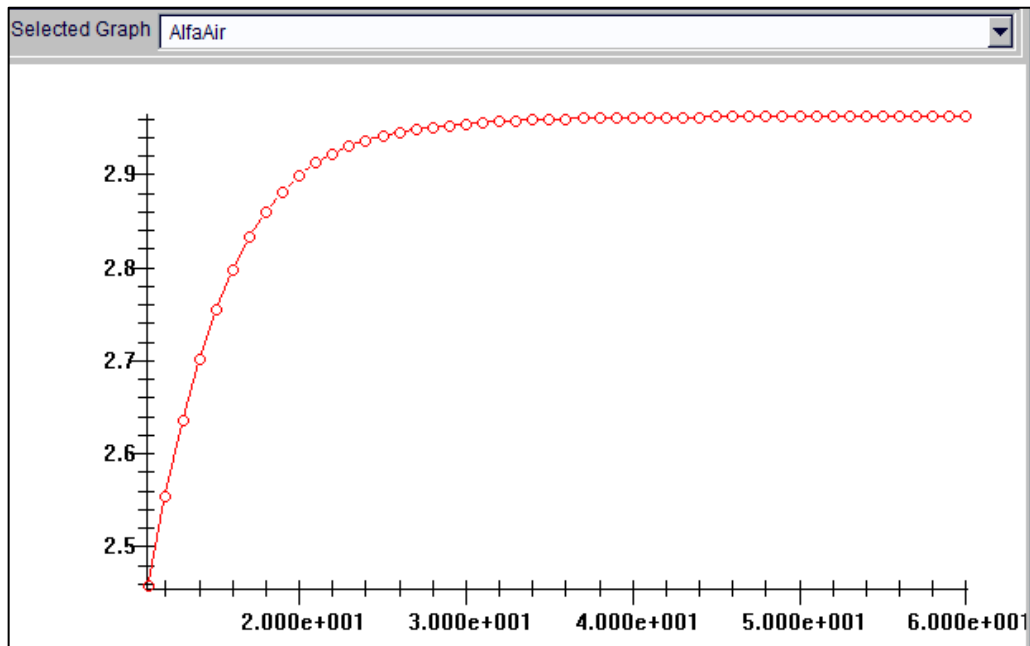


Gráfico 2. Valor ángulo apertura mariposa aire generado por PID

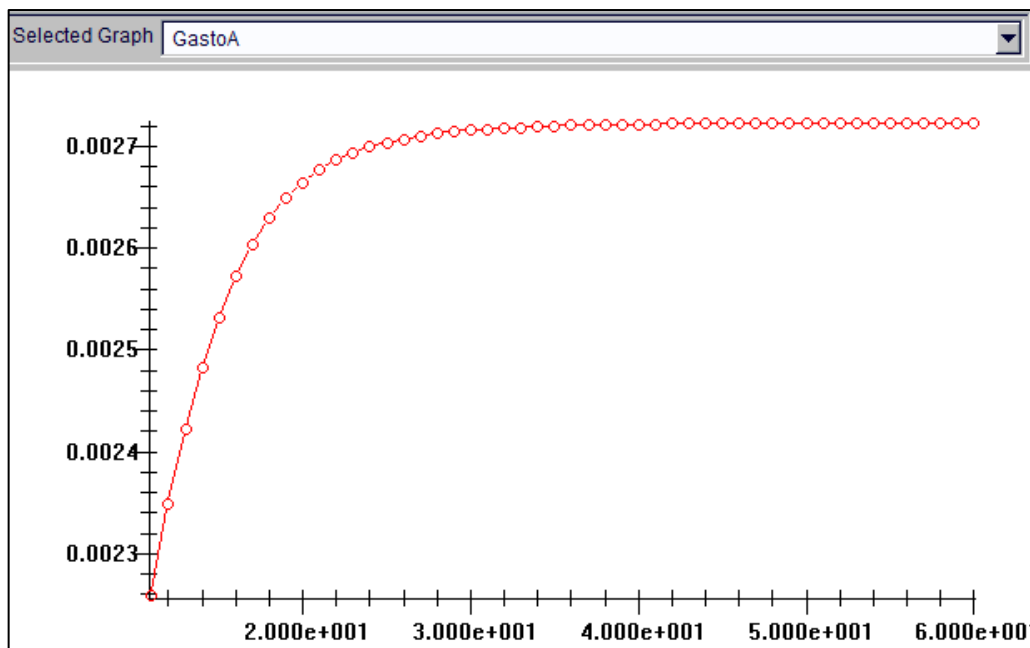


Gráfico 3. Valor gasto aire generado por PID

Como se observa en el gráfico 3 la evolución del gasto másico de aire es capaz de alcanzar y mantener el valor de consigna establecido, para ello ha sido necesario ajustar los valores del PID (integral, proporcional y derivativo) de forma correcta mediante el estudio de diversas simulaciones hasta alcanzar la rapidez y valores requeridos, Para ello ha sido muy práctica la herramienta monitor que dispone el software.

4.3.2 Angulo apertura mariposa Gas Natural

Siguiendo los mismos pasos para la regulación del caudal de aire se consigue alcanzar la solución deseada en la regulación de gas natural. El ajuste de este mass-flow ha sido más difícil debido a que pequeñas modificaciones en los valores característicos del PID, generan grandes fluctuaciones tanto en la presión de admisión como en la presión del cilindro. El error de la solución final del PID es 0,0310881 prácticamente nulo, gráfico 4.

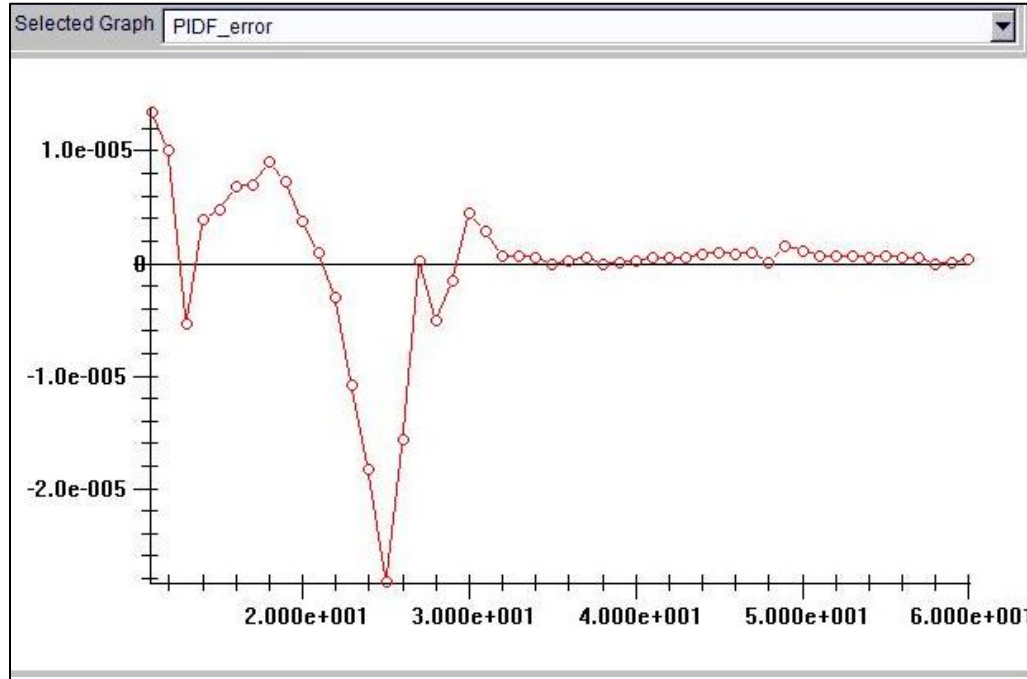


Gráfico 4. Error PID admisión gas natural

En el gráfico 5 se muestran los valores de la mariposa del gas natural durante la evolución de los ciclos, inicialmente en régimen transitorio (20 ciclos) hasta alcanzar el valor final en régimen estacionario. El valor obtenido al final de la simulación es 3,86696°.

Selected Graph AlfaGas

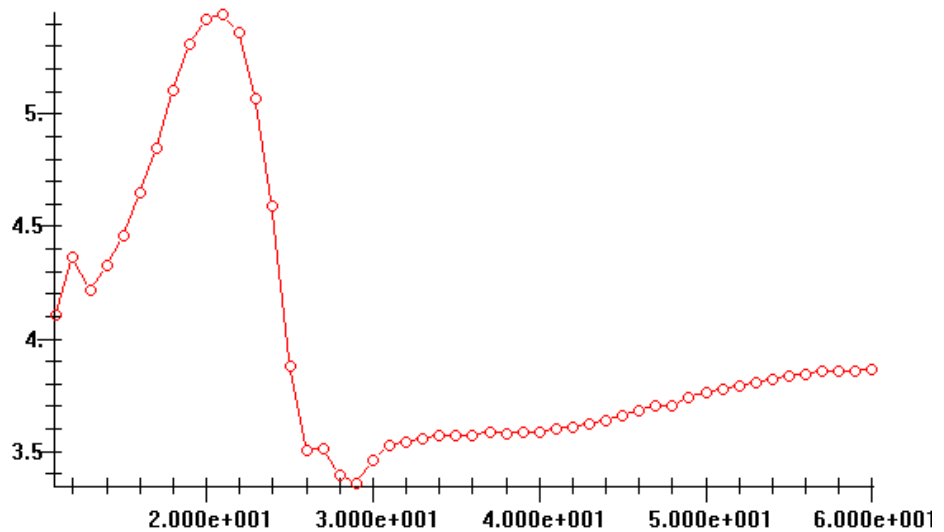


Gráfico 5. Valor ángulo apertura mariposa gas generado por PID

Selected Graph GastoF

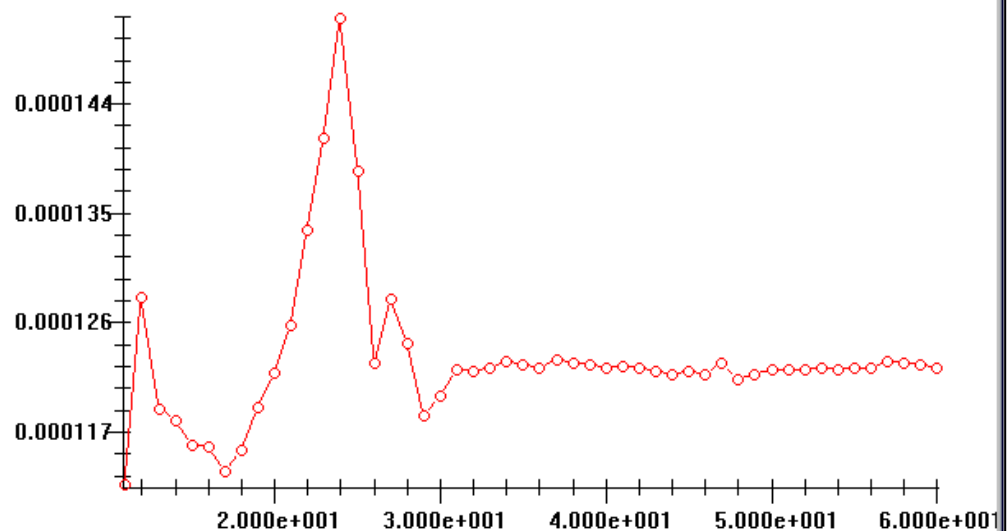


Gráfico 6. Valor gasto gas generado por PID

Como se observa en el gráfico 6, la evolución del gasto másico de gas natural alcanza y mantiene el valor de consigna establecido, para ello ha sido necesario ajustar los valores del PID (integral, proporcional y derivativo) de forma correcta mediante el estudio de diversas simulaciones hasta alcanzar la rapidez y valores requeridos, Para ello ha sido muy práctica la herramienta monitor que dispone el software visualizando varios gráficos simultáneamente.

4.3.3 PID par motor

El Pid que controla el par motor se ha regulado analizando los valores de la herramienta monitor en tiempo real, tanto del error cometido como de la evolución del par motor y régimen de giro del motor. El ajuste de este controlador ha sido excepcionalmente difícil debido a que pequeñas modificaciones en los valores del PID producen grandes fluctuaciones tanto en el par motor como en el régimen de giro, obteniendo un error igual 10,86 lejos del valor nulo 10,86, gráfico 7.

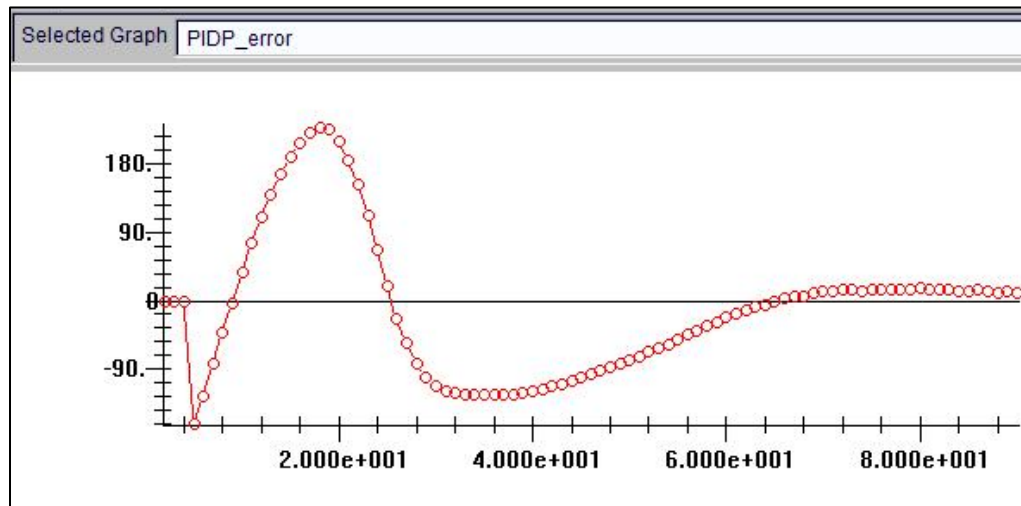


Gráfico 7. Error PID par motor

En el gráfico 8 se muestran los valores del par motor durante la evolución de los ciclos, inicialmente en régimen transitorio (60 ciclos) hasta alcanzar el valor final en régimen estacionario. El valor obtenido ha sido al final de la simulación es 14,42 Kw.

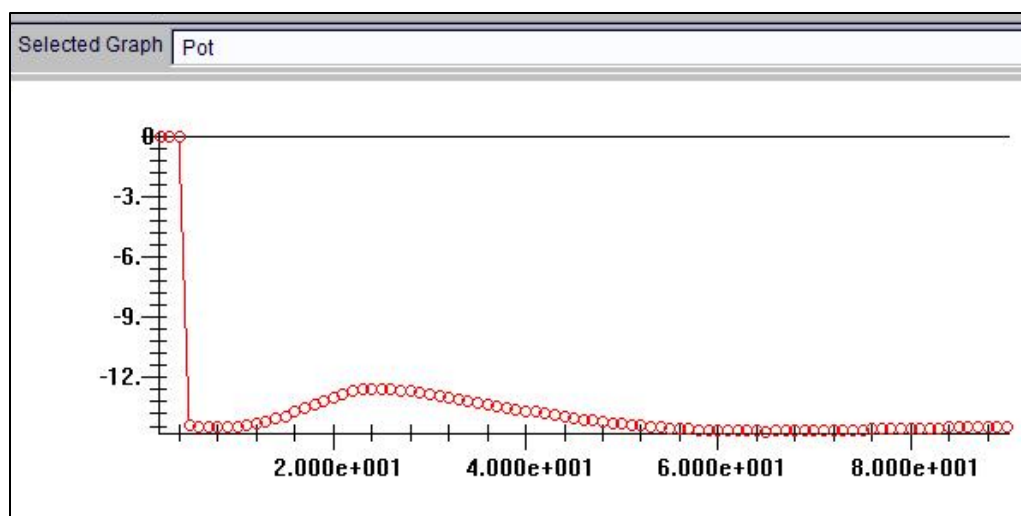


Gráfico 8. Valor par motor generado por el PID

Como se observa en el gráfico 9 los valores del régimen de giro de motor durante la evolución de los ciclos han fluctuado en valor considerablemente, inicialmente en régimen transitorio (60 ciclos) hasta alcanzar el valor final en régimen estacionario. Este controlador ha sido específicamente difícil de estabilizar por lo que ha sido necesario simular 90 ciclos para obtener un régimen estacionario, cuyo valor es 1490,2 rpm, muy cercano al de consigna definido como 1492 rpm.

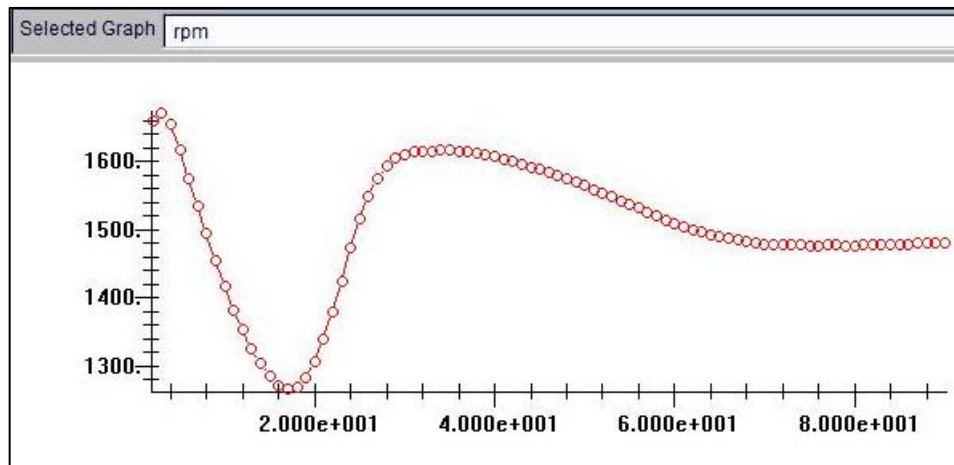
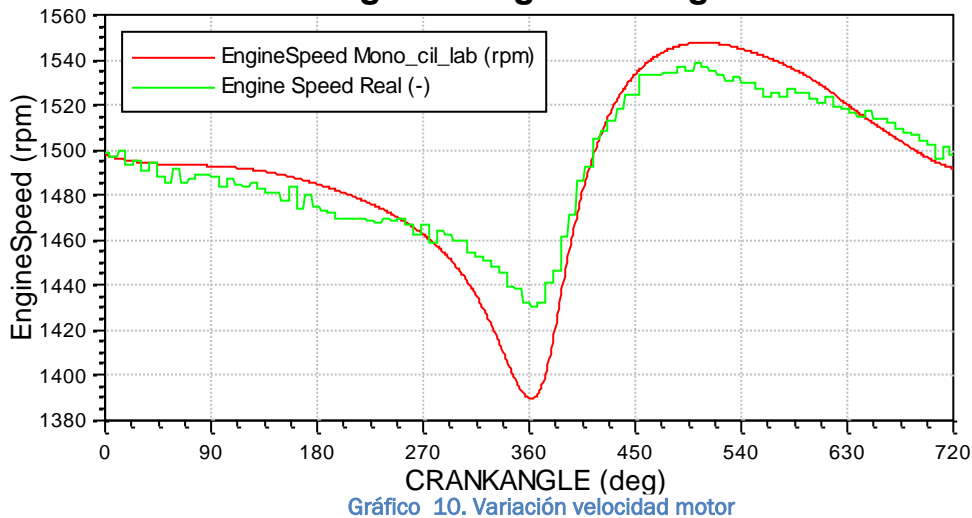


Gráfico 9. Régimen de giro controlado por PID par motor

4.4 REGIMEN DE GIRO MOTOR

Para ajustar el modelo creado a la situación real analizamos la variación de El velocidad del motor durante un ciclo. En el gráfico 10, muestra el resultado de dicha velocidad, donde está superpuesta el resultado obtenido en la instalación real. No es la solución óptima debido a que existen diferencias en la fluctuación de los valores, aunque la forma y pendiente del gráfico del resultado simulado son muy similares a la solución real.

Diagrama régimen de giro



Como se aprecia en el gráfico la los variación de régimen de giro es menor durante el proceso, en el modelo no se ha considera el momento de inercia del cigüeñal variable lo cual afecta a las aceleraciones que sufre el pistón durante el ciclo. Otra posible causa es que durante la creación del modelo no se haya considerado alguna longitud característica.

En la siguiente tabla 2 se presentan los valores más representativos de la velocidad el motor, donde se presenta que la fluctuación de nuestra simulación es menor que la solución experimental:

	Velocidad máx(rpm)	Velocidad min(rpm)	Fluctuación máx (rpm)
Simulación	1544	1492	54
Solución real	1538,4	1430,3	108,1

Tabla 2. Variación velocidad motor en un ciclo.

4.5 ANALISIS DIAGRAMA PRESION ADMISION

Como se puede observar en el gráfico 11, el resultado obtenido de la presión de admisión controlada por el sensor es una solución válida desde el punto de vista conceptual. Aunque apreciamos que el gráfico resultado obtenido marcado en rojo, tiene la forma y las pendientes similares a las de la solución real, el valor máximo obtenido es más elevado que el real.

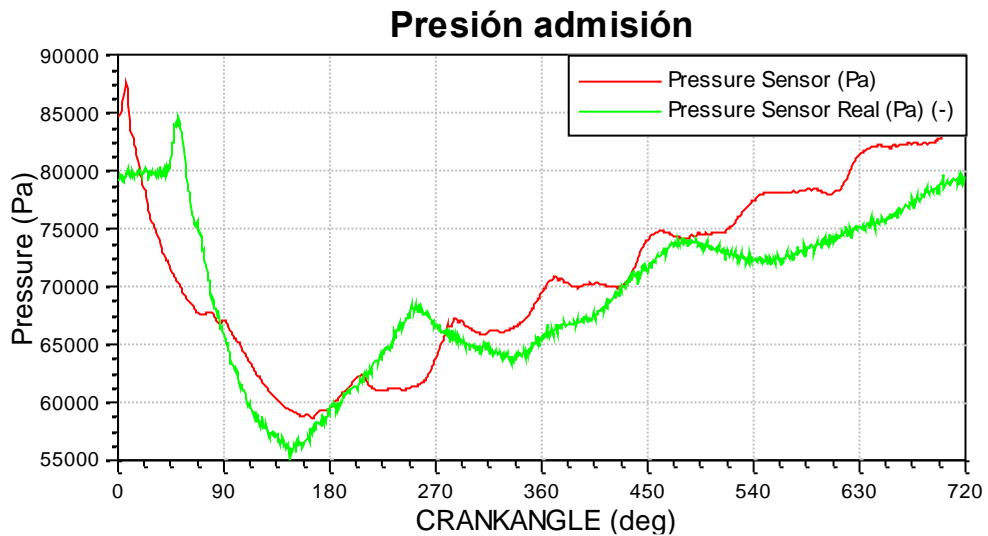


Gráfico 11. Diagrama presión admisión

Se aprecia que el pico existente en la presión de admisión se encuentra reflejado en forma pero no en lugar, estando desplazado aproximadamente 50° . Este resultado se podría conseguir optimizar mediante un análisis del modelo asegurando que no existe ninguna diferencia respecto a longitudes características e implementado que el momento de inercia en el cigüeñal varíe en función del ángulo recorrido. Otra posible causa de la diferencia entre gráficos es que el sensor no sea capaz de captar todas las respuestas en frecuencia que se están estudiando por lo que habría que implementar otro tipo de sensor y estudiar el caso de nuevo.

4.6 ANALIS DIAGRAMA DE PRESSION CILINDRO

El análisis del diagrama de presión nos permite caracterizar la combustión que tiene lugar en el cilindro. La presión máxima alcanzada en dicho proceso es un parámetro característico de un motor de encendido provocado (MEP), que denotamos como P_{max} .

La presión máxima no se alcanza únicamente en un instante sí que dura un periodo de tiempo. La presión comienza a aumentar cuando se cierran las válvulas de admisión debido a que en ese momento comienza el proceso de compresión de la mezcla. Antes de alcanzar el punto muerto superior (PMS), comienza la combustión de la mezcla alcanzándose durante ese proceso la presión máxima, el valor máximo no se alcanza el en ángulo 360° debido a que en nuestro modelo el inicio de la combustión lleva un adelanto de la combustión, gráfico5.

Diagrama de presión

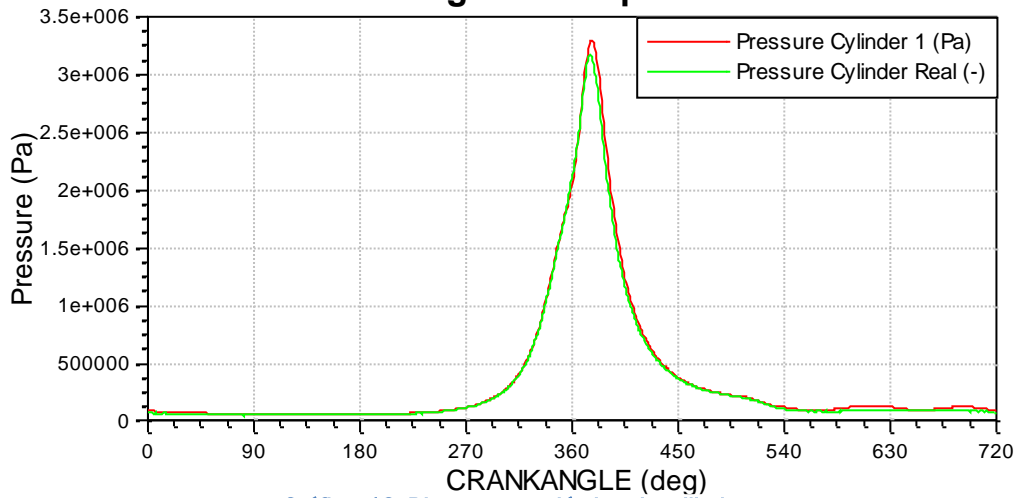


Gráfico 12. Diagrama presión interior cilindro

Diagrama de presión

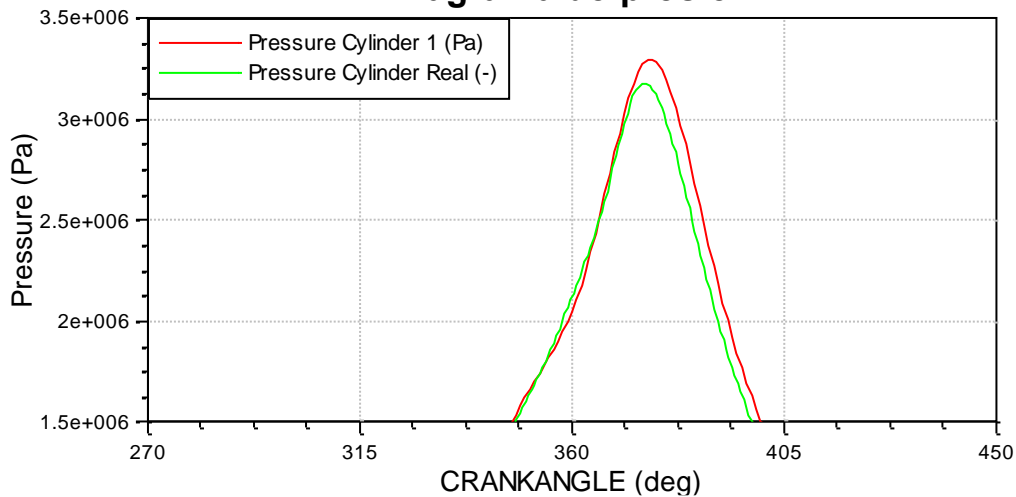


Gráfico 13. Diagrama presión interior cilindro ampliado

En el gráfico 12 y gráfico 13, se superpone el diagrama de presión en el cilindro obtenido de forma teórica con la simulación y el resultado real del banco de ensayos.

El resultado obtenido de la presión en el cilindro es correcta. Tanto la forma de la gráfica como la pendiente de la misma obtenida con la simulación se ajustan de forma casi perfecta a los valores experimentales.

Analizando dicho gráfico podemos definir con intervalos angulares los procesos que se producen a lo largo de un ciclo.

- Proceso de admisión
- Proceso de compresión
- Proceso de combustión
- Proceso de expansión
- Proceso de escape

Los valores de la combustión han sido introducidos con anterioridad en el modelo. Estos valores son el ángulo de inicio de la combustión y la duración de dicha combustión. La definición de liberación de calor (vibe) queda parametrizada en el apartado 3.2.2

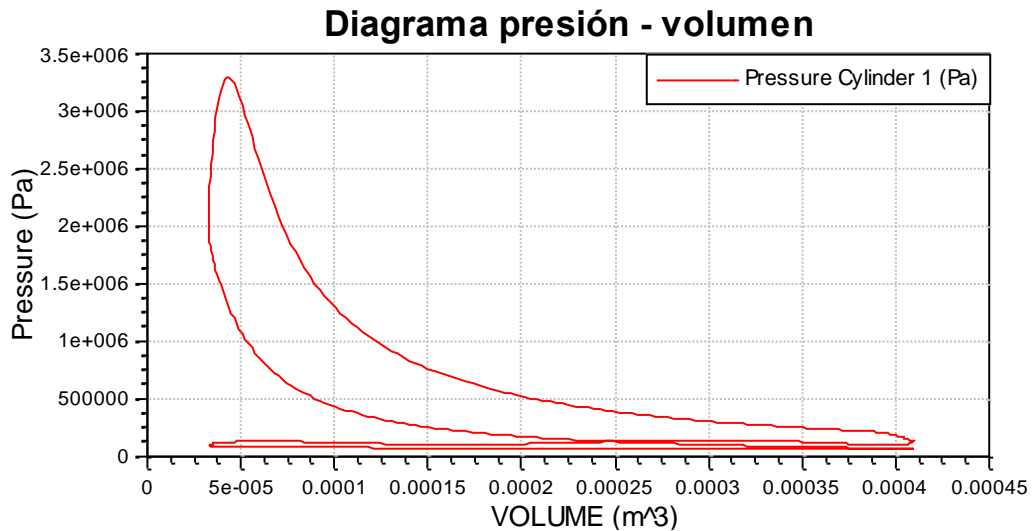


Gráfico 14. Presión el cilindro frente al volumen en el interior del cilindro.

Para completar el análisis de la presión el interior del cilindro se obtiene el diagrama de la presión frente al volumen, gráfico 14 el cual nos muestra que tipo de ciclo simulado.

4.7 PRESION MEDIA INDICADA (pmi)

En el gráfico 15, se muestra la presión media indicada durante la fase de expansión. Dicha presión produce un trabajo disponible en el eje motor (W_i), siendo este el trabajo indicado.

El trabajo efectivo es menor que el trabajo indicado debido a que hay que restar el trabajo consumido por rozamiento de piezas en el propio movimiento del motor y el de accionamiento de elementos auxiliares. La relación entre la diferencia de trabajo viene definida en la siguiente ecuación:

Se puede observar que durante los ciclos iniciales, los cuales podemos caracterizar de inicialización el valor de dichos trabajos fluctúa estabilizándose a partir del ciclo x

Para la definición de la presión media efectiva partimos del mismo análisis del ciclo que con la presión media indicada obteniendo el trabajado indicado (W_e), del proceso de expansión.

La presión efectiva puede ser obtenida a partir de la presión indicada y la presión media de pérdidas mecánicas según la ecuación

$$p_{me} = p_{mi} - p_{mpm}$$

Ecuación [10]

La presión media de pérdidas mecánicas (pmpm) se define como la suma de las pérdidas producidas por el accionamiento de elementos auxiliares, bombeo y fricción de los diversos componentes del motor. En gráfico 1, podemos observar la evolución de dichos parámetros a los largo de la simulación. Análogamente a lo que obtuvimos en el gráfico de trabajos el gráfico de presiones muestra un estado transitorio durante los primeros ciclos estabilizándose seguidamente.

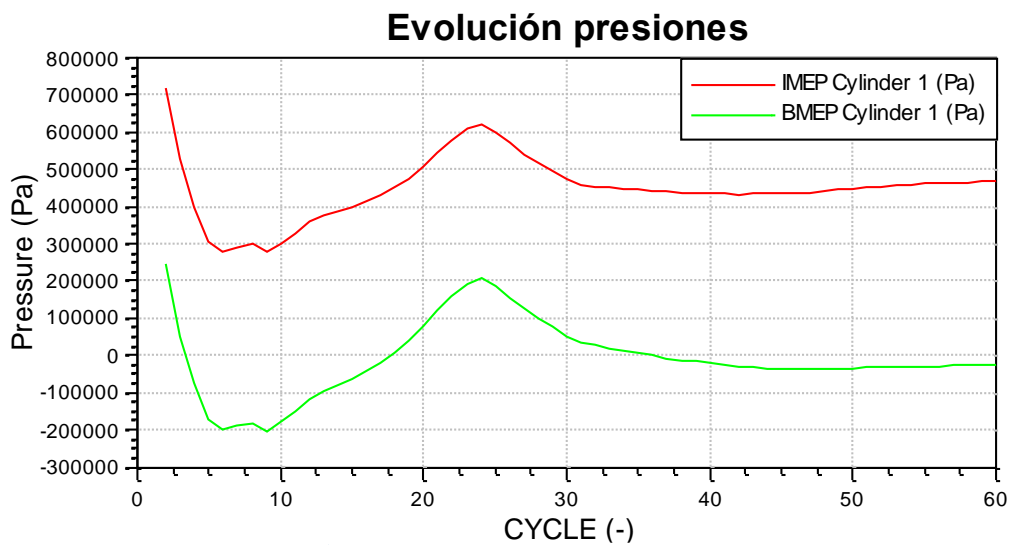


Gráfico 15. Presiones medias en el cilindro

4.8 CONSUMO ESPECÍFICO INDICADO

Definimos el consumo específico indicado con la siguiente ecuación:

$$g_{if} = \frac{\dot{m}_f}{N_i} \quad \text{Ecuación [11]}$$

- \dot{m}_f gasto másico de combustible
- N_i potencia indicada

La evolución de dicho parámetro durante los ciclos analizados se observa en el gráfico 16.

Consumo específico indicado

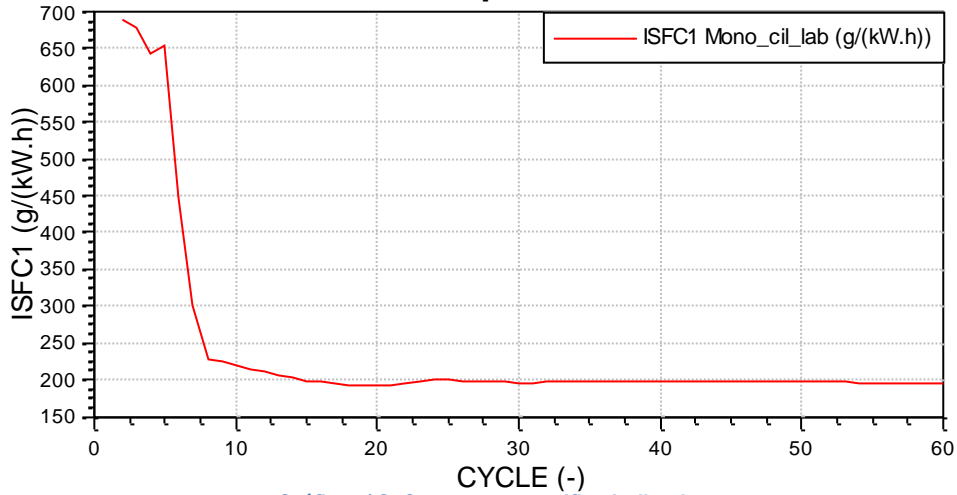


Gráfico 16. Consumo específico indicado

Las unidades de este parámetro habitualmente vienen definidas entre el cociente de gramos consumidos y la potencia durante una hora en kw. [g/kWh]. El valor estabilizado a partir del ciclo 25 es 195,41 g/kWh.

4.9 TEMPERATURA CILINDRO

En esta apartado se estudia la variación de temperatura máximas alcanzadas de los gases de escape en el momento de apertura de la válvula de escape del motor obtenido de la simulación realizada, gráfico 17.

Temperatura cilindro

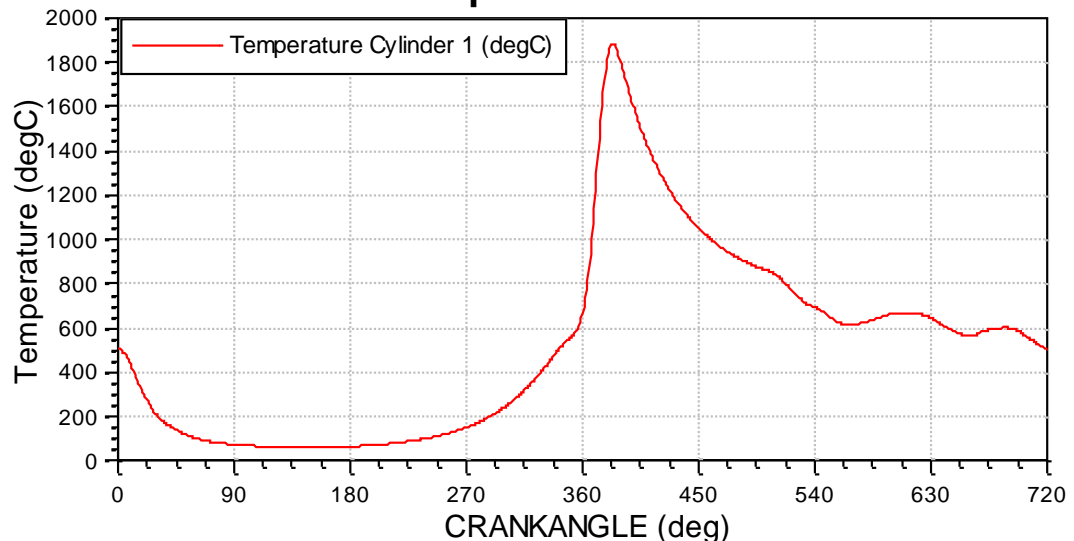


Gráfico 17. Temperatura en el cilindro

El grado de apertura establecido para la válvula de escape es de 137,45°. Se observa que la temperatura máxima no se alcanza en el PMS, sino al final de la segunda fase de la combustión que es cuando se ha liberado la mayor parte

del proceso. La temperatura máxima alcanza es 2156.42 °C en la posición angular 384°.

5. CONCLUSIONES Y LINEAS DE FUTURO

Con la realización de este fin de grado se han llegado a obtener los objetivos fijados previamente a la realización del mismo.

Se ha comenzado realizando una descripción completa de la instalación experimental que se ha usado como referencia para poder validar el modelo respecto de los resultados teóricos del software AVL BOOST. En dicha descripción se han numerado los elementos principales que componen la instalación, comentado el funcionamiento de los mismos y dimensiones del motor utilizado.

Posteriormente se ha implementado la instalación experimental en el software AVL BOOST, mediante la creación de un modelo teórico. Se ha presentado la descripción detalla de los elementos necesarios para la concepción de dicho modelo incluyendo dimensiones, condiciones iniciales y parámetros característicos para reproducir de la forma más exacta posible la instalación real, con el fin de que esa descripción sirva como paso inicial al desarrollo teórico de la instalación.

Para finalizar se ha descrito los pasos seguidos para realizar la validación del modelo, comparando los resultados obtenidos con la simulación frente a los resultados experimentales. En dicha validación se ha analizado el ajuste de los diferentes PID utilizados así la influencia de los mismos en el resultado de la simulación.

Como líneas de futuro respecto de este proyecto, el modelo está concebido para funcionar con diferentes combustibles con H₂ o modificar el tipo de gas introducido. En nuestro modelo hemos definido un transporte clásico de especies el cual solo admite trabajar como admisión un único combustible eligiendo el gas natural. Si se configura un transporte general de especies el modelo creado permite configurar múltiples combustibles para realizar la combustión el cilindro. Con dicha configuración se puede realizar una gran cantidad de simulaciones a partir del modelo creado y ser utilizado como elemento de análisis de la instalación.

Como mejora futura en el modelo habría que considerar la variación del momento de inercia del cigüeñal, con lo que se ajustaría de forma más exacta los gráficos de validación del modelo.

Por otro lado con la implementación del software que hemos utilizando (AVL BOOST), se pueden crear modelos que reproduzcan instalaciones en fase de proyecto para optimizar los elementos a ubicar en la instalación. Desde un

punto de análisis de costes de empresa, la utilización del software presentado en este proyecto permite obtener resultado de formas previas a la implementación de la instalación y focalizar los recursos disponibles en los elementos que se muestren más críticos.

6. BIBLIOGRAFIA

LIBROS

- [L1] Payri, F., & Desantes, J. M. Motores de combustión interna alternativos. Universidad Politécnica de Valencia. (2011)
- [L2] Crespo, A. Mecánica de Fluidos. Madrid: Thomson Editores Spain Paraninfo. (2012).
- [L3] Moran, M.J. Shapiro Fundamentos de Termodinámica Técnica (2º Ed.) Barcelona: Reverté, S.A.
- [L4] Crespo, A. Mecánica de Fluidos. Madrid: Thomson Editores Spain Paraninfo. (2012).
- [L5] Crespo, A. Mecánica de Fluidos. Madrid: Thomson Editores Spain Paraninfo. (2012).
- [L6] Muñoz, M & Payri, Motores de combustión interna alternativos. Universidad de Madrid (1989)
- [L7] Ram B. Gupta, Hydrogen Fuel: Production, Transport and Storage. CRC Press. (2008)

MANUALES DE USUARIO

- [M1] AVL BOOST User Guide (2014)
- [M2] AVL Simulation Tools (2014)
- [M3] AVL Theory (204)
- [M3] AVL List GmbH. (2009). AVL BOOST 4 Cylinder Gasoline Engine Example Version 2013.2 (Edition 11/2013)

TESIS, PROYECTOS, ARTICULOS Y APUNTES

[A1] Transmisión de calor por convección. Apuntes, Universidad de Valladolid, Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica. (2014/2015).

[A2] M.Reyes, A. Melgar, A.Peréz, B.Giménez. Study of the cycle-to-cycle variations of an internal combustion engine fuelled with natural gas/hydrogen blends from diagnosis of combustion pressure. International journal of hydrogen energy (2013) 5477-5487.

[A3] Motores térmicos y motores de combustion interna alternativos. Apuntes Universidad de Valladolid. Departamento de Ingeniería Energéticas y Fluidomecánica (2014/2015).

[A4] David Rescalvo de Diego. Simulación termofluidomecánica del ensayo en frío del final de producción de un MCI. Trabajo fin de grado, Escuela de Ingenierías Industriales, Mayo 2015.