

Introducción

El proyecto se basa en el uso de una herramienta software para el análisis de un determinado motor, comparando los resultados obtenidos con los reales y a su vez dando una explicación de por qué se obtienen dichos datos.

Hoy en día la mayor parte de los motores que forman parte de nuestro día a día son de combustión interna, eso significa que la combustión se produce en el interior del motor y no externamente como en el caso de los motores de vapor.

Historia

Los primeros prototipos de motores de este tipo no contaban con la fase de compresión luego el proceso de inyección terminaba cuando el pistón estaba más o menos en la parte media del cilindro, eso derivaba en que la chispa generada no era suficiente para que todo el combustible ardiese. En cuanto la fase de compresión fue implementada estos motores empezaron a sustituir a las maquinas de vapor ya que producen una mayor potencia en menores dimensiones, además de otras muchas ventajas.

Motor de cuatro tiempos

Un motor de cuatro tiempos es aquel que necesita cuatro recorridos del pistón, dos vueltas completas del cigüeñal, para completar su ciclo termodinámico.

Las cuatro etapas se explican a continuación:

Primer paso o admisión: en esta etapa, cuando el pistón baja, permite que el nuevo combustible entre por la válvula de inyección. Mientras se abre esta válvula, la de escape se mantiene cerrada.

Segundo paso o compresión: al final de la ejecución anterior el gas dentro del cilindro se comprime por medio del movimiento ascendente del pistón, por lo que la válvula de inyección se cierra por la presión.

Tercer paso o explosión / expansión: Después del tiempo de compresión, cuando el pistón vuelve a la posición superior, se obtiene la presión máxima dentro del cilindro. En nuestro caso tenemos un motor diesel por lo que el combustible se inyecta pulverizado y se quema por medio de la presión y la temperatura dentro del cilindro. Entonces la expansión del gas hace que el pistón se mueva de nuevo hacia abajo, es en ese momento cuando se crea el trabajo de todo el proceso. El trabajo de expansión obtenido es más o menos cinco veces el trabajo de compresión necesario.

Cuarto Paso o escape: en este último paso el movimiento superior del pistón hace que los gases de combustión salgan a través de la válvula de escape. Cuando el pistón está en la parte superior, la válvula de escape se cierra y la inyección se abre para que todo el proceso se inicie de nuevo.

El objetivo de este informe es que, conociendo los datos de un motor de un automóvil especificado y utilizando software de simulación, se obtenga una simulación de datos del motor para analizarla y tratar de mejorar la eficiencia del motor o dar un rango de velocidad del motor en el que las variables analizadas tienen los mejores valores para una mayor durabilidad de este motor.

Motor elegido

Ford Fiesta 5d Trend 1.5 TDCi 75 CV

- Motor diesel de cuatro tiempos
- 4 cilindros en línea
- 2 válvulas por cilindro
- Manual 5 velocidades
- 41 litros de capacidad de combustible
- Velocidad máxima 167 km / h
- Ratio de compresión 16.0-1
- Diámetro del cilindro 73,5 mm
- Carrera del pistón 88.3 mm
- Motor sobrealimentado con intercooler

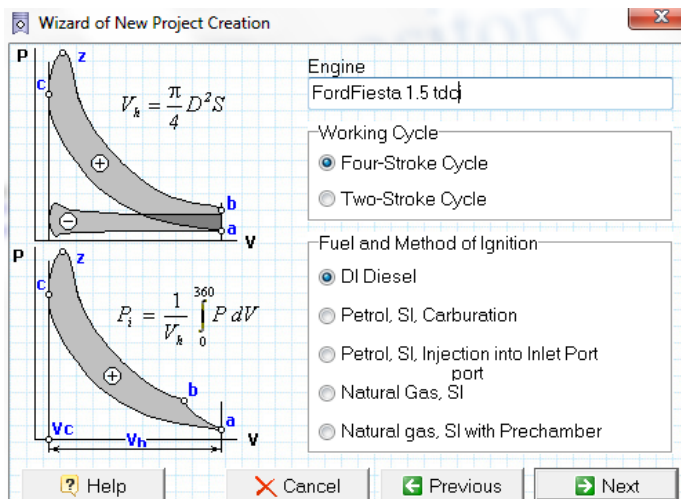
Toda esta información se va a utilizar en la simulación del motor luego asumiremos su veracidad.

Software usado para las simulaciones

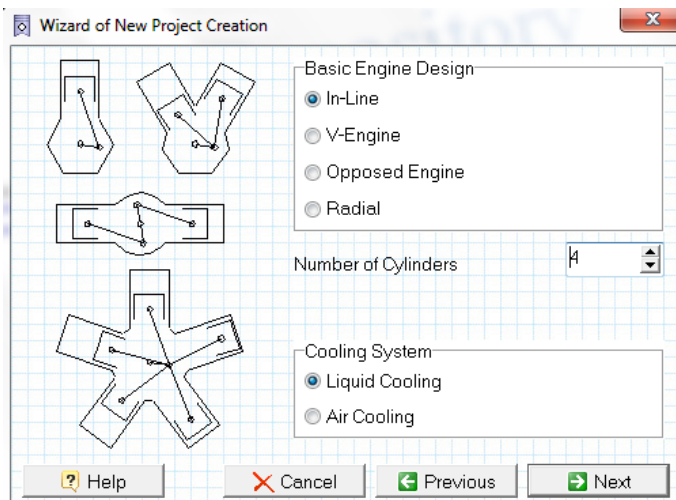
El nombre del software que se va a utilizar es Diesel-RK Net; Es un software termodinámico profesional de la simulación del motor del ciclo completo y se centra en la simulación avanzada de la combustión del diesel y la formación de la emisión. Permite al usuario obtener, con el uso de los coeficientes empíricos mínimos, predicciones de alta precisión de la simulación de cualquier tipo de proceso de trabajo de motores de combustión interna.

Introduccion de los datos en el programa

Cuando iniciamos el programa empieza a preguntarnos algunos datos del motor cuyo procedimiento de trabajo va a ser simulado.

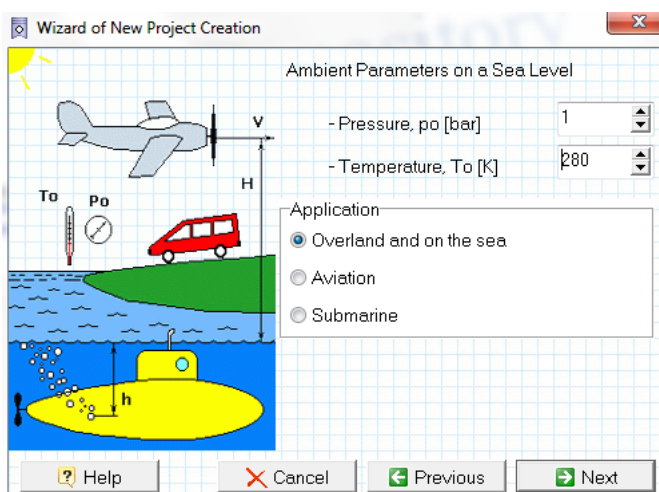
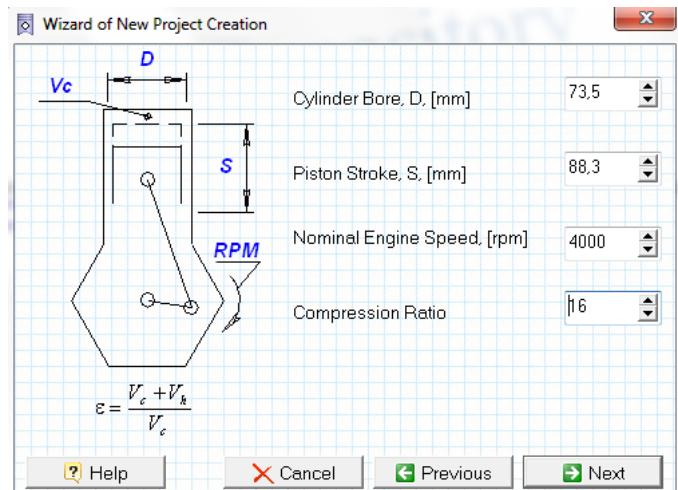


Comenzamos a llamar al motor como el elegido y al observar sus características mecánicas se encuentra que el ciclo de trabajo corresponde a un motor de cuatro tiempos y trabaja con DI Diesel como combustible.



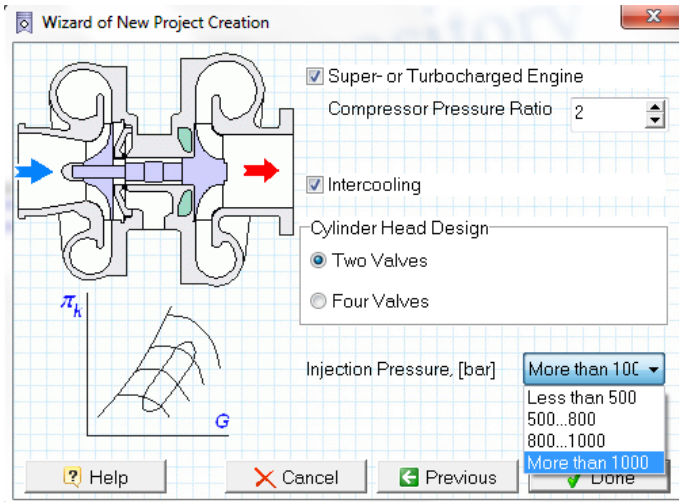
En el siguiente paso es necesario comprobar el diseño básico del motor, en este caso tenemos un motor en línea, el número de cilindros, cuatro en el caso de estudio, y el sistema de refrigeración, el elegido tiene un sistema de refrigeración líquida.

Utilizando algunos datos encontrados en Internet, en algunos enlaces sobre las características técnicas de los motores de automóviles, se obtuvo que el diámetro del cilindro mide 73,5 mm y la carrera del pistón es de 88,3 mm. Se decidió establecer la velocidad nominal del motor a 4000 rpm y la relación de compresión encontrada fue de 16,0-1.



Este estudio se realizó en Polonia, se decidió utilizar los datos de Gdansk que están más o menos en el nivel del mar y los datos de temperatura son más fáciles de obtener.

Se obtuvo que la temperatura media es de aproximadamente 7°C (280 K), a 1 bar y como se ha estudiado un motor de coche, se elige la opción "Overland and on the sea".



Para completar este paso se encontró que el motor elegido es turboalimentado, con intercooler y con dos válvulas por cilindro, pero los valores para la relación de presión del compresor y la presión de inyección no se encontró por lo que se pidió ayuda a un profesor especializado en este tema y conector del software utilizado. Se decidió utilizar el valor de 2 para la relación de presión del compresor y "more than 1000" para el valor de la presión de inyección.

Una vez introducidos todos los datos necesarios, el nuevo proyecto se crea en el programa y está listo para ser ejecutado y estudiado.

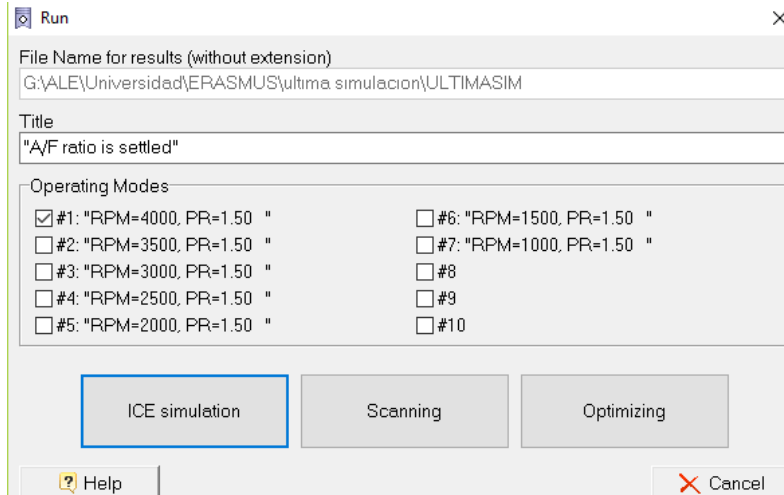
Ejecución de la simulación

En el análisis de este motor se utilizan dos tipos diferentes de funcionamiento; el primero sólo analiza un punto del rango de velocidades del motor, significa analizar sólo un valor determinado de velocidad. El segundo tipo consiste en comprobar el proceso de aceleración, de esta manera obtenemos gráficas que representan la evolución de algunas variables durante este periodo de aceleración.

Lo primero que hay que hacer es introducir los puntos en los que estamos interesados. Esto se muestra en la siguiente imagen.

Mode of Performance (#1 = Full Load)	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Engine Speed, [rpm]	4000	3500	3000	2500	2000	1500	1000	4000	4000	4000
Air Fuel Equivalence Ratio in the Cylinder	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	2	2
Injection / Ignition Timing, [deg B.TDC]	20	19	18	16	15	14	14	3	3	3
Ambient Pressure, [bar]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Ambient Temperature, [K]	290	290	290	290	290	290	290	290	290	290
Inlet Pressure Losses (before compressor), [bar]	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Differential Pressure in exhaust (tail) system, [bar]	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Compressor Pressure Ratio (HP Stage)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Compressor Adiabatic Efficiency (HP Stage)	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696	0.696
Fraction of the Exhaust Gasflow By-passed before Turbine	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fraction of the Airflow By-passed after Compressor into atmosphere	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Average Total Turbine Inlet Pressure (HP St.) (or first appr.), [bar]	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77	1.77
Turbocharger Efficiency (HP Stage)	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465	0.465

Simulación de solo un valor de velocidad



Se tomaron los ocho primeros puntos y se simularon uno a uno obteniendo los valores exactos de las diferentes variables. En la siguiente tabla se incluyen los valores obtenidos:

Brake Torque (Nm)	Specific Fuel Consumption(kg/kWh)	Volumetric Efficiency	Piston Engine Power(kW)	NOx (ppm)	Specific Particulate Matter (g/kWh)
140.65	0.27214	0.87983	14.728	71.343	0.04165
162.21	0.24131	0.89977	25.478	57.318	0.02728
171.40	0.23195	0.91379	35.896	52.738	0.02728
173.68	0.22905	0.91441	45.466	50.996	0.03054
173.5	0.2308	0.9205	54.503	77.487	0.01754
171.82	0.23322	0.92113	62.971	92.167	0.0158
156.58	0.24355	0.87663	65.583	36.006	0.199

Simulación del proceso completo

Aquí se toman todos los puntos para la simulación y los resultados obtenidos se representan en gráficos. Estos gráficos tienen en el eje X la velocidad del motor (rpm) como variable. Vamos a centrarnos en comprobar las variables nombradas en la tabla presentada anteriormente.

Análisis de los gráficos

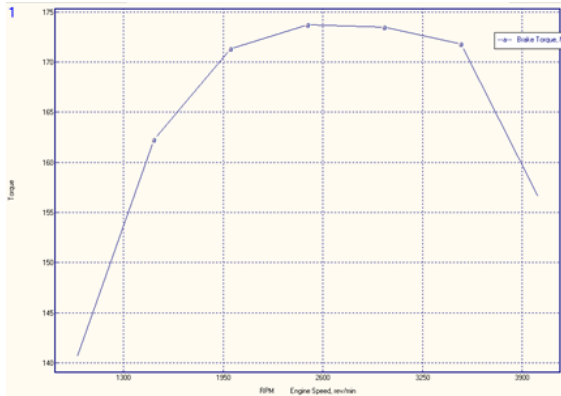
En este punto se presentarán y analizarán los gráficos obtenidos, tratando de determinar la mejor velocidad del motor en cada caso y dando algunas explicaciones sobre cada variable.

Par de frenado

El par es la capacidad del motor para producir trabajo. Se sabe que los motores diesel pueden generar mucho más que los de gasolina. Esto se debe a que en el proceso de gasolina la mezcla de combustible-aire se comprime en el cilindro, pero en el proceso de diesel sólo se comprime el aire. Cuando el motor está trabajando con gasolina el combustible es inyectado con aire en el cilindro y luego comprimido pero en el proceso diesel, el aire se comprime hasta una presión determinada y luego el combustible se inyecta, debido a las altas temperaturas en el interior este se inflama. La compresión del aire significa que el pistón tiene que viajar más, una carrera de pistón más larga, y una carrera de pistón más larga significa un mayor diámetro del cigüeñal.

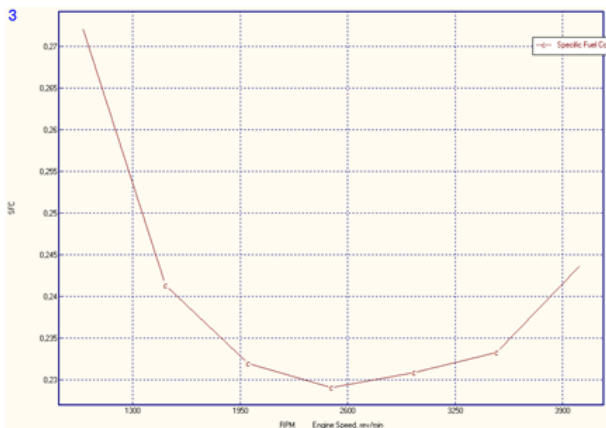
Si se supone que la fuerza procedente del pistón diesel y del pistón de gasolina es la misma; El motor diesel, al tener una mayor carrera, está moviendo el cigüeñal con un par mayor que el de gasolina. Si el segundo tuviese que entregar la misma potencia que el diesel, tendría que hacerlo con más revoluciones por minuto en el cigüeñal y menos par.

En el siguiente gráfico se presenta la evolución del par en función de la velocidad del motor.



Como podemos ver, el valor más alto obtenido del par de frenado es de 173,68 Nm a 2500 rpm. El mejor rango de trabajo de velocidad para el motor está entre 1500 y 3000 rpm porque es allí donde el motor produce sus valores de par más altos. El máximo real obtenido por internet es 185 Nm.

Consumo específico de combustible

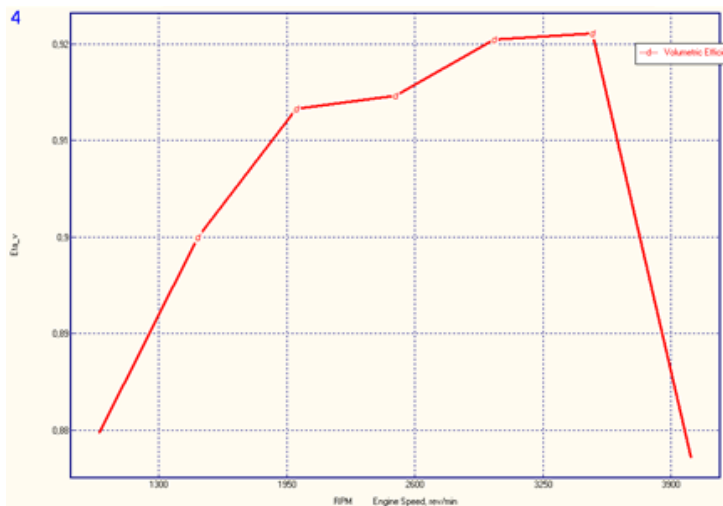


En el gráfico se muestra que cuando el motor alcanza el punto de 3500 rpm, el consumo crece mucho. Esto se debe a que en un motor diesel cuando las revoluciones por minuto aumenta, el consumo de todo el combustible se vuelve más difícil para el motor ya que la cantidad de oxígeno para la explosión es menor y la compresión se vuelve incontrolada. El combustible no quemado sale de la misma manera que los gases de escape.

El consumo más bajo se obtiene cuando el motor está funcionando entre 2000-2500 rpm y comprobando la gráfica se puede decir que si su velocidad está entre 1500-3000 rpm funcionará eficientemente.

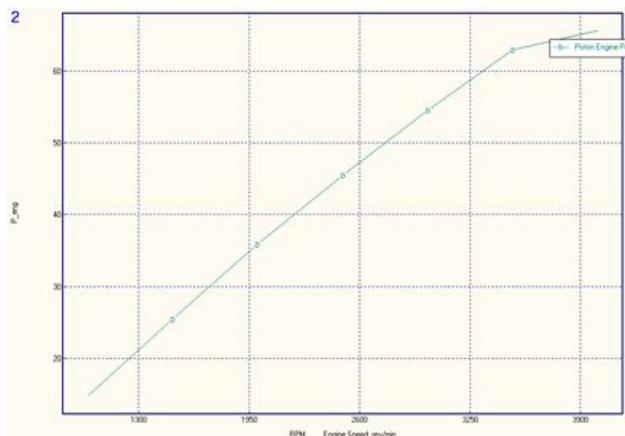
Eficiencia volumétrica

En términos técnicos, la eficiencia volumétrica es la relación (o porcentaje) de la masa de aire y combustible que se toma durante la etapa de admisión dividida por la masa de aire que ocuparía el volumen desplazado en una presión igual a la del interior del cilindro.



Se puede comprobar en el gráfico que el valor más alto de la eficiencia volumétrica se obtiene en torno a una velocidad de 3000 rpm. También se puede observar que antes de 1000 rpm y después de 3500 rpm el valor de eficiencia volumétrica comienza a disminuir sin control, cuando la eficiencia volumétrica es menor significa que el motor está quemando menos cantidad de combustible que la última etapa y se traduce en un menor par.

Potencia del pistón

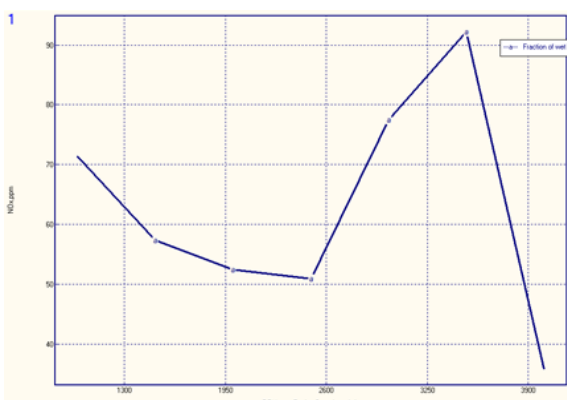


En el gráfico se muestra claramente que la potencia del pistón está directamente relacionada con la velocidad del motor, cuando el último alcanza su máximo también la potencia alcanza su mayor valor obteniendo 65.583 kW a 4000 rpm. Hasta que se alcanza la velocidad 3500, la potencia del motor aumenta con una gran pendiente pero cuando esta velocidad supera la pendiente se hace más baja, por lo que trabajar con velocidades superiores a este límite significa que la diferencia entre las potencias del motor de pistón será mínima. Buscando los datos reales de este motor se obtuvo un valor teórico de 55 kW para 3750 rpm.

NOx ppm

En este gráfico se mostrarán las emisiones de NO_x para nuestro caso de motor, se refiere a óxidos de nitrógeno.

Se dice que este grupo está compuesto por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) también, pero se sabe que también incluye óxido nitroso (N₂O). Estas emisiones se obtienen porque el aire es una mezcla de nitrógeno y oxígeno en su mayor parte. Cuando la ignición se produce en el motor hay algunas áreas con suficiente temperatura para producir la oxidación de un poco de nitrógeno a los gases de NO_x; La cantidad sólo depende del volumen y la duración de la parte más caliente de la llama.



En el gráfico se puede apreciar que comienza en declive, pero alcanzando 2500 rpm comienza a crecer, esto se debe a que las temperaturas más calientes se alcanzan a estas velocidades.

Las mayores emisiones se obtienen a 3500 rpm más o menos y luego disminuye sin control a medida que el motor inicia su etapa incontrolada.

DPM para motores diesel

Los DPM están compuestos principalmente por carbono, hidrocarburos pesados del combustible y aceite, y ácido sulfúrico hidratado derivado del combustible de azufre. Se pueden encontrar partículas de diámetros pequeños de 0,04 μm .



Al analizar el gráfico se observa que trabajar en revoluciones más altas significa mayores emisiones, esto sucede porque las emisiones están relacionadas con la cantidad de combustible que se desperdicia sin quemarse, cuando estamos trabajando a velocidades más bajas el motor introduce el combustible necesario pero cuando estamos trabajando con velocidades más altas y la situación no controlada comienza, el motor no puede quemar todo el combustible inyectado por lo que un porcentaje de él es expulsado.

La cantidad mínima de emisión se obtiene alrededor de 3000 rpm, por lo que si el motor funciona entre 1500 y 3500 revoluciones por minuto sería tener las emisiones más bajas.

En el gráfico se puede apreciar el inicio de la situación no controlada a 3500 rpm donde el gráfico comienza a aumentar hasta máximos.

La influencia del turbocompresor y el intercooler

En esta parte se va a mostrar y explicar la influencia del turbocompresor y del intercooler, se va a simular el mismo motor pero en este caso no se va a incluir el intercooler y la opción de turbocompresor.

El turbocompresor está compuesto por una turbina y un compresor unidos por el mismo eje de rotación, aumenta la eficiencia de combustión del motor y también la potencia suministrada mediante el forzado de una cantidad extra de aire en la cámara de combustión. El compresor está trabajando con diferentes valores de presión que la atmosférica por lo que la cantidad de combustible / aire tomada es mayor. Este compresor se activa mediante el movimiento de los gases de escape.

Cuando se aumenta la presión de aire de admisión, también la temperatura aumenta en el interior del turbocompresor debido a la transferencia térmica entre los gases de escape que activan el compresor y los gases de admisión. Este calentamiento hace que los gases reduzcan su densidad, por lo que disminuye la cantidad de oxígeno por unidad de volumen. Esta pérdida de oxígeno significa una menor eficiencia volumétrica y potencia del motor porque hay menos oxígeno para la combustión.

La función del intercooler es reducir la temperatura alrededor de 60°C para aumentar la potencia y la eficiencia volumétrica del motor.

Ahora el Diesel-RK se utilizará para simular un motor nuevo con los mismos datos que el anterior pero en este caso sin intercooler ni turboalimentado, los datos obtenidos serán comparados con los del primer motor para ver la influencia de estos elementos en cada variable.

La forma más fácil de ver las diferencias entre la primera simulación del motor y la que no tiene turbocompresor e intercooler es comparar los valores numéricos obtenidos, mostrados en las tablas siguientes:

Eng.Speed	BT(Nm)	BT(Nm)	SFC(kg/kWh)	SFC(kg/kWh)	Vol.Eff	Vol.Eff	PEP(kW)	PEP(kW)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	SPM(g/kWh)	SPM(g/kWh)
1000 rpm	140.65	71.295	0.27214	0.29068	0.87983	0.86065	14.728	7.465	71.343	46.851	0.04165	0.1489
1500 rpm	162.21	83.479	0.24131	0.25468	0.89977	0.88302	25.478	13.122	57.318	37.101	0.02728	0.08861
2000 rpm	171.40	88.705	0.23195	0.24316	0.91379	0.89586	35.896	18.577	52.738	38.495	0.02728	0.05727
2500 rpm	173.68	90.022	0.22905	0.24037	0.91441	0.8987	45.466	23.566	50.996	38.224	0.03054	0.04762
3000 rpm	173.5	90.066	0.2308	0.24344	0.9205	0.91065	54.503	28.293	77.487	44.455	0.01754	0.04651
3500 rpm	171.82	87.827	0.23322	0.24855	0.92113	0.90665	62.971	32.188	92.167	45.96	0.0158	0.05450
4000 rpm	156.58	79.682	0.24355	0.25993	0.87663	0.86024	65.583	33.375	36.006	19.204	0.199	0.24206

En la primera fila de la tabla anterior, en azul, se incluyen los datos obtenidos para la primera simulación del motor real y en rojo los valores para el motor sin turbo e intercooler. Se puede apreciar que el primer motor produce más par de frenado; también tiene menos consumo de combustible específico, la eficiencia volumétrica del motor que trabaja sin turbocompresor es menor porque está introduciendo menos cantidad de aire dentro del cilindro así que el combustible quemado es también menor. La potencia del motor de pistón se reduce a la mitad más o menos al quitar el turbocompresor y el intercooler y en las últimas columnas se incluyen las emisiones de los motores, en el caso de la materia particulada es el primer motor el que tiene emisiones más bajas pero en el caso de las emisiones de nitrógeno los resultados del segundo motor son más bajos que en el primer caso, esto es porque como en el primero estamos introduciendo más aire significa mayor presión y temperatura y mayores emisiones de NOx.

Conclusiones

Al analizar todo el proyecto se puede decir que si el motor trabaja entre 2000 y 3000 revoluciones por minuto todas las variables analizadas darían buenos resultados. También se puede confirmar la necesidad del turbocompresor y el intercooler, pero en el caso de emisiones se puede decir que los motores diesel producen menos cantidad de NOx pero más partículas estáticas que son peores para las personas, ya que se acumulan en el aparato respiratorio y pueden dar lugar a enfermedades respiratorias.