

Sistematización del método de selección de un turbocompresor, en el diseño de un sistema turboalimentado usando mezclas etanol-gasolina

Systematic method for selection of a turbocharger in the design of a turbocharged system using ethanol-gasoline blends

Luís Carlos Ríos Quiroga¹, Luís Guillermo Gaviria A².

Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia

lcrios@utp.edu.co

luis.guillermo.gaviria@gmail.com

Resumen— En este artículo se resume el procedimiento teórico y el posterior desarrollo de un programa de computador, que permite la selección de un turbocompresor usado para incrementar la potencia de un motor convencional de aspiración atmosférica. Lo anterior se hace sin realizar cambios en la relación de compresión original del vehículo. También debe permitir el uso de mezclas de biocombustible etanol-gasolina hasta un 85%. Esta tecnología se denominó SISTEMA FLEXFUEL DE ALTA EFICIENCIA o FLEXFUEL TURBO.

La selección del turbo cargador usando el programa de computo coincide con la selección teórica desarrollada, dándole validez al trabajo realizado.

Palabras clave— aspiración atmosférica, eficiencia, relación de compresión, biocombustible, motor sobrealimentado, turbocompresor.

Abstract— In this article, the theoretical procedure and subsequent development of software that allows a turbocharger selection, used to increase the power of a conventional naturally aspirated engine is presented. This is done without making changes to the original compression ratio of the vehicle. It must also allow the use of mixtures of biofuel (ethanol-gasoline) up to 85%. This technology is called HIGH EFFICIENCY FLEXFUEL SYSTEM or FLEXFUEL TURBO.

The selection of the turbo charger using the software matches the theoretical selection developed, giving validity to this work.

Key Word — natural¹ aspiration, efficiency, compression ratio, biofuel, overfed engine, turbocharger.

I. INTRODUCCIÓN

Los gases de combustión de los vehículos automotores que queman derivados del petróleo, como la gasolina y el diesel, aportan² el 40% de SO₂, uno de los causantes de la lluvia ácida y cerca del 75% de los NO_x y CO₂, que constituyen la polución fotoquímica causante del “efecto invernadero”, el 70% del CO, causante de la inhabilidad en las células de la sangre para transportar el oxígeno por el sistema circulatorio, el 38% de hidrocarburos no quemados y el 35% de las partículas que arrastran los agentes contaminantes [1]. Por esta razón, se han buscado nuevas alternativas para sustituir estos energéticos, entre las cuales están el uso de hidrógeno, de la electricidad, la energía solar y los biocombustibles. Todas estas alternativas, aunque son una gran solución, presentan inconvenientes como altos costos y autonomías de funcionamiento bajas.

La tecnología FLEXFUEL DE ALTA EFICIENCIA fue desarrollada como una propuesta para promover el uso de biocombustibles (mezclas etanol-gasolina), enfocada a aprovechar el máximo rendimiento posible de este combustible.

El objetivo de esta tecnología es obtener las mayores prestaciones posibles en un motor convencional, diseñado para utilizar exclusivamente gasolina, al que se le han agregado elementos que mejoran las prestaciones de potencia, y que con la programación adecuada puede trabajar eficientemente con diferentes mezclas etanol-gasolina.

En este artículo se encuentran los parámetros de diseño y los cálculos que permitieron la selección del turbocompresor, así como la teoría que respalda esta selección, para la construcción

¹ Ingeniero Mecánico, M. Sc.

Fecha de Recepción: 12 de Mayo de 2011
Fecha de Aceptación: 10 de Noviembre de 2011

² Ingeniero Mecánico, Investigador Proyecto “PROTOCOLO E-20”

del sistema FLEXFUEL de alta eficiencia. También se presenta el desarrollo de un programa construido en Excel, donde se demuestra las bondades de su aplicación en un proceso cíclico de selección; como es el del turbocompresor.

II. CONTENIDO

A. CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

El motor de combustión interna es una máquina que aprovecha parte de la energía de una reacción química y la convierte en energía mecánica la cual puede ser aprovechada para varios usos, por ejemplo mover un vehículo, su uso más tradicional. Esta reacción química se produce dentro de una cámara de esta máquina y ésta se conoce como combustión, y consiste en la transformación de un combustible, en presencia de oxígeno en otros elementos como el dióxido de carbono y agua; en este proceso se libera energía la cual en parte es aprovechada para desplazar un pistón dentro de un cilindro, por medio de la expansión de los gases de la combustión, y este desplazamiento se convierte en movimiento giratorio debido a un cigüeñal.

El oxígeno que se requiere para la combustión el motor tradicionalmente lo toma del aire. En algunos casos, como los biocombustibles, parte del oxígeno necesario para la combustión lo tiene el combustible, éstos son llamados combustibles oxigenados.

B. MOTORES DE ADMISIÓN ATMOSFÉRICA

Los motores de combustión interna operan como una bomba de aire de desplazamiento positivo en donde, gracias a la acción de unas válvulas o toberas, por un conducto entra el aire y por otro conducto libera los productos de la combustión. El aire que ingresa, junto al combustible, es lo que el motor necesita para producir energía de movimiento, en la medida que ingresa más cantidad de aire con la proporción de combustible indicada, la energía que entrega el motor es mayor.

La capacidad de un motor de combustión interna la define la cilindrada, que no es más que el volumen total que ocupa el pistón dentro del cilindro desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior (figura 1), este desplazamiento es conocido como carrera del pistón.

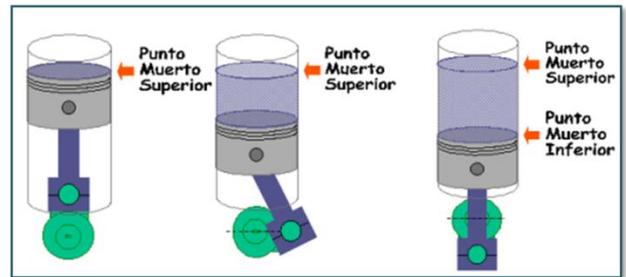


Figura 1. Cilindrada o volumen desplazado

Para calcular la cilindrada de un motor se requiere conocer el diámetro del pistón y la carrera o desplazamiento del pistón dentro del cilindro, estos datos se pueden obtener de manuales o se pueden medir directamente desde el motor.

C. MOTORES DE ADMISIÓN SOBREALIMENTADA

En este caso se fuerza la entrada del aire por medio de elementos mecánicos o simplemente adicionando más oxígeno en la admisión del motor. Todo esto con la intención de aumentar la potencia sin tener que aumentar la cilindrada. La potencia depende de la cantidad de combustible quemado en cada ciclo de trabajo y del número de revoluciones, pero por mucho que se aumente el combustible que llegue al interior de la cámara de combustión, no se consigue aumentar su potencia si este combustible no tiene el aire suficiente para quemarse, es por eso que sólo se logra aumentar la potencia, sin variar la cilindrada ni el régimen del motor, si se coloca en el interior del cilindro un volumen de aire mayor al que entra en una "aspiración normal" (motores atmosféricos).

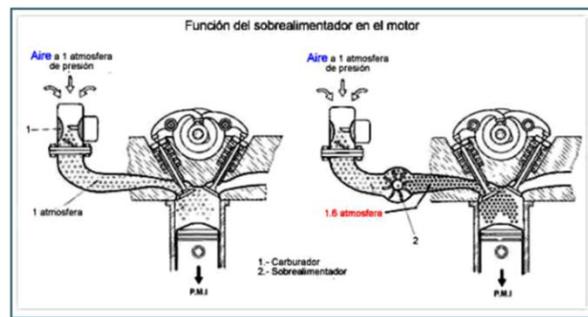


Figura 2. Alimentación atmosférica y sobrealimentación del motor [2]

Para sobrealimentación de un motor a gasolina es conveniente tener en cuenta que no se puede sobrepasar de una presión de compresión determinada porque puede ocasionar problemas de autoencendido o detonación, y estos fenómenos son muy perjudiciales para el motor.

D. TURBOCOMPRESOR.

El turbocompresor podría definirse como un compresor de aire movido por una turbina, dicha turbina está unida mediante un eje al compresor. El compresor está colocado en la entrada del colector de admisión, con el movimiento giratorio que le transmite la turbina a través del eje común, el compresor eleva la

presión del aire que entra por el filtro y consigue que mejore la alimentación de aire al motor como lo muestra la figura 3.

Las temperaturas a las que se somete el turbo en su contacto con los gases de escape van a ser muy elevadas (alrededor de 750 °C).

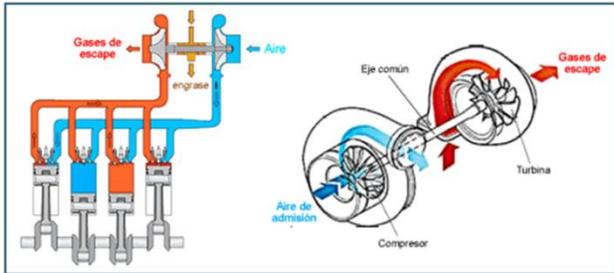


Figura 3. Turbocompresor [2]

Debido a que el turbocompresor se alimenta de los gases de escape del vehículo, se podría decir que se está obteniendo la energía necesaria para su funcionamiento "gratis", ya que se está aprovechando un fluido de alta energía que iba a ser expulsado. La presión que se crea por la restricción de la turbina del turbo crea un efecto de empuje dentro del motor, en la fase de escape de los cilindros, ya que el cilindro debe empujar más fuerte para expulsar los gases de escape, pero en contraprestación la presión generada por el compresor en la admisión, ayuda al descenso del pistón [2]. Un turbo puede fácilmente incrementar la potencia de un motor de un 30% a 40%.

E. MEJORANDO LAS PRESTACIONES DE POTENCIA DEL MOTOR

La implementación de un turbocompresor en un motor aspirado aumenta la presión media efectiva, pero no es proporcional en magnitud a las ganancias obtenidas en la potencia, simplemente la presión disminuye más lento, como se muestra la figura 4, siendo mejor aprovechada en la expansión del pistón.

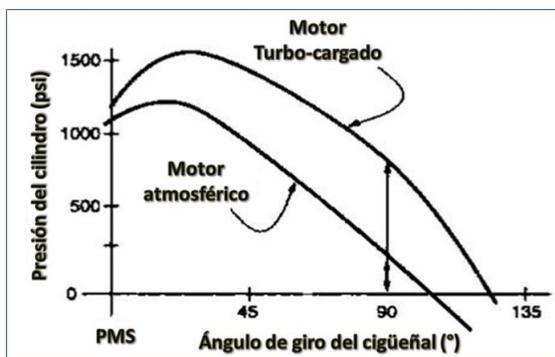


Figura 4. Evolución de la presión en el cilindro [2]

Para que un combustible pueda generar una combustión eficiente tiene que mezclarse con una determinada cantidad de aire. A esta mezcla se le llama mezcla aire-combustible. Dependiendo de las cantidades de aire y combustible presentes se puede o no generar una combustión. Las mezclas que pueden generar una combustión van desde 9 partes de aire y 1 de gasolina hasta 22 partes de aire y 1 de gasolina. Más allá de estos límites este tipo de mezcla es imposible que pueda mantener un proceso de combustión. [6]

Según “la ecuación de la potencia del motor” [4] se tienen los factores que intervienen en la potencia de una máquina de combustión interna:

$$W = \frac{P_m \cdot V \cdot \eta_v \cdot N}{75 \cdot 120} \cdot \eta_m \eta_t \quad (1)$$

donde W es la potencia, P_m es la presión media efectiva, V corresponde a la cilindrada, N la velocidad de giro, η_m , η_v y η_t son los rendimientos mecánico, volumétrico y térmico respectivamente.

F. SELECCIÓN DEL TURBOCOMPRESOR

En la selección de un turbocompresor para preparar un motor, es indispensable tener claro lo que se espera lograr con esta adaptación. La idea en este caso, es obtener un mayor rendimiento, teniendo en cuenta que el vehículo seguirá siendo un automóvil de uso diario. Para lo anterior es conveniente mantener la relación de compresión original, con el objetivo de mantener las características cuando no se cuenta con presión de sobrealimentación. El turbocompresor se debe seleccionar para que cargue o de presión de sobrealimentación en el más bajo régimen de giro del motor posible y que pueda mantener esta presión hasta el límite de revoluciones del motor seleccionado, que en este caso es el límite recomendado por el fabricante (6 000 rpm).

Lo primero que se debe tener en cuenta para la selección de un turbocompresor, es determinar la presión de sobrealimentación. Ésta la define la relación de compresión máxima que el combustible puede soportar sin auto-encenderse, que para operar con gasolina comercial de alto octanaje (extra) la máxima relación de compresión admisible es 12,5:1, teniendo en cuenta esto y que la relación de compresión original del motor es de 8,8:1 una cilindrada de 2500 cm³ y 6 cilindros, la presión de sobrealimentación calculada, cuando se opera con gasolina será:

$$R_c = \frac{V_{cil} + V_{ca}}{V_{ca}} = 8,8 \quad (2)$$

$$V_{cil} = \frac{2500}{6} \text{ cm}^3 \quad V_{ca} = 53,4 \text{ cm}^3$$

$$R_{ct} = \frac{V_{cil} \cdot \left(\frac{P_s + P_{atm}}{P_{atm}} \right) + V_{ca}}{V_{ca}} \quad (3)$$

$$P_s = \frac{((R_{ct} \cdot V_{ca}) - V_{ca}) \cdot P_{atm}}{V_{cil}} - P_{atm}$$

$$P_s = \frac{((12,5 \cdot 53,4) - 53,4) \cdot 14,7}{\frac{2500}{6}} - 14,7 = 7 \text{ psi}$$

donde: R_c : relación de compresión real
 R_{ci} : relación de compresión con sobrealimentación.
 V_{cil} : cilindrada unitaria
 V_{ca} : volumen de la cámara de combustión.
 P_s : Presión de sobrealimentación
 P_{atm} : presión atmosférica (14,7 psi)

Es posible que cuando se realicen pruebas en el motor se determine que se debe disminuir la presión de sobrealimentación por presencia de cascabeleo o detonación.

Por el octanaje del etanol se espera que pueda trabajar hasta una relación de compresión de sobrealimentación de 14:1. Teniendo en cuenta esto, la presión de sobrealimentación cuando se opera con etanol será:

$$P_s = \frac{((14 \cdot 53,4) - 53,4) \cdot 14,7}{\frac{2500}{6}} - 14,7 = 9,8 \text{ psi}$$

Con estos datos se procede a la selección del turbocompresor que más se ajuste a los requisitos que se han determinado, con todas las opciones de turbocompresores comerciales que se tiene.

G. DESARROLLO Y USO DEL SOFTWARE ESPECÍFICO DE SELECCIÓN DEL TURBO.

Si la selección del turbo se hace a mano usando ecuaciones es un proceso largo, existen más de 50 opciones de turbocompresores, por ello es recomendable hacer uso del software, desarrollado en este proyecto, para determinar el turbocompresor y posterior a ello hacer los cálculos teóricos con el turbo seleccionado para corroborar.

El software se desarrollo bajo la plataforma de Excel, el cual calcula, a partir de las especificaciones del motor ingresadas por el usuario y una base de datos de los caudales corregidos máximos y mínimos de los turbos comerciales, el régimen mínimo al cual el turbo puede dar carga y el máximo al cual puede sostener la presión de sobrealimentación seguramente. Las formulas usadas son las mismas que se utilizan para comprobar los resultados del software, que más adelante se muestran en este artículo.



Figura 5. Datos ingresados para gasolina en el software de selección de turbocompresores.

Los datos de los caudales corregidos, máximos y mínimos se tomaron de las curvas de cada turbocompresor que se obtienen de las paginas oficiales [7][8]. El procedimiento consiste en llenar los datos solicitados por el software en la primera pestaña, en la columna izquierda y con los resultados obtenidos llenar los datos solicitados en la columna central. Los datos ingresados para la aplicación a gasolina se muestran en las figuras 5.

Con esta información el software calcula los regímenes mínimos y máximos, para cada relación de presión de trabajo del turbocompresor y los muestra en la tabla de la segunda pestaña (figura 6), donde está el listado de los turbos comerciales y sus correspondientes valores, resaltando las opciones que están en el límite máximo permisible y se debe valorar de estos cual carga al menor régimen posible.

Los resultados obtenidos en la tabla de selección se muestran en la figura 6.

Figura 6. Resultados obtenidos para etanol y gasolina en el software de selección de turbocompresores.

Como lo muestra la gráfica anterior, se tienen tres opciones de turbocompresores que se adaptan perfectamente a las dos condiciones de operación (gasolina Rp=1,8 y etanol Rp=2; donde Rp=Ps/Patm). De éstas tres, la opción 3 es la que permite obtener presión de sobrealimentación desde el régimen de giro más bajo del motor. Por lo anterior el turbo que mejor se adapta para la aplicación de este proyecto es el turbo GT 2860RS (figura 7).



Figura 7. Turbo Garrett GT2860RS.

Para comprobar los resultados obtenidos se hacen los cálculos para este turbocompresor [5]:

- Para gasolina: obteniendo los caudales para un Rp=1,8 (figura 8 izq).

$$\dot{M}_{motor1} = \frac{\dot{M}_{corr}}{k} = \frac{10 \text{ lb/min}}{0,87} = 11,5 \text{ lb/min}$$

$$\dot{M}_{motor2} = \frac{\dot{M}_{corr}}{k} = \frac{34 \text{ lb/min}}{0,87} = 39 \text{ lb/min}$$

$$N_1 = \frac{944\,798 \dot{M}_{motor}}{C R_p \eta_v} = \frac{944\,798 \cdot 11,5}{2\,500 \cdot 1,8 \cdot 1,06} = 2\,275 \text{ rpm}$$

$$N_2 = \frac{944\,798 \dot{M}_{motor}}{C R_p \eta_v} = \frac{944\,798 \cdot 39}{2\,500 \cdot 1,8 \cdot 1,06} = 7\,740 \text{ rpm}$$

$$N_{2\text{corregido}} = 7\,740 \cdot 0,8 = 6\,190 \text{ rpm}$$

- Para etanol: obteniendo los caudales para un Rp=2 (figura 8 der).

$$\dot{M}_{motor1} = \frac{\dot{M}_{corr}}{k} = \frac{11 \text{ lb/min}}{0,87} = 12,6 \text{ lb/min}$$

$$\dot{M}_{motor2} = \frac{\dot{M}_{corr}}{k} = \frac{36 \text{ lb/min}}{0,87} = 41,4 \text{ lb/min}$$

$$N_1 = \frac{944\,798 \dot{M}_{motor}}{C R_p \eta_v} = \frac{944\,798 \cdot 12,6}{2\,500 \cdot 2,0 \cdot 1,06} = 2\,255 \text{ rpm}$$

$$N_2 = \frac{944\,798 \dot{M}_{motor}}{C R_p \eta_v} = \frac{944\,798 \cdot 41,4}{2\,500 \cdot 2,0 \cdot 1,06} = 7\,375 \text{ rpm}$$

$$N_{2\text{corregido}} = 7\,375 \cdot 0,8 = 5\,900 \text{ rpm}$$

Donde: \dot{M}_{motor} : Flujo máscico de aire que ingresa al motor en lb/min

\dot{M}_{corr} : Flujo máscico obtenido del mapa del turbocompresor (figura 8).

K: constante de conversión

N: régimen de giro del motor (rpm)

N_{corregido}: régimen de giro máximo con factor de seguridad.

Los cálculos confirman los datos obtenidos por el software, y nos indican que el turbocompresor GARRETT 2860RS instalado en el motor M20-B25 al operar con gasolina o etanol, podrá tener presión de sobrealimentación o carga a partir de las 2 275 rpm y se podrá mantener de forma segura hasta las 6 190 rpm. La carga dependerá de la configuración de la turbina.

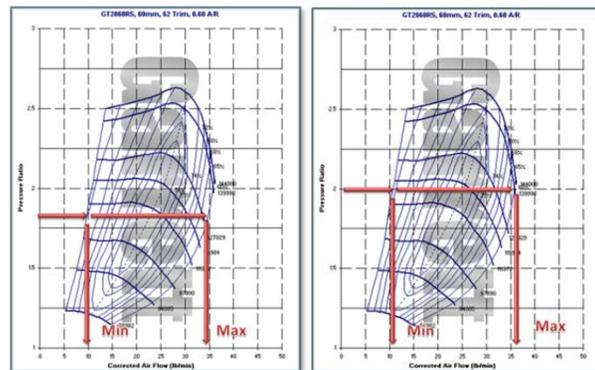


Figura 8. Caudales obtenidos a Rp=1,8 y Rp=2 en turbo GT2860RS.

Es posible determinar aproximadamente la potencia que se va a obtener con la aplicación seleccionada haciendo uso del BSFC (Brake Specific Fuel Consumption) que para motores comerciales a gasolina es [2]:

$$BSFC = 0,5 - 0,6 \frac{lb}{hp \cdot hr} \quad (6)$$

Para determinar la potencia se usa la siguiente fórmula:

$$W = \frac{\dot{M}_m \cdot 60}{R_{A-C} \cdot BSFC} \quad (7)$$

donde: W = Potencia neta a la volante del motor [hp]

\dot{M}_m = caudal de aire del motor [lb/min]

R_{a-c} = Relación aire combustible (gasolina=14,7)

Para determinar el caudal de aire que ingresa al motor se usa la siguiente fórmula:

$$\dot{M}_{mturbo} = \frac{C R_p \eta_v N}{944\,798} \quad (8)$$

$$\dot{M}_{matm} = \frac{C \eta_v N}{767\,728} \quad (9)$$

donde: \dot{M}_{mt} : Caudal de aire del motor sobrealimentado

\dot{M}_{matm} : Caudal de aire del motor atmosférico

C : Cilindrada del motor [cm^3]

η_v : Rendimiento volumétrico.

Con lo anterior se calcula la potencia teórica del motor usado en el proyecto en condiciones originales con rendimiento volumétrico de 1,06 y con la implementación del turbocompresor:

$$\dot{M}_{matm} = 20,7 \text{ lb/min}$$

$$\dot{M}_{mturbo} = 30,3 \text{ lb/min}$$

$$HP_{atm} = 154 \text{ hp}$$

$$HP_{turbo} = 225 \text{ hp}$$

Con lo anterior se puede esperar una ganancia en potencia de aproximadamente 46%. Las potencias calculadas son mayores a las que se pueden medir directamente en un dinamómetro porque no se tienen en cuenta pérdidas por transmisión y condiciones atmosféricas. La ganancia de potencia podría ser mayor si se tiene en cuenta el aumento de la eficiencia del motor con el uso de un turbocompresor.

H. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en la potencia y la temperatura de gases de escape con la implementación del turbocompresor se muestran en las figuras 9 y 10.

La figura 9 muestra cómo evoluciona la potencia y la presión en el múltiple de admisión en el rango del régimen de giro de funcionamiento del motor, con el motor en condiciones originales (atmosférico) y posterior a la implementación del turbocompresor (turboalimentado). Se puede apreciar las ganancias en la potencia en la medida que el turbocompresor entrega carga (presión positiva de admisión) y en los regímenes bajos donde el turbo no logra

aportar carga significativa, según lo estipulado en los cálculos, la respuesta del motor es similar en los dos casos.

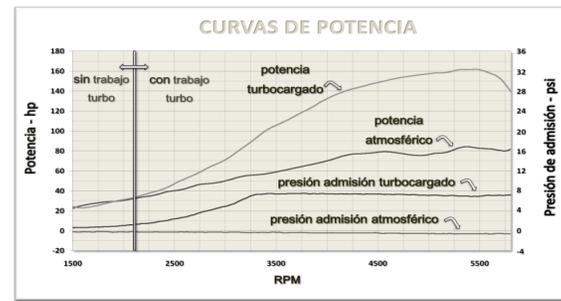


Figura 9. Curvas de potencia y presión de admisión.

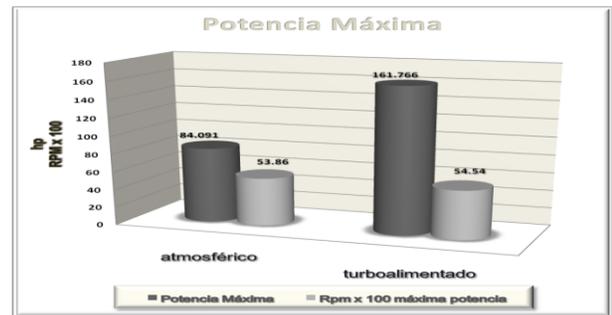


Figura 10. Potencia máxima.

La figura 10 muestra los resultados de la potencia máxima y el régimen de giro al cual se obtiene. Se aprecia una ganancia del 92% de la potencia con la implementación del turbocompresor, por encima de lo esperado, mientras que el régimen de giro de máxima potencia se mantiene, de manera que se comprueba la selección adecuada del turbocompresor para esta aplicación.

III. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que el turbocompresor seleccionado a través del software desarrollado y se sustentó dicha selección con el análisis teórico mostrado, y luego se instaló en un vehículo BMW 325i del año 1990 y se le realizaron diferentes pruebas, se puede concluir que:

- El comportamiento obtenido con la implementación del turbocompresor estuvo acorde a lo previsto en los cálculos elaborados para la selección del turbocompresor.
- Se observó que el turbocompresor se comportó según lo indicado en la teoría, lo que demuestra la confiabilidad de seguir los procedimientos descritos en este documento para la implementación de un turbocompresor en un motor atmosférico.
- Se obtuvo un aumento considerable en la potencia del motor con la implementación del turbocompresor, demostrando que es un procedimiento viable para obtener mayores prestaciones de un motor atmosférico.

REFERENCIAS

- [1]. REVISTA ECOGAS, revista especializada del GNV, N° 24, abril del 2005, 7 p.
- [2]. PELLEGRINI, Humberto; Notas de clase: Preparación de motores atmosféricos y sobrealimentados; La plata, Buenos Aires Argentina; 2006.
- [3]. GILLIERI, Stefano, Preparación de Motores de Serie Para Competición; ESPAÑA: EDICIONES CEAC, 1994.
- [4]. CASTRO, Miguel de; Trucaje De Motores De 4 Tiempos; ESPAÑA: EDICIONES CEAC, 1963.
- [5]. GAVIRIA, Luis Guillermo; Diseño, construcción y prueba de sistema flexfuel (E85) de alta eficiencia con turbocompresor implementado en un vehículo con motor de aspiración atmosférica; Pereira, Colombia: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2010.
- [6]. PELLEGRINI RACING:
<http://www.pellegriniracing.com.ar>
<http://www.pellegriniracing.com.ar/tecnica.htm>
- [7]. Turbos GARRETT®:
<http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/products/turbochargers.html>
- [8]. Turbos TURBONETICS®:
<http://www.turboneticsinc.com/content/compressor-maps>
- [9]. ROMERO, Carlos Alberto. Fundamentos de Inyección Electrónica. Universidad Tecnológica de Pereira.
- [10]. NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). Computer Simulation of the Turbo-charged Turbo-compounded Diesel Engine System: A Description of the Thermodynamic and Heat Transfer Models.