



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

### **“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE UN TURBO GENERADOR EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE 4 CILINDROS A GASOLINA”**

**CAZORLA BASTIDAS FRANCISCO MIGUEL  
CHIMBORAZO CHIMBORAZO SEGUNDO FELIPE**

## **TESIS DE GRADO**

**Previa a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2015**

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DE TESIS**

---

2014-07-10

Yo recomiendo que la Tesis preparada por:

**CAZORLA BASTIDAS FRANCISCO MIGUEL**  
**CHIMBORAZO CHIMBORAZO SEGUNDO FELIPE**

Titulada:

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE  
LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE UN TURBO GENERADOR EN UN  
MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE 4 CILINDROS A GASOLINA”**

Sea aceptado como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

---

Ing. Marco Santillán Gallegos  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

---

Ing. Luis Buenaño  
**DIRECTOR DE TESIS**

---

Ing. Bolívar Cuaical  
**ASESOR DE TESIS**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CAZORLA BASTIDAS FRANCISCO MIGUEL

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE UN TURBO GENERADOR EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE 4 CILINDROS A GASOLINA”

**Fecha de Examinación:** 2015-10-29

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| <b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>                           | <b>APRUEBA</b> | <b>NO<br/>APRUEBA</b> | <b>FIRMA</b> |
|--|----------------|-----------------------|--------------|
| Dr. Mario Audelo G.<br><b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b> |                |                       |              |
| Ing. Luis Buenaño<br><b>DIRECTOR DE TESIS</b>          |                |                       |              |
| Ing. Bolívar Cuaical<br><b>ASESOR DE TESIS</b>         |                |                       |              |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Dr. Mario Audelo G.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**CERTIFICADO DE EXAMINACIÓN DE TESIS**

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** CHIMBORAZO CHIMBORAZO SEGUNDO  
FELIPE

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE UN TURBO GENERADOR EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE 4 CILINDROS A GASOLINA”

**Fecha de Examinación:** 2015-10-29

**RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:**

| <b>COMITÉ DE EXAMINACIÓN</b>                           | <b>APRUEBA</b> | <b>NO<br/>APRUEBA</b> | <b>FIRMA</b> |
|--|----------------|-----------------------|--------------|
| Dr. Mario Audelo G.<br><b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b> |                |                       |              |
| Ing. Luis Buenaño<br><b>DIRECTOR DE TESIS</b>          |                |                       |              |
| Ing. Bolívar Cuaical<br><b>ASESOR DE TESIS</b>         |                |                       |              |

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Dr. Mario Audelo G.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación y/o adaptación tecnológica establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teóricos-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

**Cazorla Bastidas Francisco Miguel**

**Chimborazo Chimborazo Segundo Felipe**

## **DEDICATORIA**

Mi tesis la dedico con todo mi cariño a mi madre Orfita, por su tiempo, sacrificio y esfuerzo, por brindarme la confianza para creer en mi capacidad y compromiso.

A mí querido padre Jacinto Cazorla, quien pese a su muerte, siempre ha sido un gran ejemplo e inspiración para afrontar lo difícil de una nueva vida.

A mi hermana Alba Silva, por su constante preocupación en mi consolidación como persona útil a la familia y la sociedad.

No me puedo olvidar de una persona especial Andrew Vázquez, mi gran amigo de confianza, quien supo apoyarme para así llegar a conseguir el objetivo de la profesión.

**Francisco Miguel Cazorla Bastidas**

Esta tesis se la dedico con todo mi cariño a mi dios quien supo guiarme por el buen camino, darme fuerzas para seguir adelante y permitirme el haber llegado hasta el momento tan importante de mi formación profesional.

A mis queridas Narcisa y Paulina mis dos amores, porque me han brindado su apoyo incondicional, por ser mi fuente de inspiración para mejorar día a día y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

A mis padres, Felipe y María Luz; por su apoyo, consejo, comprensión, amor, sacrificio y esfuerzo, por ayudarme con los recursos necesarios para culminar mi carrera profesional y por darme la confianza para creer en mi capacidad.

A mis hermanos, por estar siempre pendientes, por compartir momentos significativos conmigo y sobre todo por ser un excelente ejemplo a seguir.

**Segundo Felipe Chimborazo Chimborazo**

## **AGRADECIMIENTO**

Primero agradezco a Dios por darme la fuerza necesaria para seguir adelante en los momentos que más necesitaba y por brindarme salud en el trayecto de mi vida.

Deseo expresar mi agradecimiento eterno, con mi madre, por el pilar en el que me he sustentado, en los últimos años.

También deseo agradecer de forma muy especial a Jacinto Cazorla, mi padre, quien fue la primera persona que me enseñó valores de vida, de honestidad, respeto, cordialidad; gracias por hacerme sentir muy orgulloso y hacerte quedar bien en cualquier situación.

**Francisco Miguel Cazorla Bastidas**

En primer doy infinitamente gracias a Dios por haberme dado fuerza y valor para culminar esta etapa de mi vida.

Agradezco también la confianza y el apoyo brindado por parte de mis padres, que sin duda alguna en la trayectoria de mi vida me ha demostrado tanto amor y sé que están orgullosos de la persona en la cual me he convertido.

A mi esposa Narcisa, por ser una parte muy importante de mi vida por el apoyo recibido desde el día que la conocí y por siempre buscarme la manera de tener en buenas.

**Segundo Felipe Chimborazo Chimborazo**

## CONTENIDO

|   | Pág. |
|---|------|
| <b>1. INTRODUCCIÓN</b>  |      |
| 1.1 Antecedentes.....   | 1    |
| 1.2 Justificación.....  | 1    |
| 1.3 Objetivos.....  | 2    |
| 1.3.1 <i>Objetivo general</i> .....   | 2    |
| 1.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....  | 2    |
| <b>2. INYECCIÓN ELECTRÓNICA A GASOLINA</b>                                      |      |
| 2.1 Introducción.....   | 3    |
| 2.1.1 <i>Función del Sistema de Inyección Electrónica</i> .....                 | 3    |
| 2.1.2 <i>Ventajas. Dentro de las más importantes se tiene:</i> .....            | 3    |
| 2.1.3 <i>Elementos</i> .....  | 4    |
| 2.2 Sistema de recuperación de Energía.....                                     | 5    |
| 2.2.1 <i>Sobrealimentación</i> .....  | 6    |
| 2.2.2 <i>KERS</i> .....   | 6    |
| 2.2.3 <i>MGU-H</i> .....  | 8    |
| 2.3 Generador de Energía Eléctrica.....   | 9    |
| 2.3.1 <i>Principio de Funcionamiento</i> .....                                  | 9    |
| 2.3.2 <i>Tipos de generadores</i> .....   | 10   |
| 2.3.3 <i>Ventajas de un Alternador respecto a una Dínamo</i> .....              | 12   |
| 2.4 Unidad de Control de Voltaje.....   | 13   |
| 2.4.1 <i>Tipos</i> .....  | 13   |
| 2.5 Sobrealimentación.....  | 14   |
| 2.5.1 <i>Compresor Volumétrico</i> .....  | 15   |
| 2.5.2 <i>Turbocompresor</i> .....   | 16   |
| 2.5.3 <i>Compresor</i> .....  | 17   |
| 2.5.4 <i>Ventajas y Desventajas del Turbocompresor</i> .....                    | 18   |
| 2.5.5 <i>Intercooler</i> .....  | 19   |
| 2.6 Unidad de Control Programable.....  | 20   |
| 2.6.1 <i>MegaSquirt</i> .....   | 20   |
| <b>3. ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA</b> |      |
| 3.1 Análisis del estado del Motor de Combustión Interna.....                    | 22   |
| 3.1.1 <i>Estado del sistema de alimentación</i> .....                           | 23   |
| 3.1.2 <i>Estado del sistema de refrigeración</i> .....                          | 23   |
| 3.1.3 <i>Estado del sistema de lubricación</i> .....                            | 24   |
| 3.1.4 <i>Estado del sistema de distribución</i> .....                           | 24   |
| 3.1.5 <i>Estado del sistema eléctrico-electrónico</i> .....                     | 24   |
| 3.2 Selección de elementos para la repotenciación del banco de pruebas.....     | 25   |
| 3.2.1 <i>Sensor CKP</i> .....   | 25   |
| 3.2.2 <i>Sensor de Oxígeno (EGO)</i> .....                                      | 26   |
| 3.2.3 <i>Válvula de Control de aire en Ralentí (IAC)</i> .....                  | 26   |
| 3.2.4 <i>Filtro de Aire</i> .....   | 27   |
| 3.2.5 <i>Batería</i> .....  | 27   |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| 3.2.6     | <i>ECU</i> .....   | 28 |
| <b>4.</b> | <b>DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA</b>   |    |
| 4.1       | Selección del Turbocompresor .....   | 29 |
| 4.1.1     | <i>Cálculos para la selección del turbo para el motor Chevrolet Swift 1,6 l a Gasolina</i> ..... | 29 |
| 4.1.2     | <i>Análisis del rendimiento de un turbocompresor de acuerdo al mapa</i> .....                    | 35 |
| 4.1.3     | <i>Turbocompresor seleccionado</i> .. .....  | 36 |
| 4.2       | Diseño del Múltiple de Escape .....  | 38 |
| 4.2.1     | <i>Diseño del Múltiple de Escape en SolidWorks</i> .....   | 39 |
| 4.2.2     | <i>Simulación de Flujo de Aire del Múltiple de Escape</i> .. .....                               | 40 |
| 4.3       | Diseño del Generador .....   | 43 |
| 4.3.1     | <i>Pruebas con Motores/Generadores</i> .....   | 43 |
| 4.3.2     | <i>Diseño del Generador basado en el dínamo</i> .....  | 45 |
| 4.4       | Cálculos en el sistema turbo generador .....   | 48 |
| 4.4.1     | <i>Cálculos del generador</i> .....  | 48 |
| 4.4.2     | <i>Cálculos del Turbocompresor</i> .....   | 51 |
| 4.4.3     | <i>Esfuerzo de torsión en el turbocompresor</i> .....  | 53 |
| 4.5       | Diseño de la Unidad de Control de Voltaje.....   | 54 |
| <b>5.</b> | <b>IMPLEMENTACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PARTES</b>   |    |
| 5.1       | Construcción del Múltiple de Escape.....   | 57 |
| 5.1.1     | <i>Platina de Acople</i> .....   | 57 |
| 5.1.2     | <i>Caños Principales del Múltiple</i> .....  | 57 |
| 5.1.3     | <i>Caño Secundario del Múltiple</i> .....  | 58 |
| 5.2       | Ensamblaje del sistema de sobrealimentación.....   | 58 |
| 5.3       | Instalación del sistema de lubricación y refrigeración del turbocompresor.....                   | 59 |
| 5.4       | Construcción del Generador .....   | 60 |
| 5.4.1     | <i>Eje</i> .....   | 60 |
| 5.4.2     | <i>Carcasas</i> .....  | 60 |
| 5.5       | Construcción de la Unidad de Control de Tensión.....   | 61 |
| 5.6       | Ensamblaje del generador al turbocompresor en el motor de combustión interna (MCI).....          | 62 |
| 5.7       | Verificación del motor con LE3-Jetronic.....   | 62 |
| 5.8       | Instalación de MegaSquirt II.....  | 62 |
| 5.8.1     | <i>Asignación de Parámetros Primarios a la ECU</i> .....   | 64 |
| 5.8.2     | <i>Modificación de los parámetros de inyección de la ECU</i> .....                               | 65 |
| 5.8.3     | <i>Programaciones de Funcionamiento</i> .....  | 66 |
| 5.8.3.1   | <i>Sistema de Sobrealimentación</i> .....  | 66 |
| 5.8.3.2   | <i>Sistema de Recuperación de Energía</i> .....  | 66 |
| 5.9       | Instalación de la unidad de control de tensión.....  | 67 |
| <b>6.</b> | <b>PRUEBAS EN EL BANCO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA</b>                                |    |
| 6.1       | Plan de Pruebas.....   | 69 |
| 6.1.1     | <i>Pruebas electrónicas del sistema de inyección</i> .....                                       | 69 |
| 6.1.2     | <i>Pruebas en el sistema de sobrealimentación</i> .....  | 71 |
| 6.1.3     | <i>Pruebas en el sistema de recuperación de energía</i> .....                                    | 71 |
| 6.1.4     | <i>Carga de la batería mediante el Turbo generador</i> .....                                     | 72 |
| 6.2       | Elaboración del manual de usuario.....   | 73 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 6.3       | Manual de mantenimiento del banco de pruebas..... | 73 |
| 6.4       | Guía de prácticas del banco de pruebas.....       | 73 |
| 6.4.1     | <i>Recomendaciones generales:</i> .....           | 73 |
| <b>7.</b> | <b>COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN</b>                |    |
| 7.1       | Detalle de costos directos .....                  | 75 |
| 7.2       | Detalle de costos indirectos .....                | 76 |
| 7.3       | Costos totales .....                              | 76 |
| <b>8.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>             |    |
| 8.1       | Conclusiones.....                                 | 77 |
| 8.2       | Recomendaciones .....                             | 77 |

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## LISTA DE TABLAS

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Características de la batería seleccionada .....       | 27 |
| 2  | Elementos del motor analizados .....                   | 28 |
| 3  | Características del motor Chevrolet Swift .....        | 29 |
| 4  | Turbocompresor IHI .....                               | 37 |
| 5  | Turbocompresor Garrett.....                            | 37 |
| 6  | Dimensiones de construcción.....                       | 38 |
| 7  | Rodamientos seleccionados .....                        | 47 |
| 8  | Elementos de la Sobrealimentación .....                | 59 |
| 9  | Pruebas en el sistema de Sobrealimentación.....        | 71 |
| 10 | Pruebas en el sistema de recuperación de energía ..... | 72 |
| 11 | Costos del sistema mecánico.....                       | 75 |
| 12 | Costos del sistema eléctrico .....                     | 76 |
| 13 | Costos indirectos .....                                | 76 |
| 14 | Costos totales .....                                   | 76 |

## LISTA DE FIGURAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Elementos de funcionamiento de la Inyección Electrónica .....         | 4  |
| 2  | Funcionamiento del sistema KERS eléctrico.....                        | 7  |
| 3  | KERS mecánico .....   | 7  |
| 4  | KERS hidráulico .....   | 8  |
| 5  | Unidad MGU-H de Ferrari .....   | 8  |
| 6  | Representación del experimento realizado por Faraday .....            | 9  |
| 7  | Modelización del funcionamiento de un alternador .....                | 10 |
| 8  | Despiece de un Puente Rectificador .....                              | 11 |
| 9  | Regulador Electromecánico .....                                       | 13 |
| 10 | Regulador de tensión del Alternador .....                             | 14 |
| 11 | Compresor Roots .....   | 15 |
| 12 | Esquema de Turbocompresor .....                                       | 16 |
| 13 | Tipos de Turbocompresores.....  | 17 |
| 14 | Comprex.....  | 18 |
| 15 | Intercooler.....  | 19 |
| 16 | ECU Programable MegaSquirt. ....                                      | 20 |
| 17 | Banco de Pruebas Motor a Gasolina 4 Cilindros con EFI .....           | 22 |
| 18 | Elementos Faltantes .....   | 23 |
| 19 | Radiador del motor .....  | 23 |
| 20 | Bayoneta medidora de aceite .....                                     | 24 |
| 21 | Polea de Distribución.....  | 24 |
| 22 | Tablero Electrónico de Control.....                                   | 25 |
| 23 | Sensor Inductivo CKP .....  | 25 |
| 24 | Sensor Calentado de Oxígeno (EGO).....                                | 26 |
| 25 | Actuador de Ralentí (IAC).....  | 26 |
| 26 | Filtro de Aire.....   | 27 |
| 27 | Batería.....  | 27 |
| 28 | ECU MegaSquirt II.....  | 28 |
| 29 | Mapa de un turbocompresor .....                                       | 36 |
| 30 | Mapa del turbocompresor seleccionado .....                            | 36 |
| 31 | Turbocompresor seleccionado .....                                     | 37 |
| 32 | Dimensiones del turbocompresor seleccionado.....                      | 38 |
| 33 | Diseño de la Platina de Acople .....                                  | 39 |
| 34 | Diseño de los caños de escape .....                                   | 39 |
| 35 | Diseño del caño secundario .....                                      | 40 |
| 36 | Ensamble del Múltiple .....   | 40 |
| 37 | Simulación en SolidWorks .....  | 41 |
| 38 | Simulación en SolidWorks de Flujo .....                               | 42 |
| 39 | Simulación en Ansys de la temperatura de los caños del múltiple ..... | 43 |
| 40 | Prueba con motor de Ventilador .....                                  | 44 |
| 41 | Sistema de carga de motocicleta.....                                  | 44 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 42 | Prueba con el sistema de carga de motocicleta.....      | 45 |
| 43 | Estator .....   | 46 |
| 44 | Rotor del Generador.....                                | 46 |
| 45 | Eje del Generador .....                                 | 46 |
| 46 | Carcasa Primaria .....                                  | 47 |
| 47 | Carcasa Secundaria .....                                | 48 |
| 48 | Generador Ensamblado.....                               | 48 |
| 49 | Diagrama de la Fuente con LM 317 T.....                 | 55 |
| 50 | Valores de los elementos de la Fuente con LM 317 T..... | 56 |
| 51 | Platina de Acople .....                                 | 57 |
| 52 | Construcción de los Caños Principales .....             | 57 |
| 53 | Construcción del Caño Secundario.....                   | 58 |
| 54 | Soldadora MIG .....                                     | 58 |
| 55 | Instalación del sistema de sobrealimentación.....       | 59 |
| 56 | Lubricación y Refrigeración del turbocompresor.....     | 59 |
| 57 | Mecanizado del Eje.....                                 | 60 |
| 58 | Carcasa primaria de Nylon y Aluminio .....              | 60 |
| 59 | Carcasa Secundaria en Nylon y aluminio .....            | 61 |
| 60 | Ensamblaje de las Carcasas .....                        | 61 |
| 61 | Unidad de Tensión .....                                 | 61 |
| 62 | Ensamble del generador al turbocompresor.....           | 62 |
| 63 | MegaSquirt II V3.0.....                                 | 63 |
| 64 | Instalación de MegaSquirt II V3.0.....                  | 63 |
| 65 | Instalación del arnés de la MegaSquirt II .....         | 64 |
| 66 | Conexión de MegaSquirt II.....                          | 64 |
| 67 | Inicio de Megatune 2.25 .....                           | 64 |
| 68 | Parámetros iniciales de programación .....              | 65 |
| 69 | Mapa de Start-Up Idle.....                              | 65 |
| 70 | Avance al Encendido .....                               | 66 |
| 71 | Límite de revoluciones a 6500 RPM .....                 | 66 |
| 72 | Límite de revoluciones a 3500 RPM .....                 | 67 |
| 73 | Instalación del regulador de tensión .....              | 67 |
| 74 | Regulador de tensión .....                              | 68 |
| 75 | Pantalla de Megatune en KOEO.....                       | 70 |
| 76 | Pantalla de Megatune en KOER .....                      | 70 |
| 77 | Prueba de Sobrealimentación.....                        | 71 |
| 78 | Prueba de recuperación de energía .....                 | 71 |
| 79 | Mediciones de revoluciones del turbogenerador .....     | 72 |
| 80 | Batería usada para la recuperación de energía.....      | 72 |
| 81 | Prueba de Alimentación al Equipo de Audio.....          | 73 |

## LISTA DE ABREVIACIONES

|       |  |
|-------|--|
| AC    | Altern Current                             |
| AISI  | American Iron and Steel Institute          |
| ASTM  | American Society for Testing and Materials |
| CMP   | Camshaft Position Sensor                   |
| CKP   | Crankshaft Position Sensor                 |
| CFM   | Cubic Feet per Minute                      |
| DB    | Data Bus                                   |
| DC    | Direct Current                             |
| DIS   | Direct Ignition System                     |
| ECU   | Engine Control Unit                        |
| ECT   | Engine Coolant Temperature                 |
| EFI   | Electronic Fuel Injection                  |
| EGR   | Exhaust Gas Recirculation                  |
| EVAP  | Evaporative Emission                       |
| GND   | Ground                                     |
| HP    | Horse Power                                |
| IAC   | Idle Air Control                           |
| IAT   | Intake Air Temperature                     |
| IGN   | Ignition                                   |
| KERS  | Kinetics Energy Recovery System            |
| KOEO  | Key On Engine Off                          |
| KOER  | Key On Engine Running                      |
| KS    | Knocking Sensor                            |
| LCD   | Liquid Crystal Display                     |
| MAP   | Manifold Absolute Pressure                 |
| MGU-H | Motor Generator Unit – Heat                |
| MIG   | Metal Inert Gas                            |
| MS II | Mega Squirt II                             |
| OHC   | Over Head Camshaft                         |
| PMS   | Punto Muerto Superior                      |
| RPM   | Revoluciones Por Minuto                    |
| PWM   | Pulso de Ancho Modulado                    |
| SAE   | Society of American Engineers              |
| SGN   | Signal                                     |
| TPS   | Throttle Position Sensor                   |
| VCC   | Voltaje de Corriente Directa               |
| VGT   | Variable Geometry Turbocharger             |
| WOT   | Wide Open Throttle                         |

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** Tabla de conversión de Unidades
- B** Variación de temperatura, presión y densidad del aire s.n.m.
- C** Mediciones de sensores y actuadores
- D** Manual de usuario del banco de recuperación de energía
- E** Guía de prácticas.
- F** Plan de mantenimiento del banco de pruebas con un sistema turbogenerador en el motor Chevrolet Swift 1,6 L

## RESUMEN

El desarrollo de un sistema de recuperación de energía implementado en el motor Chevrolet Swift, por medio de un dispositivo turbogenerador, tiene como fundamental finalidad aprovechar la energía térmica desprendida por el motor, para a través de una debida conversión de energía, ser capaz de producir energía eléctrica que se pueda almacenar en un acumulador.

El diagnóstico técnico del motor determinó la carencia de partes importantes que debieron ser sustituidas para el funcionamiento del banco de pruebas.

Luego de ser completadas las partes faltantes se realizó un estudio de selección, diseño y simulación de las partes críticas que incorporan cada uno de los sistemas modificados del mismo. El sistema de sobrealimentación está compuesto por un turbocompresor, intercooler, conductos de aire y cañerías de lubricación interna del turbocompresor.

El sistema de recuperación de energía está conformado de las siguientes partes. Un turbocompresor de geometría fija, responsable de sobrealimentar el motor, un generador eléctrico capaz de convertir la energía mecánica del turbocompresor en energía eléctrica, una unidad de control de tensión responsable de rectificar la corriente generada y una unidad electrónica de control encargada de monitorear todo el comportamiento del motor de combustión interna.

Se ha demostrado que al acelerar progresivamente el motor, aumenta la carga de aire sometida por el turbocompresor, existiendo un mayor flujo de gases a la salida del colector de escape, de modo que se venza el efecto turbolag presente en el turbocargador; y convirtiendo la energía mecánica de rotación hacia el generador eléctrico excitándolo y produciendo electricidad.

## **ABSTRACT**

The development of an energy recovery system which was implemented on the Chevrolet Swift engine, by means of a turbo-generator has the purpose of making the most of the heat energy produced by the engine, for through a proper conversion of energy, be able to produce energy power which can be stored in an accumulator.

The technical diagnosis of the engine determined lack of important parts that must be replaced for the proper operation of the test bed.

After the missing parts were implemented a study selection, design and simulation of critical parts was developed which incorporates each of the modified systems. The supercharging system comprises a turbocharger, an intercooler, air ducts and pipes for internal lubrication of the turbocharger.

The energy-recovered consists of the following parts: a fixed geometry turbocharger, responsible for supercharging the engine, an electric generator to convert the mechanical energy from the turbocharger into power, a tension control unit responsible to rectify voltage generated and an electronic control unit which monitors all the behavior of the internal combustion engine.

It was demonstrated that speeding up the engine gradually it increases the air charge submitted by the turbocharger, having a greater flow of gas at the outlet of the exhaust manifold, so that the effect “turbolag” present in the turbocharger expires; and the mechanical energy of rotation is converted towards the electric generator producing electricity.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La Escuela de Ingeniería Automotriz perteneciente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, una de las que ha mostrado más alto crecimiento en los últimos años, goza de un gran prestigio dentro del país, debido a que es la encargada de formar profesionales competitivos, de alta calidad y conscientes de las necesidades actuales del campo automotriz de nuestro país. Por esta razón los profesionales formados en esta institución están en capacidad de satisfacer los requerimientos competentes al área en la que se desempeñan, siempre con un enfoque en el desarrollo de nuevas tecnologías y en la búsqueda de nuevas vías para el cuidado del medio ambiente.

El argumento de esta tesis tiene como propósito ser un instrumento de aporte científico e investigativo para la nueva generación de estudiantes, ya que brindará conocimientos relevantes y un alto grado de nivel académico.

Cada día se realizan investigaciones sobre nuevas tendencias que tiene como objetivo incrementar el rendimiento del motor, y a su vez reducir las emisiones contaminantes, así como también nuevos sistemas de recuperación de energía para incrementar la potencia y reducir el consumo como: Sistemas de freno regenerativo, turbocompresor híbrido (MGU-H), etc.

Mediante esta tesis los futuros profesionales de la Escuela de Ingeniería Automotriz, podrán aplicar esta modalidad de tecnologías y enfocarla hacia fines: medioambientales, eficientes e investigativos, entre otros.

### 1.2 Justificación

El desarrollo del presente tema de tesis tiene como finalidad realizar una investigación sobre la energía desaprovechada en los gases de escape desprendidos por el motor térmico debido a la combustión, de tal manera que esta energía sea reutilizada mediante

un mecanismo de recuperación de energía que permita obtener niveles de carga para algún sistema auxiliar y posteriormente analizar los distintos comportamientos del sistema en función de la carga del motor.

El dispositivo a ser implementado pretende ser un instrumento eficaz para el mejor aprovechamiento de la energía y su transformación.

La presente tesis cumple con los objetivos planteados, y constituye un recurso valioso para apoyar e incentivar la investigación de los estudiantes de Ingeniería Automotriz de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, debido a que el mundo actual globalizado demanda profesionales capaces de generar ciencia y conocimiento y con gran afinidad a la búsqueda de nuevas tecnologías para el aporte a la sociedad.

### **1.3 Objetivos**

**1.3.1** *Objetivo general.* Desarrollar un sistema de Recuperación de Energía de los gases de escape mediante un Turbo generador en un motor de combustión interna de 4 cilindros a gasolina.

#### **1.3.2** *Objetivos específicos:*

Investigar los métodos de la recuperación de energía a través de los gases de escape en un motor de combustión interna en función del estado actual del arte.

Evaluar el estado actual del motor de combustión interna para determinar las soluciones requeridas para su adecuado funcionamiento.

Diseñar el dispositivo de recuperación de energía y sobrealimentación del motor de combustión interna a gasolina.

Implementar el nuevo sistema de recuperación de energía y sobrealimentación.

Realizar las respectivas pruebas de carga eléctrica y sobrealimentación en el banco de pruebas.

## CAPÍTULO II

### 2. INYECCIÓN ELECTRÓNICA A GASOLINA

#### 2.1 Introducción.

Es un sistema de inyección de combustible que reemplaza al carburador, introducido comercialmente a finales del siglo pasado. Su introducción se debió al aumento de las exigencias de organismos de control del medio ambiente para disminuir las emisiones contaminantes. (GUTIÉRREZ, s.f)

Su importancia radica en la mejor capacidad respecto al carburador para hacer la dosificación del combustible y crear una mezcla homogénea, muy próxima a la estequiométrica (14,7:1), garantizando una buena combustión en el interior del cilindro, reduciendo los gases tóxicos.

**2.1.1** *Función del Sistema de Inyección Electrónica:* Su función es tomar aire del medio ambiente, medirlo e introducirlo al interior del cilindro, luego de acuerdo a esta medición, y conforme al régimen de funcionamiento del motor, inyectar la cantidad de combustible necesaria.

La dosificación se lleva a cabo por medio de una centralita electrónica, llamada ECU (Unidad de Control Electrónico), que recibe información en todo instante del estado del motor, por medio de sensores, estos convierten en señales electrónicas las magnitudes físicas medidas en el motor tales como: temperatura, carga, régimen, presión, etc. (HERNÁNDEZ, 2010)

**2.1.2** *Ventajas.* Dentro de las más importantes se tiene:

- Estos sistemas tienen incorporado un sistema de autodiagnóstico, que informa cuando hay una avería en el sistema.
- Debido a la electrónica de precisión se puede efectuar el corte de inyección para evitar que el motor se revolucione en exceso o desperdicie combustible.

- Respuesta inmediata de aceleración y desaceleración.
- La mezcla se envía uniformemente a cada cilindro, por lo cual el llenado es casi el mismo.
- No es necesario girar el motor cuando está frío, como ocurre en el sistema por carburador.
- El motor al ser controlado por la ECU, la cantidad de combustible inyectado es exacta, y por lo tanto un bajo nivel de emisiones contaminantes.

### 2.1.3 Elementos. Destacan los siguientes elementos:

- ECU
- Sensores
- Actuadores

Figura 1. Elementos de funcionamiento de la Inyección Electrónica



Fuente: <http://tecnocars.blogspot.com/>

**2.1.3.1 ECU.** Es la unidad de control electrónica del motor, constantemente supervisa la información de varios sensores y otras entradas, además controla los sistemas que afectan el desempeño del automotor y emisiones.

**2.1.3.2 Sensores.** Son todos los elementos captadores de magnitudes físicas o químicas y que las convierten en variables o señales eléctricas, que a su vez son comunicadas a la ECU. En un motor convencional dotado de Inyección Electrónica, se puede encontrar diversos sensores, tales como:

- MAF (Sensor de Masa de Flujo de Aire)
- MAP (Sensor de Presión Absoluta en el Múltiple de Admisión)
- IAT (Sensor de Temperatura de Admisión)
- CHT (Sensor de Temperatura de la Cabeza de Cilindros)
- TPS (Sensor de Posición del Acelerador)
- ECT (Sensor de Temperatura de Refrigerante)
- KS (Sensor de Detonación)
- CKP (Sensor de Posición y Velocidad del Cigüeñal)
- CMP (Sensor de Posición y Velocidad del Árbol de Levas)

**2.1.3.3 Actuadores.** Son todos los elementos que acatan las órdenes enviadas por la ECU y efectúan una función o corrección específica. En un motor se puede encontrar normalmente los siguientes:

- Inyectores
- Bobina de Encendido
- IAC (Válvula de Control de aire en Ralentí)
- EGR (Válvula de Recirculación de gases de escape)
- Electroventilador
- Bomba de Combustible
- EVAP (Sistema de emisiones)
- Regulador de Presión de Combustible

## **2.2 Sistema de recuperación de Energía.**

La recuperación de energía en un vehículo, puede estar presente en varios sistemas, debido a que todos estos experimentan desprendimiento de energía al estar en funcionamiento u operación. De acuerdo a varias investigaciones se pueden listar los siguientes:

- Sobrealimentación
- KERS (Recuperación de la Energía Cinética en Frenadas)
- MGU-H (Motor Generador Unit-Heat)

**2.2.1** *Sobrealimentación.* Consiste en aprovechar la energía mecánica y térmica de los gases de escape, al accionar una turbina unida coaxialmente a un compresor a través de un eje. Cuando los gases de escape salen de los cilindros, antes de ser liberados al exterior, pasan por esta turbina y los gases ejercen una fuerza sobre sus álabes, haciendo girar tanto más rápido, cuanto más energía tengan, mayor será el giro del conjunto turbina-compresor.

Esta energía mecánica de giro adquirida por la turbina es transmitida al compresor por medio del eje, este aspira aire del filtro y lo empuja aprovechando la fuerza centrífuga hacia el múltiple de admisión. De este modo se consigue elevar la presión para que entre al motor.

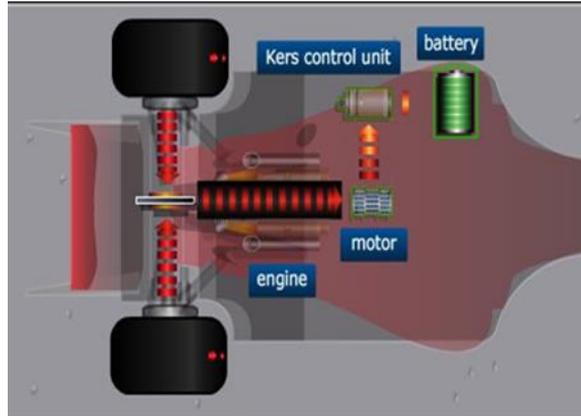
**2.2.2** *KERS.* También llamado freno regenerativo, es un sistema de recuperación de la energía cinética que está presente en el calor residual creado por el proceso de frenado del automóvil y que reduce la velocidad del vehículo, convirtiendo la energía cinética desprendida, en varios tipos de energía los cuales pueden ser: (DOMENECH, 2011)

- Eléctrica
- Mecánica
- Hidráulica

**2.2.2.1** *Eléctrica.* El dispositivo está conectado directamente a la transmisión por medio de un motor/generador que, en virtud del frenado impulsado por el eje de transmisión convierte la energía cinética en eléctrica a través de una Unidad de Control, esta corriente recarga las baterías de ion litio.

Fue implementada en la Fórmula 1 en el 2009, para obtener la energía que se disiparía en forma de calor durante las frenadas. Esta energía almacenada otorga una potencia extra de 80 HP durante 6,7 segundos de la fase de aceleración.

Figura 2. Funcionamiento del sistema KERS eléctrico

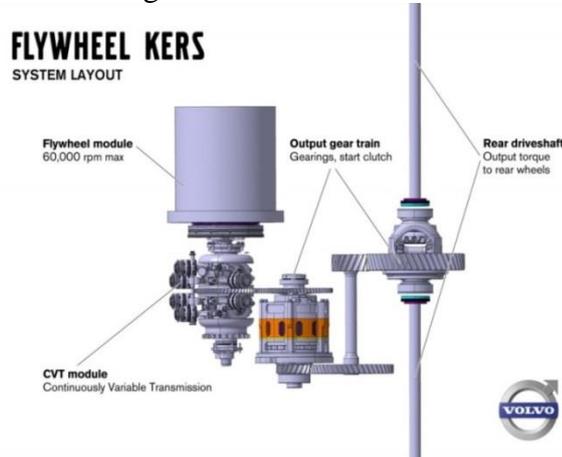


Fuente: <http://haciendofuturo.wordpress.com/2010/12/07/kers-y-los-frenos-regenerativos/>

**2.2.2.2 Mecánica.** La energía se usa para girar un pequeño volante de inercia que puede girar hasta 8 0000 RPM.

El volante está conectado a las ruedas posteriores del vehículo. La energía mecánica no cambia de estado y por lo tanto es más eficiente. Fue usada sólo por Williams.

Figura 3. KERS mecánico

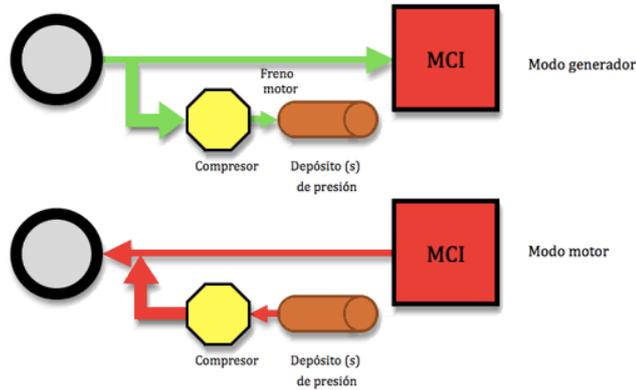


Fuente: <http://www.tecmovia.com/2013/03/19/torotrak-comercializara-sistemas-hibridos-basados-en-volantes-de-inercia-m-kers/>

**2.2.2.3 Hidráulica.** Se utiliza una bomba en lugar de un motor/generador y esta envía una presión hacia el acumulador, para luego posteriormente utilizar esa energía en las aceleraciones.

Mediante un compresor se utiliza esta energía para aumentar la potencia del motor en largadas.

Figura 4. KERS hidráulico



Fuente: <http://lacuevitaf1.blogspot.com/2011/01/f1-el-kers-en-2011-que-es-y-tipos-de.html>

**2.2.3 MGU-H.** Es el acrónimo de Motor Generator Unit-Heat (turbocompresor híbrido). Es un sistema moderno de recuperación de energía implementado en el 2014 en la Fórmula 1. El dispositivo es un motor/generador eléctrico acoplado entre la turbina y el compresor del turbocompresor, que cumple doble función: actúa como generador cuando el motor térmico trabaja a alto régimen, aprovechando la velocidad de los gases de escape, y como motor para aumentar la velocidad de giro del compresor en revoluciones bajas, aprovechando la energía eléctrica acumulada. El objetivo principal del MGU-H es actuar como motor para controlar la respuesta del turbo y eliminar el turbolag.

A simple vista no parece ser un sistema muy complejo y sofisticado, sin embargo existen complicaciones al momento de hacerlo funcionar todo a la vez. (DÍAZ OLMO, J.M., 2014)

Figura 5. Unidad MGU-H de Ferrari



Fuente: [www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2014/07/04/93751-explicando-el-ers-segunda-parte](http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2014/07/04/93751-explicando-el-ers-segunda-parte)

## 2.3 Generador de Energía Eléctrica

Es un dispositivo eléctrico que transforma la energía mecánica en energía eléctrica. Esto se consigue mediante a la interacción de los dos elementos principales que lo constituyen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática llamada estator. (COSTA, 2014)

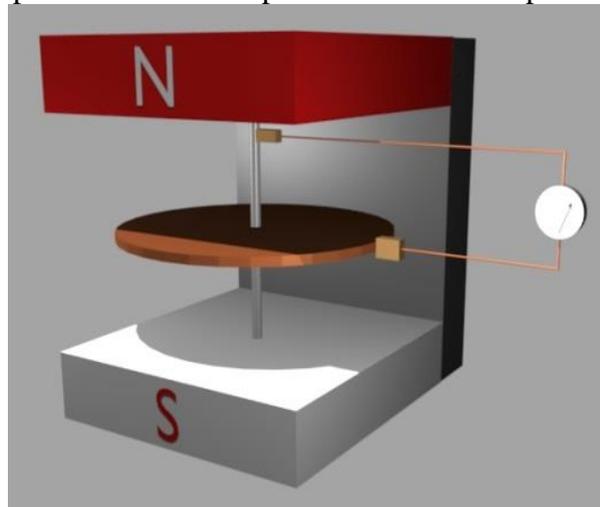
Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) de modo que el otro lo convierta en electricidad (actúa como inducido).

Los generadores eléctricos se diferencian según el tipo de corriente que producen. (COSTA, 2014)

**2.3.1 Principio de Funcionamiento.** Se basa en el fenómeno de inducción electromagnética o Ley de Faraday.

Esta ley dice que la tensión inducida en un circuito es directamente proporcional a la variación del flujo magnético en un conductor o espira. Esto quiere decir que al tener un campo magnético generando un flujo magnético, se necesita una espira por donde circule una corriente para conseguir que se genere la fuerza electromotriz (COSTA, 2014).

Figura 6. Representación del experimento realizado por Faraday



Fuente: [www.endesaeduca.com/Endesa\\_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores)

**2.3.2 Tipos de generadores.** Se encuentran dos grandes grupos de dispositivos eléctricos rotativos: los alternadores y las máquinas.

**2.3.2.1 Alternadores.** Son máquinas que transforman energía mecánica, que reciben por el rotor, en energía eléctrica de tipo alterna.

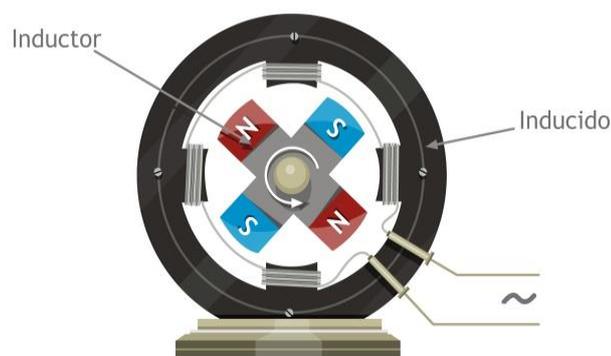
La mayoría de los alternadores son máquinas de corriente alterna síncrona, que son las que giran a la velocidad de sincronismo, está relacionada con el número de polos que tiene la máquina y la frecuencia de la fuerza electromotriz.

Esta relación hace que el motor gire a la misma velocidad que le impone el estator a través del campo magnético. Esta relación viene dada por la siguiente ecuación: (COSTA, 2014)

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Donde  $f$  es la frecuencia a la cual está conectada la máquina y  $P$  es el número de pares de polos.

Figura 7. Modelización del funcionamiento de un alternador

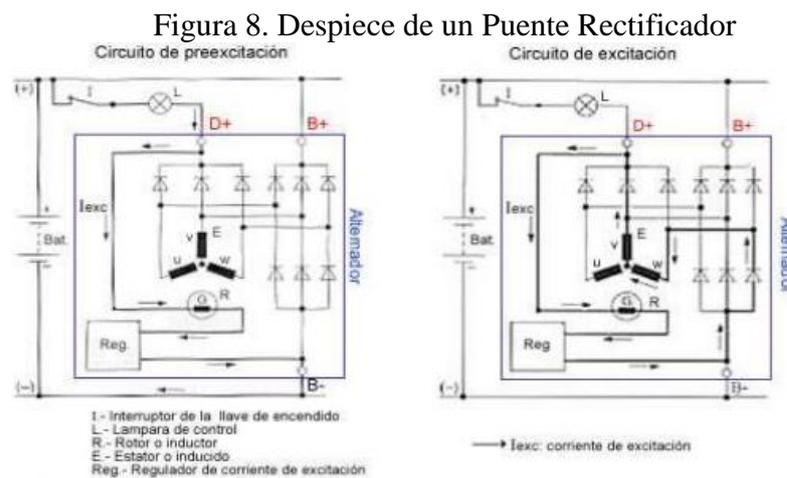


Fuente: [www.endesaeduca.com/Endesa\\_educarecursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores](http://www.endesaeduca.com/Endesa_educarecursos-interactivos/conceptos-basicos/v.-funcionamiento-basico-de-generadores)

Entre sus partes más importantes, se tiene:

- **Rotor o Inductor.** Es la parte móvil que gira dentro del estator. El rotor contiene el sistema inductor y los anillos de rozamiento, mediante los cuales se alimenta el sistema inductor. (COSTA, 2014)

- *Estat*or. Es la parte fija exterior del generador. En su interior se encuentra el núcleo del inducido, con forma de corona y ranuras longitudinales, donde se alojan los conductores del enrollamiento inducido. (COSTA, 2014)
- *Entrehierro*. Es el espacio de aire que existe entre el rotor y el estator. Normalmente varía entre 1 y 3 milímetros. (COSTA, 2014)
- *Regulador de Voltaje*. Es el encargado de mantener una tensión máxima de salida del alternador de 14,5 V. (COSTA, 2014)
- *Puente Rectificador de Diodos*. Es el elemento encargado de rectificar la corriente de salida (alterna) y haciendo que esta se convierta en corriente continua, y de este modo sea factible para el uso de los diferentes accesorios del automóvil. (COSTA, 2014)
- *Circuito de Excitación del Alternador*. El alternador para generar electricidad por medio del movimiento que recibe del cigüeñal, necesita de una corriente eléctrica (corriente de excitación) que en principio, antes de encender el motor, debe tomar de la batería a través de un circuito eléctrico que se llama "circuito de pre excitación". (COSTA, 2014).



Fuente: [www.aficionadosalamecanica.net/alternador-funcionam.htm](http://www.aficionadosalamecanica.net/alternador-funcionam.htm)

**2.3.2.2 Dínamos.** Es un dispositivo eléctrico rotativo que transforma la energía mecánica del cigüeñal en eléctrica. En la actualidad en los vehículos se usan muy poco, ya que la producción y transporte de energía eléctrica es en forma de corriente alterna.

Una de las características notables de las dinamos es que son elementos reversibles: se pueden utilizar tanto como generador o como motor. Cuando funciona como motor tiene la principal aplicación, es de tipo industrial, ya que tiene facilidad a la hora de regular su velocidad de giro en el rotor. Entre las partes más importantes de la dinamo se tiene: rotor, estator, entrehierro.

- *Conmutación en las dinamos.* Es la operación de transformación a una señal continua de una alterna, también se conoce como rectificación de señal. Esta conmutación se realiza a través del colector de delgas. Los anillos del colector están cortados debido a que por fuera de la espira la corriente siempre debe ir en el mismo sentido.
- A la hora de realizar esta conmutación existen varios problemas. Cuando el generador funciona con una carga conectada en sus bornes, hay una caída de tensión interna y una reacción en el inducido. Además se puede realizar la conmutación, por medio de un puente rectificador de diodos. (Guillermo Desimone, 2015).

**2.3.3** *Ventajas de un Alternador respecto a una Dinamo.* El alternador tiene varias ventajas que hacen que sea un tipo de máquina más utilizada. Se detallarán algunas, como:

- El peso del alternador es menor que de la dinamo, por lo que no consume mucha potencia del tren de potencia, entregando la misma carga eléctrica.
- Mayor vida útil del alternador, lo que incurre en mantenimientos a mayor plazo.
- Menor tamaño, entre un 25 a 35%.
- El alternador funciona en ambos sentidos de giro (horario y anti horario) sin la necesidad de modificar.
- Carga con amplitud a todos los regímenes de giro del motor, incluso en ralentí, algo imprescindible en el tráfico de hoy en día.

- El conjunto rotor y estator en el alternador es más compacto.

## 2.4 Unidad de Control de Voltaje.

También conocido como regulador de tensión o voltaje, es el dispositivo encargado de limitar la corriente de excitación o de campo del alternador y evitar sobrecargas y descarga de la batería, en este caso mediante el flujo de corriente del acumulador hacia el bobinado del rotor. En su estructura interior se encuentran dispositivos electrónicos de precisión tales como diodos y resistencias limitadoras.

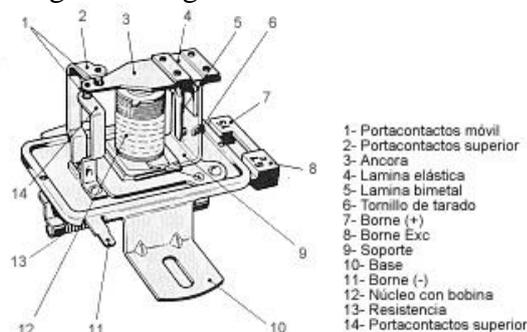
**2.4.1 Tipos.** Se puede destacar dos versiones fundamentales:

- Mecánico
- Electrónico

**2.4.1.1 Mecánico.** Conocido también como regulador de contactos electromagnéticos, no se los usa actualmente. Funcionan mediante la apertura y cierre de un contacto móvil en el circuito de excitación que corta la corriente provocándose una modificación de la misma.

El contacto móvil es accionado por la fuerza de un resorte contra un contacto fijo y es separado de este por un electroimán al sobrepasarse la tensión teórica. Su instalación es externa al alternador. (MEGANEBY, 2014)

Figura 9. Regulador Electromecánico

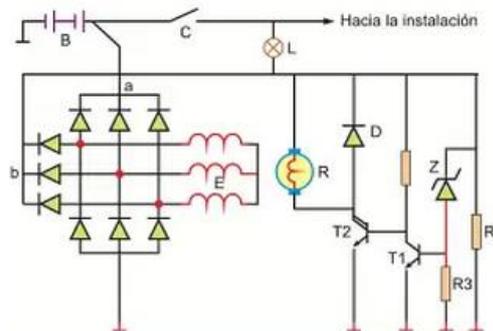


Fuente: [www.aficionadosalamecnica.net/alternador-reg.htm](http://www.aficionadosalamecnica.net/alternador-reg.htm)

**2.4.1.2 Electrónico.** Es un circuito electrónico, incluido dentro del alternador, se compone de los siguientes elementos: (MARÍN, 2011)

- Diez diodos, distribuidos en un conjunto de nueve: seis diodos de carga (tres a positivo y tres a masa), tres encargados de apagar el testigo, y un diodo D.
- Un diodo Zener Z con un valor de 14.2 V
- Tres resistencias R1, R2, R3
- Dos transistores T1 y T2

Figura 10. Regulador de tensión del Alternador



Fuente: (MARÍN, 2011)

## 2.5 Sobrealimentación

Cuando se desea aumentar la potencia de un motor, se hace necesario incrementar el volumen de mezcla aspirado por los cilindros en cada ciclo, lo cual implica el ingreso en ellos de mayor cantidad de aire, a la que se sumará el combustible necesario para que la mezcla resulte exacta. (ALONSO, 2003)

En cuanto al caudal de combustible, los sistemas de inyección, tanto Diesel como de gasolina, son capaces de proporcionar el necesario, mientras que la mayor cantidad de aire debe ser suministrado favoreciendo el efecto de aspiración creado en el descenso del pistón en la carrera de admisión.

En los motores sobrealimentados se debe reducir ligeramente la relación de compresión, debido al aumento de la presión de producida por el turbocompresor, de este modo también reduce también el rendimiento térmico, que es necesario (en motores a gasolina) para evitar el fenómeno de detonación que conlleva el incremento de presión al final de la fase de compresión. (BOHNER, 1985)

Este peligro no es evidente en los motores Diesel, en los que al contrario de lo que ocurre en los de gasolina, el aumento de presión facilita la combustión.

Una manera eficaz de sobrealimentar el motor es mediante un turbocompresor. De esta manera, la sobrealimentación es empleada para introducir en el cilindro una masa de aire superior a la aspiración normal.

Con la sobrealimentación se consigue aumentar el área útil del ciclo térmico del motor, a consecuencia del incremento de la densidad del aire y el aumento de la presión de alimentación.

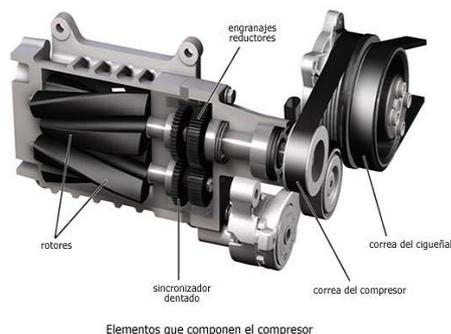
Se puede encontrar varios tipos de dispositivos usados en sobrealimentación:

- Compresor Volumétrico
- Turbocompresor
- Compresor

**2.5.1 Compresor Volumétrico.** Llamado también Roots. La característica fundamental de estos aparatos consiste en hacer circular el aire a mayor velocidad de la que proporciona la presión atmosférica, por lo que acumulan aire en el conducto de admisión y crean una sobrepresión en él, pero en todos los casos estos compresores son accionados por el cigüeñal, por medio de un ensamble rígido.

Tiene una ventaja sustancial respecto a otro tipo de compresores que es la de ser accionados directamente por el motor, de este modo la sobrealimentación es racional y muy equilibrada en cualquiera de los regímenes del motor.

Figura 11. Compresor Roots



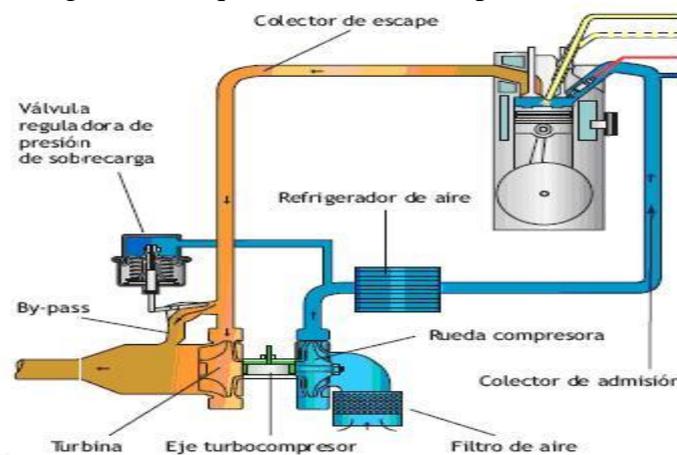
Elementos que componen el compresor

Fuente: [www.aficionadosalamecanica.net/images-tsi/compresor-despiece.jpg](http://www.aficionadosalamecanica.net/images-tsi/compresor-despiece.jpg)

**2.5.2 Turbocompresor.** Tiene como ventaja principal que no consume potencia efectiva del motor, además de estar dotado con la capacidad de ser capaz de girar a un altísimo número de revoluciones, del orden de los 200 000 RPM. Está compuesto de dos caracolas que alojan dos turbinas o rodetes, que giran solidarios. Su funcionamiento se basa en que mediante los gases de escape que están dotados de gran inercia atraviesan los alabes del rodete de escape al cual impulsan para salir por el tubo de escape.

Este rodete es solidario al de admisión, este a su vez gira y aumenta la velocidad del aire de en el múltiple de admisión, de este modo el aire se comprime y aumenta su valor de sobrepresión al ingresar al cilindro. Para que la sobrepresión no se exceda y pueda dañar internamente el motor, se incorpora una válvula de seguridad llamada válvula de descarga de presión o Wastegate, que va instalada en la caracola de escape, y es accionada mediante vacío, provocando que se comprima un muelle en el interior de esta. (GIL, 1999)

Figura 12. Esquema de Turbocompresor



Fuente:<http://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/85-el-turbocompresor/85-el-turbocompresor>

Existen básicamente dos tipos de turbocompresores:

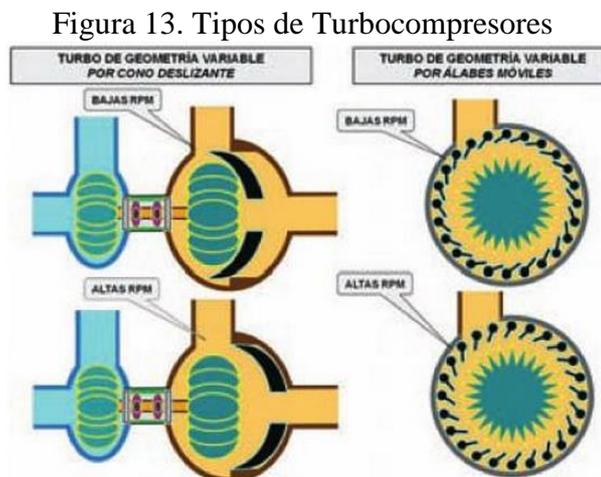
- Turbocompresor de Geometría Fija
- Turbocompresor de Geometría Variable

**2.5.2.1 Turbocompresor de Geometría Fija.** Son turbocompresores en los cuales todo el flujo de los gases es dirigido a la turbina sin importar como está siendo operado el

motor, fueron diseñados para rendimientos óptimos a regímenes específicos y específicas cargas de calor.

**2.5.2.2 Turbocompresor de geometría variable.** O también llamado VTG, a diferencia del turbocompresor convencional es la utilización de un plato o corona, en la cual están alojados unos álabes móviles, que son desplazados todos a la vez un cierto ángulo, por un mecanismo de varilla-palanca accionada por una válvula neumática similar a la válvula Wastegate. (OROVIO, 2010 págs. 271-273)

Para conseguir el máximo empuje de aire a bajo régimen del motor, los álabes deben cerrarse reduciendo la sección entre ellos, logrando incrementar el flujo de los gases de escape que inciden con mayor fuerza sobre los álabes del rodete de la turbina del conjunto turbocargador. El motor al ir aumentando el régimen, aumenta el empuje de aire en el múltiple de admisión, la válvula neumática detecta esta magnitud a través de un conducto conectado directo al múltiple de admisión, que lo transforma en un movimiento que acciona el sistema de mando de los álabes para que puedan desplazarse a una posición de apertura determinada que disminuya la velocidad de los gases de escape que inciden sobre la turbina. (OROVIO, 2010 págs. 271-273)



Fuente: Tecnología del automóvil. Manuel Orovio Astudillo 2010

La variación también se puede hacer por medio de un cono deslizante que se desplaza transversalmente variando la sección de paso de los gases a la turbina.

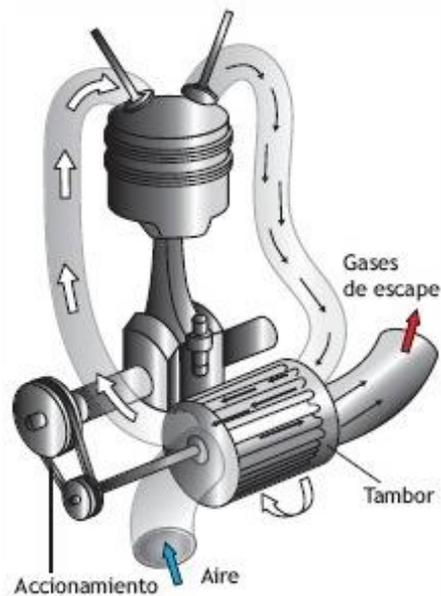
**2.5.3 Comprex.** Son una variante del turbocompresor, son accionadas por el motor. Transfiere la energía de los gases de escape y el aire de alimentación por medio de

"ondas de presión" producidas entre las finas paredes radiales de un tambor, que gira gracias al acoplamiento con el cigüeñal.

El accionamiento de su rotor solamente requiere de una pequeña potencia del motor para el mantenimiento del proceso de las "ondas de presión".

El régimen de funcionamiento máximo está entre las 15 000 a 20 000 RPM, produciéndose a partir de aquí un descenso notable de su rendimiento. (Automoviles El Mangas SL, s.f)

Figura 14. Compresor



Fuente: [www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/83-turbo-compresor-compres/83-turbo-compresor-compres](http://www.autoavance.co/blog-tecnico-automotriz/83-turbo-compresor-compres/83-turbo-compresor-compres)

#### 2.5.4 Ventajas y Desventajas del Turbocompresor.

Dentro de las ventajas, se tiene:

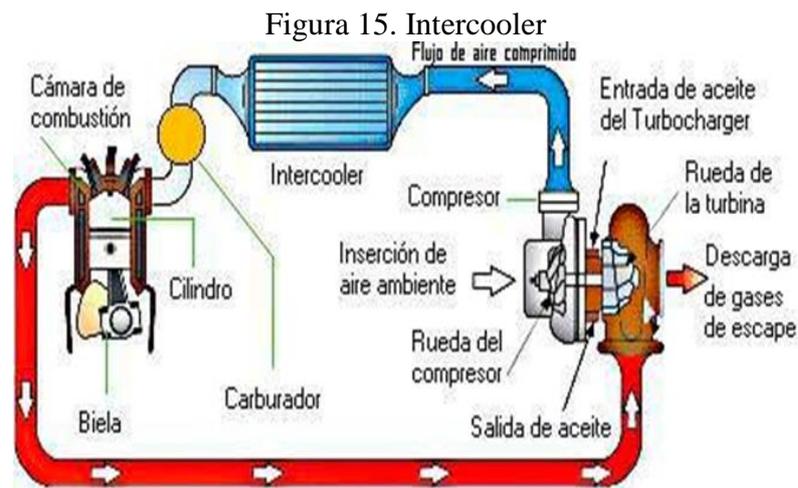
- Aumento de potencia. Un turbocompresor puede aumentar la potencia efectiva de un motor estándar en un 35% por cilindrada total.
- Reducción del ruido del motor. La caracola de escape actúa como un silenciador del ruido de los gases de escape. Similarmente la caracola de admisión absorbe el ruido producido en el múltiple de admisión.

- Notable mejora del consumo de combustible, en relación a los mejores naturalmente aspirados.
- Debido a que depende de la diferencia de presión entre los gases de escape y la presión atmosférica, puede ajustarse a cualquier altitud.

Dentro de las desventajas, se tiene:

- Potencia y par reducido a bajas revoluciones, debido a la insuficiente inercia de los gases desprendidos por el motor (llamado turbolag o retraso de respuesta).
- Montaje del turbocompresor en la zona de los gases de escape, lo que conlleva a utilizar materiales refractarios.
- Dificultosa lubricación y refrigeración debido a su diseño tecnológico.

**2.5.5 Intercooler.** Es un intercambiador térmico de aire/aire intercalado a la salida del compresor, capaz de adecuar la temperatura del aire de admisión. Básicamente es un radiador de aire, tiene ventajas evidentes, porque aumenta el rendimiento hasta un 20% y reduce el desgaste del motor.



Fuente: [www.takeoffbriefing.com/como-funciona-un-turbocompresor-motor-sobrealimentado-video/](http://www.takeoffbriefing.com/como-funciona-un-turbocompresor-motor-sobrealimentado-video/)

El Intercooler reduce la temperatura del aire de admisión a unos 50 o 60 °C, el aire enfriado presenta una mayor densidad que el aire caliente, debido a que se reduce su

volumen, por lo que el llenado en los cilindros con este aire refrigerado es mayor, además mejorando su contenido de oxígeno.

## 2.6 Unidad de Control Programable

La implementación de un sistema, de inyección y encendido ajustables permite modificar con facilidad, los parámetros que regulan y gestionan la inyección y el encendido. Estos dos sistemas no traen mapas ni programación inicial de fábrica grabada en la memoria EPROM.

Esta es la razón por la que se debe dar valores para el primer encendido del motor y luego la posterior modificación de otros parámetros.

**2.6.1 MegaSquirt.** Es un controlador electrónico de inyección de combustible programable, diseñado, específicamente para controlar la forma en que los inyectores pulverizan el combustible y poder mejorar el rendimiento del motor, de modo que éste pueda entregar más potencia; generalmente luego de haber mejorado o modificado algunas partes mecánicas del motor. (MEGAMANUAL, 2015)

El controlador MegaSquirt puede proporcionar cálculos en tiempo real del combustible, hasta 16 000 RPM, es completamente programable y provee una conexión serial para interconectarse con una computadora regular. (MEGAMANUAL, 2015)

Este sistema nos proporciona la elección libre a controlar, como la inyección de combustible únicamente o el sistema de encendido en adición al control de la inyección de combustible. Todo está al juicio de la persona que esté ejecutando la implementación.

Figura 16. ECU Programable MegaSquirt.



Fuente: Autores

MegaSquirt es capaz de controlar la inyección de combustible en motores, desde 1 hasta 12 o más cilindros. Los inyectores a controlar pueden ser de alta o baja resistencia eléctrica para cualquier número de cilindros, aún sea el caso de motores de 3 o de 5 cilindros, incluso motores con sistema de encendido DIS. MegaSquirt soporta un variado número de sistemas de encendido.

Es posible controlar una bobina directamente hasta un máximo de seis, mediante algunas modificaciones al sistema. Si se desea controlar únicamente el combustible, se puede obtener la secuencia correcta de disparo (trigger), directamente del negativo de la bobina o de la señal existente del indicador de revoluciones del motor. (TARINGA, 2008)

## CAPÍTULO III

### 3. ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA A GASOLINA

#### 3.1 Análisis del estado del Motor de Combustión Interna

El banco de pruebas denominado “Repotenciación de un Motor de Combustión Interna a Gasolina de un vehículo Chevrolet Swift, por medio de un Módulo de Control de motor con Sistema de Inyección Bosch LE3 - Jetronic” perteneciente a la Escuela de Ingeniería Automotriz se utilizó para el desarrollo e incorporación de un nuevo sistema que servirá como material didáctico para el laboratorio de Autotrónica e Inyección Electrónica, se planteó la necesidad de implementar un sistema de recuperación de energía en el banco de pruebas como trabajo de investigación previo al trabajo de titulación, el cual es objeto de desarrollo, estudio e investigación.

Figura 17. Banco de Pruebas Motor a Gasolina 4 Cilindros con EFI



Fuente: Autores

Se realizó los trámites correspondientes de gestión en la Escuela para la adquisición del banco de pruebas, seguidamente se realizó una inspección visual del mismo, llegando a determinar que ciertos elementos se encuentran en mal estado y que algunos no se encontraban instalados en sus posiciones y lugares de funcionamiento para su normal desempeño y operación al momento de efectuar prácticas de laboratorio.

**3.1.1** *Estado del sistema de alimentación.* Al realizar el análisis se encontró las siguientes condiciones:

- Ausencia de conductos de admisión de aire
- Falta de manguera de vacío hacia el motor
- Filtro de aire
- Falta de abrazaderas
- Ausencia de cable del acelerador
- Irregular sujeción del riel

Figura 18. Elementos Faltantes



Fuente: Autores

**3.1.2** *Estado del sistema de refrigeración.* Al realizar el análisis del sistema de refrigeración se encontró las siguientes condiciones:

- Ausencia de termostato
- Falta del cierre hermético del radiador
- Ausencia de mangueras de caucho y abrazaderas

Figura 19. Radiador del motor



Fuente: Autores

**3.1.3** *Estado del sistema de lubricación.* En el presente sistema, se presentó la ausencia en su totalidad de líquido lubricante en el cárter, además de la bayoneta medidora del nivel de aceite.

Figura 20. Bayoneta medidora de aceite



Fuente: Autores

**3.1.4** *Estado del sistema de distribución.* Se comprobó a la hora de realizar la sincronización (calado), que está fuera de punto, además del mal estado del rodillo tensor de la banda trapezoidal.

Figura 21. Polea de Distribución



Fuente: Autores

**3.1.5** *Estado del sistema eléctrico-electrónico.* Al realizar el análisis de este sistema se encontró las siguientes condiciones:

- Ausencia de la ECU
- Falta de sensor CKP
- Ausencia de sensor EGO
- Falta de actuador IAC

- Ausencia de batería
- Fusibles quemados
- Cables y conectores en mal estado.

Figura 22. Tablero Electrónico de Control



Fuente: Autores

### 3.2 Selección de elementos para la repotenciación del banco de pruebas

Durante el proceso de repotenciación y equipamiento del banco de pruebas, se ha tenido en cuenta que se debe incorporar ciertos elementos electrónicos y mecánicos de modo que se llegue a un estado en el que se logre encender el motor.

**3.2.1** *Sensor CKP*. Será el encargado de determinar e informar a la ECU de la posición del cigüeñal con respecto al punto muerto superior (PMS) del primer cilindro, para de esta manera controlar el encendido y el punto de inyección.

El sensor seleccionado es de tipo inductivo del vehículo Lada Niva, se lo eligió debido a que es capaz de proveer una mejor lectura de los dientes perdidos en la rueda fónica, lo cual permite una señal constante a pesar de la variación de distancia.

Figura 23. Sensor Inductivo CKP



Fuente: Autores

**3.2.2** *Sensor de Oxígeno (EGO)*. Será el encargado de medir la concentración de oxígeno en los gases de escape. El EGO funcionará como un elemento que evaluará el trabajo del resto del sistema. Si la ECU detecta una mezcla demasiado rica o demasiado pobre, hará la corrección respectiva, aumentando o disminuyendo los pulsos de inyección según convenga (lazo cerrado).

En el banco, se procedió a instalar un sensor de oxígeno de un solo cable correspondiente al vehículo Chevrolet Corsa, que se escogió por facilidad de instalación y adquisición en el mercado, el cual va a ser montado en el nuevo sistema de escape.

Figura 24. Sensor Calentado de Oxígeno (EGO)



Fuente: Autores

**3.2.3** *Válvula de Control de aire en Ralentí (IAC)*. Recibirá la señal eléctrica de la ECM, controlando la marcha mínima del motor por medio de la cantidad del paso de aire.

Se procedió a reponer un nuevo actuador IAC de cuatro cables de sistema Magnetti Marelli, correspondiente al vehículo Chevrolet Corsa, que se seleccionó de acuerdo al alojamiento presente en el cuerpo de aceleración.

Figura 25. Actuador de Ralentí (IAC)



Fuente: Autores

**3.2.4 Filtro de Aire.** Elemento que se encargará de absorber las impurezas presentes en el aire aspirado por el motor. Consta de capas tejidas unidas entre sí.

Se seleccionó un filtro de aire cónico, debido a sus mejores prestaciones, ya que permite el paso de un flujo de aire uniforme en toda su periferia.

Figura 26. Filtro de Aire



Fuente: Autores

**3.2.5 Batería.** Elemento encargado de almacenar corriente eléctrica. Recibe constante carga del alternador.

Tabla 1. Características de la batería seleccionada

| Marca                                     | BOSCH        |
|---|--------------|
| Modelo                                    | S3 NS 40 GPF |
| Voltaje (V)                               | 12           |
| Amperaje (Ah)                             | 40           |
| Capacidad de Arranque (A) (27 °C)         | 460          |
| Capacidad de Arranque (A) (0 °C)          | 390          |
| Potencia de Arranque en Frio (A) (-18 °C) | 330          |
| Capacidad de Reserva (min.)               | 60           |
| Medidas (mm)                              | 242x175x190  |

Fuente: Autores

Figura 27. Batería

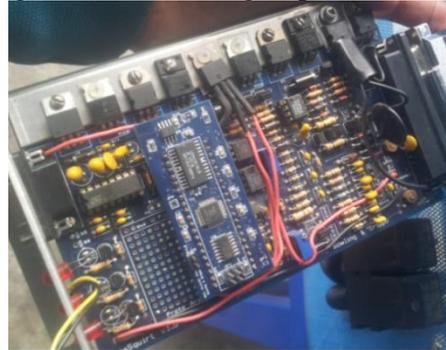


Fuente: Autores

**3.2.6 ECU.** Elemento electrónico que controlará y gestionará el funcionamiento del motor mediante la constante comunicación con los diversos sensores y actuadores.

Se colocó un nuevo módulo electrónico MegaSquirt II, debido a que es muy versátil, dinámico y programable, lo que permite ajustar los parámetros del motor; como su afinado pulso de inyección y sistema de encendido.

Figura 28. ECU MegaSquirt II



Fuente: Autores

En resumen, el estado actual del motor, sus componentes:

Tabla 2. Elementos del motor analizados

| Sistema                   | Elemento                      | Condición          | Actividad a Realizar |
|---------------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|
| Alimentación              | Conductos de admisión de aire | Ausente            | Reponer              |
|                           | Manguera de vacío             | Ausente            | Reponer              |
|                           | Abrazaderas                   | Ausente            | Reponer              |
|                           | Filtro de Aire                | Ausente            | Reponer              |
|                           | Cable de Acelerador           | Ausente            | Reponer              |
|                           | Riel                          | Fijación irregular | Fijar                |
| Refrigeración             | Termostato                    | Ausente            | Reponer              |
|                           | Tapón de radiador             | Ausente            | Reponer              |
|                           | Mangueras y Abrazaderas       | Ausente            | Reponer              |
| Lubricación               | Lubricante                    | Ausente            | Reponer              |
|                           | Bayoneta                      | Ausente            | Reponer              |
| Distribución              | Sincronización                | Fuera de punto     | Ajustar el tiempo    |
|                           | Tensor                        | Averiado           | Reemplazar           |
| Eléctrico-<br>Electrónico | ECU                           | Ausente            | Reponer              |
|                           | CKP                           | Ausente            | Reponer              |
|                           | EGO                           | Ausente            | Reponer              |
|                           | IAC                           | Ausente            | Reponer              |
|                           | Batería                       | Ausente            | Reponer              |
|                           | Fusibles                      | Quemados           | Reemplazar           |
|                           | Arnés                         | Defectuoso         | Reemplazar           |

Fuente: Autores

## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

#### 4.1 Selección del Turbocompresor

##### 4.1.1 Cálculos para la selección del turbo para el motor Chevrolet Swift a Gasolina.

Con los datos técnicos del motor Chevrolet Swift 1,6 L (Tabla 3) se va a realizar el cálculo matemático que permita escoger un turbocompresor adecuado de acuerdo a las características del motor.

Tabla 3. Características del motor Chevrolet Swift

|   |                       |
|---|-----------------------|
| Marca                                       | Chevrolet             |
| Modelo                                      | Swift                 |
| Orden de encendido                          | 1-3-4-2               |
| Tipo de combustible                         | Gasolina              |
| Posición de cilindros                       | 4 cilindros en línea. |
| Distribución                                | OHC de 16 válvulas.   |
| Carrera                                     | 90,00 mm              |
| Diámetro                                    | 75,00 mm              |
| Cilindrada                                  | 1 590 cm <sup>3</sup> |
| Relación de compresión.                     | 9,5:1                 |
| Potencia hp/rpm máx. Estándar               | 92/6 000              |
| Potencia hp/rpm máx. con LE3-Jetronic       | 106/6 000             |
| Potencia hp/rpm máx. con MegaSquirt II V3.0 | 110/6 000             |
| Torque Nm/rpm máx. Estándar                 | 133/3 750             |
| Torque Nm/rpm máx. con LE3-Jetronic         | 148/4 000             |
| Torque Nm/rpm máx. con MegaSquirt II V3.0   | 180/3 500             |

Fuente: Manual Tolerance Data 2009.2

En el presente motor, se ha implementado 2 fases de alimentación de combustible, la primera incorporando un sistema de inyección Bosch LE3-Jetronic logrando medirse una potencia real de 106 HP; la segunda con un sistema de inyección ajustable mediante una ECU reprogramable MegaSquirt II V3.0 obteniendo una potencia efectiva de 110 HP, lográndose un incremento de 3,7 %.

Con el valor de potencia real del motor  $P_r = 110$  HP y tomando en cuenta los aspectos geográficos de la ciudad de Riobamba, donde funcionará el banco de pruebas como la presión atmosférica  $P_{atm} = 72,3$  kPa (0,723 bar) obtenida mediante el sensor MAP de la MegaSquirt II y a la altitud de 2745 msnm; se procederá a realizar el cálculo matemático.

**4.1.1.1 Cálculo y análisis de la relación de presión.** La relación de presión ( $R_P$ ), se usa para determinar mediante cartografías de turbocompresores la relación de densidad de aire, para posteriormente por medio de una fórmula determinar el caudal de aire por minuto (CFM) que el turbocargador necesita proporcionar al motor.

Para esto se relaciona la presión de sobrealimentación o a la salida del turbo ( $P_S$ ) con la presión atmosférica o de entrada de aire ( $P_a$ ) la fórmula queda de la siguiente manera: (HONEYWELL, 2012)

$$R_P = \frac{P_S}{P_{atm}} \quad (2)$$

Dónde:

$R_P$  = Relación de presión.

$P_S$  = Presión de sobrealimentación, en bar.

$P_{atm}$  = Presión atmosférica, en bar.

A criterio de nuestra selección los valores de aire fresco aportado por el rodete compresor se consideraran entre 0,2 y 0,5 bar (2,90 y 7,25 psi), con un sistema de válvula Wastegate.

Si se excede esta presión algunas partes internas del motor pueden ser afectadas debido al aumento desproporcionado de la presión, para el presente caso se utilizará un valor promedio, siendo éste:

$$\overline{P_S} = \frac{0,2 \text{ bar} + 0,5 \text{ bar}}{2} \quad (3)$$

$$\overline{P_S} = 0,35 \text{ bar}$$

Estos valores en condiciones a nivel del mar, en este caso se debe sumar la presión atmosférica de 0,723 bar (10,53 psi). La presión de sobrealimentación queda de la siguiente manera:

$$\overline{P_s} = 0,35 \text{ bar} + 0,723 \text{ bar} \quad (4)$$

$$\overline{P_s} = 1,073 \text{ bar} = 15,56 \text{ psi}$$

En el caso de la presión de admisión se debe considerar las pérdidas de presión debido a la oposición al flujo de aire por la calidad de superficie de los conductos de admisión y el filtro de aire, siendo el valor de pérdidas de 0,0689 bares (1 psi). Debido a esto la presión de admisión al turbo ( $P_{aT}$ ) se establece así: (Turbobygarrett, s.f)

$$P_{aT} = P_{atm} - P_{p\acute{e}rdidas} \quad (5)$$

$$P_{aT} = 0,723 \text{ bar} - 0,0689 \text{ bar}$$

$$P_{aT} = 0,6541 \text{ bar} = 9,4845 \text{ psi}$$

Con los datos anteriores se puede calcular la relación de presión:

$$Rp = \frac{P_s}{P_{aT}} \quad (6)$$

$$Rp = \frac{1,073 \text{ bar}}{0,654 \text{ bar}}$$

$$Rp = 1,64$$

**4.1.1.2 Cálculo del flujo de entrada de aire másico al motor (CFM).** Es la cantidad de aire que entra al motor y es el valor que va en el eje de las abscisas del mapa de selección del turbocompresor, su valor se puede indicar ya sea en unidades de masa o volumen por unidad de tiempo (lb/min o ft<sup>3</sup>/min), para el cálculo del flujo de entrada de aire se necesitan conocer los siguientes datos: (HONEYWELL, 2012)

- Potencia media del motor sin carga ( $P_e$ ).

- Relación estequiométrica aire/combustible.
- Consumo específico de combustible ( $b$ ).

**Potencia media del motor sin carga.** La potencia media del motor indica el trabajo realizado por el motor sin carga, es decir montado sobre un banco de pruebas.

En este caso, el motor es de 110 HP o 82,03 kW.

**Relación estequiométrica aire/combustible.** En los motores a gasolina la relación estequiométrica aire/combustible es de 14,7:1, es decir para quemar 1 gramo de gasolina se necesitan 14,7 gramos de aire.

**Consumo específico de combustible.** Primeramente se calculará el consumo de combustible por hora con la siguiente ecuación: (KINDLER, 1986 pág. 161)

$$B = \frac{K \cdot \rho \cdot 3600}{t} \left[ \frac{g}{h} \right] \quad (7)$$

Dónde:

$B$  = Consumo por hora, en kg/h.

$K$  = Consumo de combustible de acuerdo a la potencia, en  $cm^3$ .

$\rho$  = Densidad del combustible, en  $g/cm^3$ .

$t$  = Tiempo continuo (duración de la prueba) en el banco de pruebas, en s.

$$B = \frac{K \cdot \rho \cdot 3600}{t} \left[ \frac{g}{h} \right]$$

$$B = \frac{(353 \text{ cm}^3) \left( \frac{0.760 \text{ g}}{\text{cm}^3} \right) (3600)}{30s}$$

$$B = 32193,6 \left[ \frac{g}{h} \right], \text{ ó } 1,183 \left[ \frac{lb}{min} \right]$$

Ahora se calcula el consumo específico de combustible mediante la siguiente ecuación (KINDLER, 1986 pág. 161):

$$b = \frac{B}{Pe} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right] \quad (8)$$

Dónde:

$b$  = Consumo específico, en g/kWh.

$B$  = Consumo por hora, en kg/h.

$Pe$  = Potencia efectiva, en kW.

$$b = \frac{B}{Pe} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kWh}} \right]$$

$$b = \frac{8,942 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{82.03 \text{ kW}}$$

$$b = 1,09 \times 10^{-4} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{s}} \right] \text{ ó } 0,01 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{Hp} \cdot \text{min}} \right]$$

Con estos datos se calcula el CFM con el uso de la fórmula siguiente: (HONEYWELL, 2012):

$$CFM = Pe \cdot \text{Relacion estequiométrica} \cdot b \quad (9)$$

$$CFM = (82,03 \text{ kW})(14,7) \left( \frac{1,09 \times 10^{-4} \text{ kg}}{\text{kW} \cdot \text{s}} \right)$$

$$CFM = 0,1314 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \text{ ó } 17,38 \left[ \frac{\text{lb}}{\text{min}} \right]$$

**4.1.1.3 Análisis y cálculo de la presión en el múltiple de admisión.** Calculada de acuerdo a la potencia efectiva del motor, la presión absoluta en el múltiple de admisión presente ( $P_{am}$ ), se determina mediante la utilización de la siguiente fórmula (HONEYWELL, 2012):

$$P_{am} = \frac{CFM \cdot R \cdot (460 + T_{ma} \text{ °F})}{\eta_v \left(\frac{n}{2}\right) \cdot V_H} \quad (10)$$

Dónde:

$CFM$  = Flujo de aire necesario, en lb/min.

$R$  = Constante de gases.

$T_{am}$  = Temperatura teórica en el múltiple de admisión, luego de superar el compresor del turbocargador, en 46 °C.

$\eta_v$  = Rendimiento volumétrico.

$VH$  = Cilindrada del motor, en plg<sup>3</sup>.

$n$  = RPM máx.

**Rendimiento volumétrico.** Para determinar el rendimiento volumétrico, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\eta_v = \frac{V_F}{V_h} \quad (11)$$

Dónde:

$\eta_v$  = Rendimiento volumétrico.

$V_F$  = Cantidad de gas nuevo aspirado por cilindro, en cm<sup>3</sup>.

$V_h$  = Cilindrada del cilindro, en cm<sup>3</sup>.

$$\eta_v = \frac{V_F}{V_h}$$

$$\eta_v = \frac{0,85 (397,5) \text{ cm}^3}{397,5 \text{ cm}^3}$$

$$\eta_v = 0,85$$

Se debe tener en cuenta que para el presente análisis, se escogió un valor de eficiencia volumétrica de 85%, debido a las 4 válvulas por cilindro del presente motor. (MILLER, 2008)

Con el valor del rendimiento volumétrico, ahora se puede calcular el  $P_{am}$ , la ecuación queda de la siguiente manera:

$$P_{am} = \frac{CFM \cdot R \cdot (460 + T_{ma} \text{ } ^\circ F)}{\eta_w \left(\frac{n}{2}\right) \cdot VH}$$

$$P_{am} = \frac{(17,38 \text{ lb/min}) (639,6)(460 + 115 \text{ } ^\circ F)}{(0,85) \left(\frac{6500}{2}\right) (97,64 \text{ plg}^3)}$$

$$P_{am} = 23,69 \text{ psi} = 1,63 \text{ bar}$$

Una vez que el turbocargador esté instalado en el motor, se deben tomar en consideración las pérdidas de presión por accesorios ( $\Delta P$ ), para ello se tiene en consideración la longitud de los conductos, diseño de conductos, filtro de aire, entre otros. En los sistemas sobrealimentados se considera un valor promedio de pérdidas de 2 psi (0,138 bares). Al considerar este valor, la presión de sobrealimentación ( $P_{ST}$ ) queda de la siguiente manera:

$$P_{ST} = P_{am} - \Delta P \quad (12)$$

$$P_{ST} = 1,63 \text{ bar} - 0,138 \text{ bar}$$

$$P_{ST} = 1,495 \text{ bar} = 21,68 \text{ psi}$$

Con el valor obtenido, se calcula la relación de presión en un sistema turboalimentado ( $R_{PT}$ ).

$$R_{PT} = \frac{P_{ST}}{P_{aT}}$$

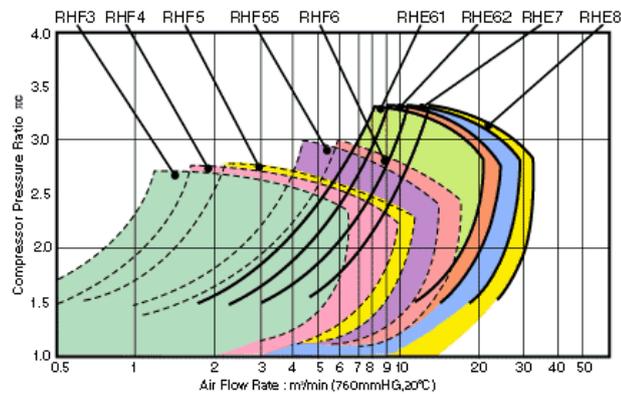
$$R_{PT} = \frac{1,63 \text{ bar}}{0,6541 \text{ bar}}$$

$$R_{PT} = 2,49$$

**4.1.2 Análisis del rendimiento de un turbocompresor de acuerdo al mapa.** En el mercado existen turbocargadores para cada tipo de motor, los cuales son descritos mediante un gráfico de compresión. Este se divide en dos ejes (Figura 30), en el eje

vertical o se identifican los valores de la relación de presión ( $R_{PT}$ ) mientras que el eje horizontal el caudal de aire necesario o requerido por el motor (CFM). (HONEYWELL, 2012)

Figura 29. Mapa de un turbocompresor

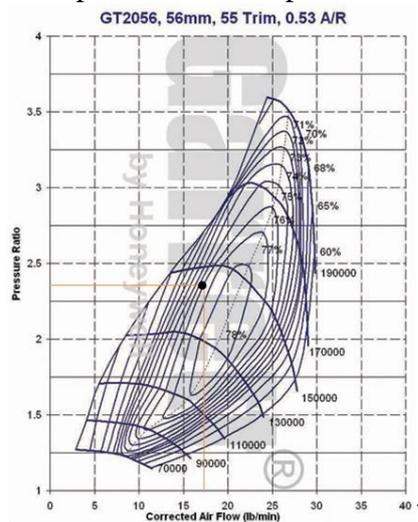


Fuente: [http://www.ih-turbo.com/turbo\\_RHE-RHF.htm](http://www.ih-turbo.com/turbo_RHE-RHF.htm)

**4.1.3 Turbocompresor seleccionado.** Considerando los datos técnicos del motor Chevrolet Swift 1,6 L, los resultados obtenidos en los cálculos de selección ( $R_{PT} = 2,49$ ) y CFM= 17,38 lb/min) y el estudio de diagramas de funcionamiento de los turbocompresores se determinó el ideal para el presente motor.

De acuerdo a la disponibilidad en el mercado y su facilidad de adquisición fueron dos marcas de turbos las seleccionadas: IHI y Garrett.

Figura 30. Mapa del turbocompresor seleccionado



Fuente:

[www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/sites/default/files/default\\_images/turbogroup/performance\\_maps/751578-2.jpg](http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/sites/default/files/default_images/turbogroup/performance_maps/751578-2.jpg)

La gráfica tomada representa a la marca Garrett, la cual es equivalente al de marca IHI modelo RHF5 de acuerdo a los valores de  $R_{PT}$  y CFM calculados.

#### 4.1.3.1 Datos técnicos de turbocompresores opcionales.

Tabla 4. Turbocompresor IHI

| <b>Turbocompresor IHI</b> |                            |
|---------------------------|----------------------------|
| Modelo                    | SJ69F-1YC                  |
| Turbo PN                  | 897659480                  |
| Tipo                      | Geometría fija             |
| Cilindrada de motor       | 1,5 – 2,0 l                |
| Sistema de enfriamiento   | Enfriado por aceite y agua |

Fuente: Autores

Tabla 5. Turbocompresor Garrett

| <b>Turbocompresor GARRETT</b> |                     |
|-------------------------------|---------------------|
| Modelo                        | GT 2056             |
| Turbo PN                      | 751578-2            |
| Tipo                          | Geometría fija      |
| Cilindrada de motor           | 1,4 – 2,0 l         |
| Sistema de enfriamiento       | Enfriado por aceite |

Fuente: Autores

4.1.3.2 *Análisis del mapa del turbocompresor seleccionado.* De acuerdo a los valores de  $R_{PT}$  y CFM, se puede observar en la gráfica, que el turbocompresor se encuentra en el área de eficiencia del 78%, entre las líneas de velocidad de 13 0000 y 150 000 RPM.

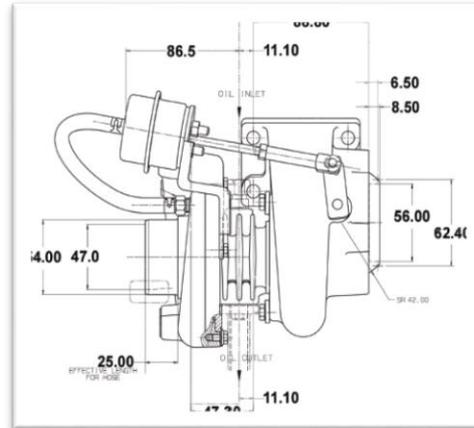
Figura 31. Turbocompresor seleccionado



Fuente: <http://www.ihi-turbo.com/product.htm>

**4.1.3.3 Dimensiones del turbocompresor seleccionado.** El turbocompresor para el motor Chevrolet Swift tiene las siguientes dimensiones (Figura 32) en mm:

Figura 32. Dimensiones del turbocompresor seleccionado



Fuente: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbocharger#GT2056%20%283%29>

**4.1.3.4 Dimensiones y diseños de construcción.** En la Tabla 6, se pueden ver los diámetros tanto de la turbina y la rueda compresora.

Tabla 6. Dimensiones de construcción

| Turbocargador |            | Compresor         |                   |      |      | Turbina       |      |      |
|---------------|------------|-------------------|-------------------|------|------|---------------|------|------|
| Turbo PN      | CHRA PN    | Diam Int Rue (mm) | Diam Ext Rue (mm) | Trim | A/R  | Diam Rue (mm) | Trim | A/R  |
| 751578-2      | 433289-234 | 41,50             | 56,00             | 55   | 0,53 | 47,00         | 72   | 0,46 |

Fuente: <http://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/turbocharger#GT2056>

## 4.2 Diseño del Múltiple de Escape

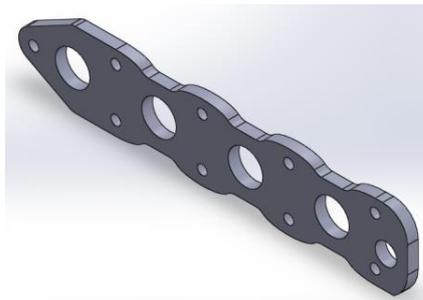
En vista de que el múltiple de escape original presentaba en su geometría una construcción voluminosa lo cual al acoplar el turbocompresor en esas condiciones repercutía en una escasa inercia de los gases escape, que iba a aumentar el efecto turbolag, en un alto foco térmico generado alrededor de elementos de refrigeración; además de la incomodidad en la instalación del sistema turbogenerador.

Debido a las consideraciones mencionadas, se procedió a diseñar y posteriormente a construir un nuevo múltiple de escape acorde a la ubicación del turbocompresor y posteriormente al sistema de recuperación de energía (ERS).

**4.2.1** *Diseño del Múltiple de Escape en SolidWorks.* Mediante el uso del software, se procedió a modelar tomando en cuenta nuevas formas y dimensiones.

**4.2.1.1** *Diseño de la Platina de Acople.* Se tomó como referencia la geometría de la brida hacia el motor del múltiple original, en la cual se realizó las respectivas operaciones de modelado para crear un nuevo elemento.

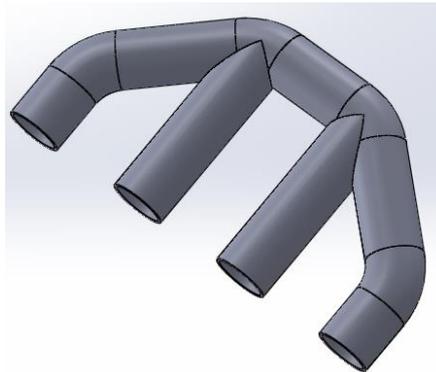
Figura 33. Diseño de la Platina de Acople



Fuente: Autores

**4.2.1.2** *Diseño de los Caños Principales del Múltiple.* Se realizó un nuevo diseño, tomando en cuenta que debe ser corto el recorrido de los gases de escape, de modo que tenga mayor empuje sobre la turbina del turbocompresor, así como la facilidad de desalojar del motor los gases desde la cámara de compresión.

Figura 34. Diseño de los caños de escape

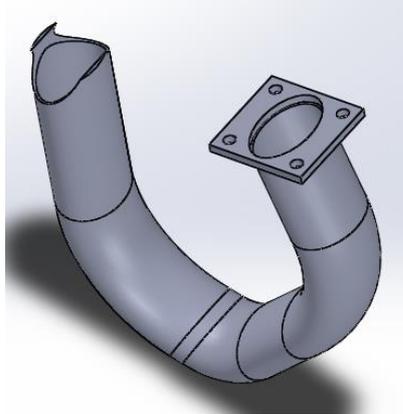


Fuente: Autores

**4.2.1.3** *Diseño del Caño Secundario.* Para esto se unió en un solo elemento la brida principal del turbocompresor y una curvatura en forma de U que conecta hacia los caños. Se tomaron en cuenta parámetros fundamentales en la ubicación correcta del turbocompresor, como la posición vertical de entrada y salida de los conductos de

lubricantes; así como la ubicación del eje del turbocompresor la cual debe estar por debajo de la del árbol de levas.

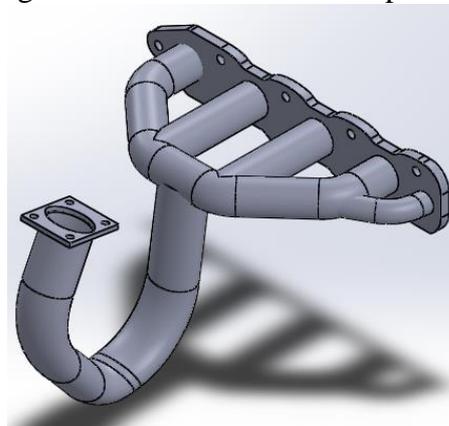
Figura 35. Diseño del caño secundario



Fuente: Autores

**4.2.1.4** *Ensamblaje Final del Múltiple de Escape.* Una vez ensamblados todos los componentes, se obtuvo un solo sistema (Figura 36), este diseño se usará para su construcción y posterior montaje en el motor.

Figura 36. Ensamble del Múltiple

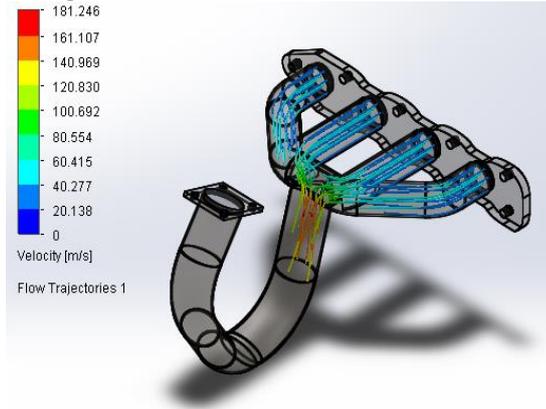


Fuente: Autores

**4.2.2** *Simulación de Flujo de Aire del Múltiple de Escape.* Una vez realizado el modelado del múltiple, se realiza la simulación de cargas sobre el mismo, con la ayuda del complemento Flow Simulation del mencionado SolidWorks o mediante el software Ansys 16.0, para observar el comportamiento de los gases de escape dentro del cuerpo.

Para esto se debe calcular varias magnitudes importantes que deben ingresarse al programa como requisitos para la simulación.

Figura 37. Simulación en SolidWorks



Fuente: Autores

**4.2.2.1** *Cálculo del caudal Volumétrico de los gases de escape.* Para el presente valor se aplicó la siguiente fórmula: (RILEY- BEAIRD, s.f)

$$Q_o = v \cdot A \cdot C_r \quad (13)$$

Dónde:

$Q_o$  = Caudal volumétrico de los gases de escape, en  $\frac{ft^3}{min}$

$v$  = Velocidad de los gases de escape al inicio del múltiple, en m/s

$A$  = Área de un caño de escape, en  $m^2$

$C_r$  = Factor de corrección de velocidad que corresponde a la temperatura de los gases.

Este factor depende de la temperatura de los gases, y se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$C_r = \left(\frac{T_0 + 460}{530}\right)^{1/2} \quad (14)$$

Dónde:

$T_0$  = Temperatura de los gases de Escape, en  $^{\circ}F$  ; tomado para el cálculo  $1292^{\circ}F$  o  $700^{\circ}C$  en este caso.

$$C_r = \left(\frac{T_0 + 460}{530^{\circ}F}\right)^{1/2}$$

$$C_r = \left( \frac{1292 + 460}{530 \text{ } ^\circ F} \right)^{1/2}$$

$$C_r = 1,8164$$

Se calcula el caudal volumétrico con el  $C_r$  conocido.

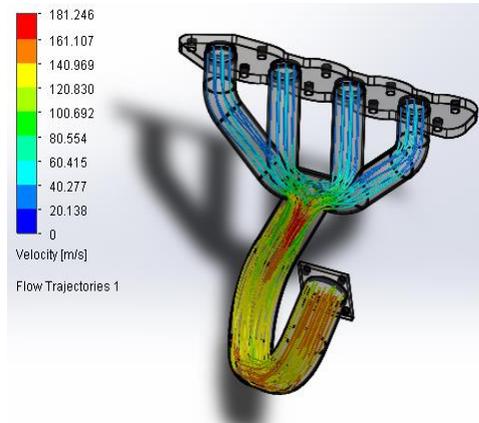
$$Q_o = v \cdot A \cdot C_r \left[ \frac{ft^3}{min} \right]$$

$$Q_o = (40m/s)(8,04 \times 10^{-4} m^2)(1,8164)$$

$$Q_o = 0,058 \left[ \frac{m^3}{s} \right] \text{ ó } 122,8 \left[ \frac{ft^3}{min} \right]$$

Con el dato de caudal volumétrico, se procedió a simular el flujo de aire en el interior del múltiple de escape.

Figura 38. Simulación en SolidWorks de Flujo

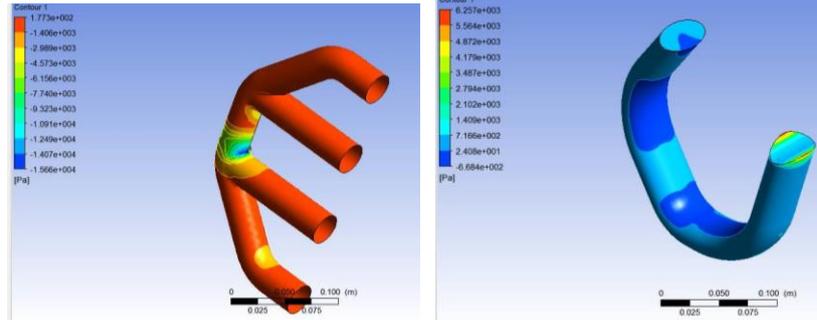


Fuente: Autores

Mediante la simulación, se determinó que el flujo de gases es constante en los caños pequeños, y al aumentar la sección permite una rápida evacuación de los gases de escape del interior de los cilindros; estas consideraciones justifican el correcto diseño y posterior construcción del múltiple de escape.

**4.2.2.2 Estudio Térmico del Múltiple de Escape.** Se realizó la simulación en Ansys 16.0, donde se estudió los caños de salida de los gases de escape, por partes, la una con los caños unidos entre si y la otra el caño de mayor longitud y tamaño.

Figura 39. Simulación en Ansys de la temperatura de los caños del múltiple.



Fuente: Autores

Se puede observar que en las partes con curvatura, existen variaciones de temperatura, debido al cambio de trayectoria.

### 4.3 Diseño del Generador

El generador que se va a diseñar, parte de varios puntos de estudio. En vista de que no existe en el mercado nacional un generador específico que soporte elevadas revoluciones, se procedió a realizar una incansable búsqueda de un motor/generador, lo cual implicaba en varios casos la adquisición del dispositivo con el objetivo de realizar estudios y pruebas para seleccionar el más adecuado.

**4.3.1 Pruebas con Motores/Generadores.** Durante esta fase, se estudió el principio de funcionamiento de los dispositivos eléctricos, así como sus características de magnitudes como: voltaje, corriente, potencia, frecuencia, revoluciones, torque; las cuales proveían de información para realizar pruebas, tomando en cuenta las ideales revoluciones del turbocompresor, optando por los siguientes generadores.

**4.3.1.1 Alternador.** Mediante los estudios realizados, un alternador es un generador muy eficiente en términos de corriente y voltaje, pero con la restricción de un límite de revoluciones, voluminosidad y masa elevada. Esta opción no es favorable para los intereses deseados, debido a la mayor presencia de las desventajas antes citadas.

**4.3.1.2 Motor de ventilador.** En vista que puede actuar como generador, se realizaron las respectivas pruebas, en la cual se observó que es capaz de soportar altas revoluciones, es ligero, pequeño y cumple con las características mecánicas deseadas previamente.

No se pudo optar por esta opción, debido a la baja eficiencia en las magnitudes eléctricas, ya que no logró generar la energía suficiente. Este dispositivo está diseñado para actuar con mayor eficiencia como motor que generador.

Figura 40. Prueba con motor de Ventilador



Fuente: Autores

Se experimentó varios tipos de motores similares a los del ventilador, pero con similares resultados.

**4.3.1.3 Sistema de Carga de una Motocicleta.** El sistema magnético de carga eléctrica de una motocicleta, provee 12 voltios al acumulador y puede ser sobrerrevolucionado.

A partir de este concepto se diseñó y construyó el generador, el que consta de un rotor que estaba acoplado al turbocompresor, un estator fijado a una carcasa diseñada y construida de nylon y un eje solidario al turbocargador fabricado en acero SAE 1018 en el cual iba montado el conjunto rotor-estator.

Figura 41. Sistema de carga de motocicleta



Fuente: Autores

Las pruebas demostraron la imposibilidad de su selección, en vista de que el campo magnético entre el rotor y el estator es tan grande, que para vencer su inercia se necesita de un enorme torque, algo incapaz de obtener del turbocompresor sin que éste resulte afectado.

Figura 42. Prueba con el sistema de carga de motocicleta



Fuente: Autores

Tanto el diseño como construcción de este generador, resultó en vano por lo detallado anteriormente, lo que dio paso a la búsqueda de una nueva alternativa.

**4.3.1.4 *Dínamo.*** Diseñado específicamente para actuar como generador, se procedió a probar, donde se pudieron obtener mejores resultados respecto a todos los anteriores, como las revoluciones y sobre todo el torque aplicado para vencer su inercia es mínimo. Además de una carga máxima de 36 voltios de corriente alterna.

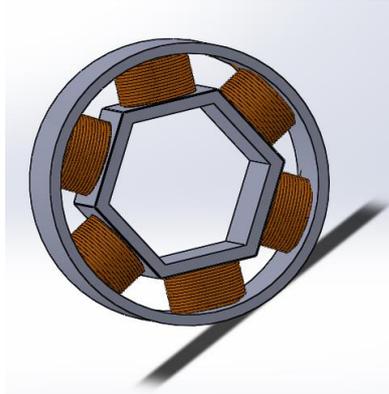
Este dispositivo tiene la ventaja de ser ligero, pequeño; lo cual resultó favorable para los intereses buscados.

Posteriormente se procedió a realizar el diseño de las partes que componen el generador.

**4.3.2 *Diseño del Generador basado en el dínamo.*** Se debe realizar la modelación de las partes más importantes como son el rotor, estator, eje y otras en SolidWorks; con la finalidad de facilitar la construcción del resto de componentes faltantes.

**4.3.2.1 *Estator.*** Consta de 6 bobinas ubicadas en un alojamiento hexagonal, separadas la misma distancia una de otra. El bobinado de cada polo, está diseñado de alambre de cobre de 0,3 mm de diámetro, y alrededor de unas 110 vueltas.

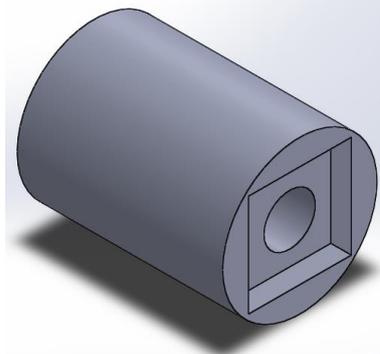
Figura 43. Estator



Fuente: Autores

**4.3.2.2 Rotor.** Con dimensiones de 40 mm de longitud, con un diámetro de 30 mm, es un imán permanente sólido construido en fábrica básicamente de ferrita (hierro  $\alpha$ ).

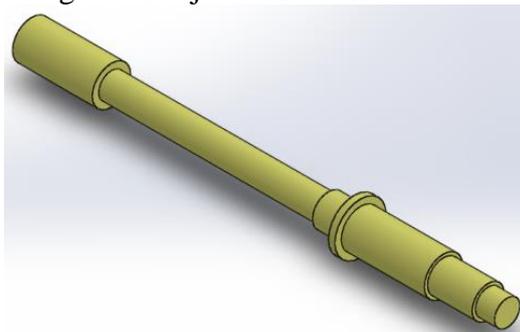
Figura 44. Rotor del Generador



Fuente: Autores

**4.3.2.3 Diseño del Eje.** Se diseñó un nuevo eje, en el cual se van a ubicar el rotor, la tuerca de sujeción del mismo, además se acoplará al eje del turbocargador, girando solidariamente entre estos. En su modelación se tiene variaciones de secciones, debido al elemento a montarse.

Figura 45. Eje del Generador



Fuente: Autores

**4.3.2.4 Rodamientos.** Los rodamientos seleccionados para el diseño del generador son los siguientes:

Tabla 7. Rodamientos seleccionados

| Marca | NTN Part | Diámetro Interno | Diámetro Externo | Ancho |
|-------|----------|------------------|------------------|-------|
| NTN   | 600C3    | 10 mm            | 26 mm            | 8 mm  |
| NTN   | 608C3/1E | 8 mm             | 22 mm            | 7 mm  |

Fuente: <http://www.ntnamericas.com/es/inicio>

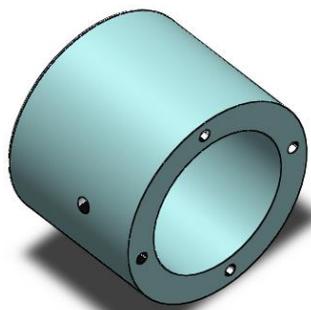
Estos servirán para equilibrar las cargas dinámicas, además de disminuir el rozamiento mecánico.

Estarán alojados en las carcasas, garantizando el centrado preciso del rotor, respecto al estator.

**4.3.2.5 Carcasas.** Se realizó el diseño de dos carcasas, una correspondiente al alojamiento del estator y la otra es complementaria a la anterior y a la vez sirve para el ensamble con el turbocompresor.

- *Carcasa Primaria.* Se ejecutó el diseño, tomando en cuenta las medidas del estator y el rodamiento de menor diámetro.

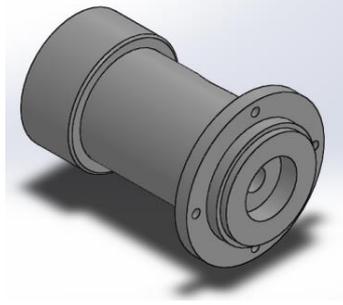
Figura 46. Carcasa Primaria



Fuente: Autores

- *Carcasa Secundaria.* La modelación de esta carcasa fue realizada en función a la primaria en la cual va acoplado el rodamiento de mayor diámetro, y de acuerdo a las dimensiones de la cubierta del rodete compresor del turbocargador. Además del espacio intermedio para la instalación de la entrada de aire.

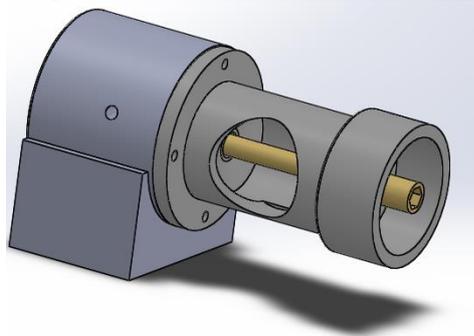
Figura 47. Carcasa Secundaria



Fuente: Autores

**4.3.2.6 Ensamblaje Final del Generador.** Se procedió a ensamblar todos los elementos previamente diseñados.

Figura 48. Generador Ensamblado



Fuente: Autores

#### 4.4 Cálculos en el sistema turbo generador

##### 4.4.1 Cálculos del generador.

**4.4.1.1 Calculo de torque.** Se determina el torque neto necesario para vencer la inercia en el rotor del generador de acuerdo a la ecuación:

$$T_n = \Sigma\tau \quad (15)$$

$$T_n = T_{f1} + T_{f2} + T_B$$

En donde:

$T_n$  = Torque neto en el generador, en N.m

$T_{f1}$  = Torque de coeficiente de fricción del rodamiento 1, en N.m

$T_{f2}$  = Torque de coeficiente de fricción del rodamiento 2, en N.m

$T_B$  = Torque magnético en el rotor del generador, en N.m

Se debe calcular previamente por separado los torques de fricción en los rodamientos.  
(Francisco, 2005)

$$T_{f1} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d \quad (16)$$

Dónde:

$\mu$  = Coeficiente de Fricción del rodamiento

$P$  = Carga dinámica en el rodamiento, en N

$d$  = Diámetro interior del rodamiento, en m

Se debe calcular el valor del torque en los dos rodamientos, para lo cual se calcula en primer lugar la carga dinámica en el rodamiento (P), mediante el uso de la siguiente fórmula:

$$P = m_a \cdot g \quad (17)$$

Dónde:

$m_a$  = masa acumulada en el eje del generador, en kg.

$g$  = gravedad, en  $\frac{m}{s^2}$ .

$$P = m_a \cdot g$$

$$P = (0,138 \text{ kg}) \cdot (9,806 \frac{m}{s^2})$$

$$P = 1,355 \text{ N}$$

Con los datos obtenidos, se calcula los torques  $T_{f1}$  y  $T_{f2}$ , con  $\mu = 0,0015$

$$T_{f1} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d$$

$$T_{f1} = 0,5 \cdot (0,0015) \cdot (1,355 \text{ N}) \cdot (8 \times 10^{-3} \text{ m})$$

$$T_{f1} = 8,13 \times 10^{-6} [\text{N} \cdot \text{m}]$$

$$T_{f2} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d$$

$$T_{f2} = 0,5 \cdot (0,0015) \cdot (1,355 \text{ N}) \cdot (0,01 \text{ m})$$

$$T_{f2} = 1,016 \times 10^{-5} [\text{N} \cdot \text{m}]$$

Se calcula el torque magnético, con la siguiente fórmula: (NILSON, 1995)

$$T_B = M \cdot B \quad (18)$$

Dónde:

$M$  = Momento magnético, en  $A \cdot m^2$

$B$  = Campo magnético, en  $T$

$$M = I \cdot A_{mag} \quad (19)$$

Dónde:

$I$  = Intensidad, en  $A$

$A_{mag}$  = Área del imán permanente, en  $m^2$

La intensidad usada es de 0,5 A, obtenida a 2500 RPM y 16 V del rotor del generador, siendo los valores máximos de estas magnitudes eléctricas medidas experimentalmente en el proceso de pruebas.

$$M = I \cdot A_{mag}$$

$$M = (0,5 \text{ A}) \cdot (7,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2)$$

$$M = 3,75 \times 10^{-3} [\text{A} \cdot \text{m}^2]$$

Se calcula el campo magnético, con la ecuación: (SADIKU, 1998)

$$B = \frac{E_{max}}{N_c \cdot A_{wire} \cdot \omega} \quad (20)$$

Dónde:

$E_{max}$  = Tensión generada a 2500 RPM del rotor, en V

$A_{wire}$  = Área del arrollamiento de las bobinas, en  $m^2$

$N_c$  = Número de espiras por número de bobinas

$\omega$  = Velocidad angular del rotor, en rad/s

$$B = \frac{E_{max}}{N_c \cdot A_{wire} \cdot \omega}$$

$$B = \frac{16 \text{ V}}{(110) \cdot (6) \cdot (4,7 \times 10^{-5} \text{ m}^2) \cdot (261 \text{ rad/s})}$$

$$B = 1,9 \text{ T} = 1,9 \text{ [N/A. m]}$$

Se calcula el torque magnético.

$$T_B = M \cdot B$$

$$T_B = (3,75 \times 10^{-3} \text{ A. m}^2) \cdot (1,9 \text{ N/A. m})$$

$$T_B = 7,3 \times 10^{-3} \text{ [N. m]}$$

Con todos los datos obtenidos, se procede a calcular el torque neto del generador.

$$T_n = T_{f1} + T_{f2} + T_B$$

$$T_n = (8,13 \times 10^{-6} + 1,016 \times 10^{-5} + 7,3 \times 10^{-3}) \text{ [N. m]}$$

$$T_n = 7,32 \times 10^{-3} \text{ [N. m]}$$

**4.4.2 Cálculos del Turbocompresor.** Se calculará únicamente el torque mecánico necesario para vencer la inercia del eje y los rodetes.

**4.4.2.1 Cálculo del torque.** Se determina el torque neto mínimo, con la sumatoria de torques.

$$T_n = \Sigma\tau \quad (21)$$

$$T_n = T_{f1} + T_{f2}$$

En donde:

$T_n$  = Torque neto en el turbocargador, en N.m

$T_{f1}$  = Torque de coeficiente de fricción del cojinete 1, en N.m

$T_{f2}$  = Torque de coeficiente de fricción del cojinete 2, en N.m

Se debe calcular primeramente los torques de fricción en los cojinetes del turbocompresor (Francisco, 2005)

$$T_{f1} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d \quad (22)$$

Dónde:

$\mu$  = Coeficiente de fricción del cojinete

$P$  = Carga dinámica en el rodamiento, en N

$d$  = Diámetro interior del rodamiento, en m

Se debe calcular la carga dinámica en el rodamiento (P).

$$P = m_a \cdot g \quad (23)$$

Dónde:

$m_a$  = masa acumulada en el eje del turbocompresor, en kg.

$g$  = gravedad, en  $\frac{m}{s^2}$

$$P = m_a \cdot g$$

$$P = (0,270 \text{ kg}) \cdot (9,806 \frac{m}{s^2})$$

$$P = 2,65 \text{ [N]}$$

Con los datos obtenidos, se calcula los torques  $T_{f1}$  y  $T_{f2}$ , con  $\mu = 0,02$

$$T_{f1} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d$$

$$T_{f1} = 0,5 \cdot (0,02) \cdot (2,65 \text{ N}) \cdot (4 \times 10^{-3} \text{ m})$$

$$T_{f1} = 1,06 \times 10^{-4} \text{ [N.m]}$$

$$T_{f2} = 0,5 \cdot \mu \cdot P \cdot d$$

$$T_{f2} = 0,5 \cdot (0,02) \cdot (2,65 \text{ N}) \cdot (6 \times 10^{-3} \text{ m})$$

$$T_{f2} = 1,59 \times 10^{-4} \text{ [N.m]}$$

Con todos los datos obtenidos, se procede a calcular el torque neto del turbocompresor, mediante:

$$T_n = T_{f1} + T_{f2}$$

$$T_n = (1,06 \times 10^{-4} + 1,59 \times 10^{-4}) \text{ [N.m]}$$

$$T_n = 2,65 \times 10^{-4} \text{ [N.m]}$$

**4.4.3** *Esfuerzo de torsión en el turbocompresor.* Se calcula el esfuerzo de torsión en el eje del turbocompresor, debido a la inercia del generador producida en su mayoría por el campo magnético entre el rotor y las bobinas.

El cálculo se realiza mediante la siguiente fórmula: (SHIGLEY, 1990)

$$\tau = \frac{16 \cdot T}{\pi(D^3 - d^3)} \quad (16)$$

Dónde:

$\tau$  = Esfuerzo de torsión, en MPa

$T$  = Torque en el eje del turbocompresor, en N.m

$D$  = Diámetro mayor del eje (lado de la turbina), en m

$d$  = Diámetro menor del eje (lado del compresor), en m

$$\tau = \frac{16 \cdot T}{\pi(D^3 - d^3)}$$

$$\tau = \frac{16 \cdot (7,32 \times 10^{-3} \text{ N.m})}{\pi((0,006 \text{ m})^3 - (0,004 \text{ m})^3)}$$

$$\tau = 0,11 \text{ [MPa]}$$

**4.5** *Diseño de la Unidad de Control de Voltaje.* Al realizar el acople del turbocompresor con el generador y con el accionamiento de los gases de escape, se generará electricidad, la cual se debe aprovechar, ya que es una corriente fluctuante, con picos ascendentes y descendentes, que debe ser filtrada, estabilizada y rectificada por medio de una unidad reguladora para posteriormente usarla para otras aplicaciones (Figura 49).

Esta unidad necesita de varios componentes electrónicos de precisión. En el mercado existen varios tipos de reguladores, los cuales varían en función de los propósitos que se desee.

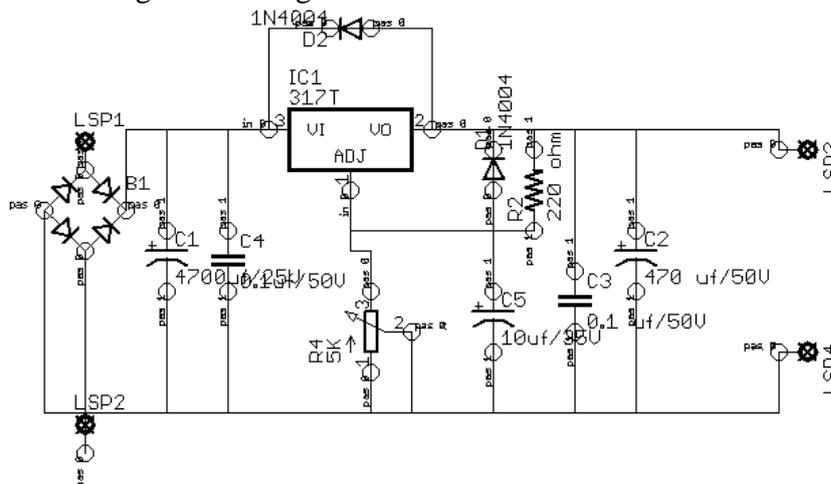
En este caso, se experimentó que el valor máximo es de 36 V AC, que es necesario rectificar a 36 V DC, el cual será variable mediante un potenciómetro. De acuerdo a estos requerimientos, se procedió a montar una fuente variable con el regulador LM 317T, el mismo que permite ajustar un amplio rango de voltaje (1,2 hasta 37 V), justificándose su elección por el rango de voltaje permisible. Para su construcción se utilizará los siguientes elementos.

- 1 puente de diodos, usado debido a su facilidad de rectificación de media onda a corriente continua, debido a que los consumidores eléctricos en el vehículo usan

esta corriente. El puente seleccionado soporta mínimo 2A, lo cual es satisfactorio en este caso (1 A máximo)

- 2 diodos 1N4004, para proteger el regulador contra posibles cortocircuitos, tanto a la entrada como a la salida
- 1 resistencia de 220 ohmios, para proteger una posible alteración de voltaje.
- 1 capacitor de 4700 uF/25 V, para filtrar la corriente en la entrada del regulador, suprimiendo los picos rizados del puente de diodos.
- 1 capacitores de 470 uF/50 V, ubicado a la salida del regulador.
- 1 capacitores de 470 uF/50 V, para filtrar la corriente que consumirá el LCD.
- 1 capacitor de 10 uF/35 V, con el propósito de mejorar la respuesta a transitorios en la salida del regulador.
- 1 display, utilizado para visualizar la magnitud de voltaje en corriente continua tanto de entrada, como de salida.
- 1 regulador de tensión L 7812 que permite alimentar de 12 V al display.

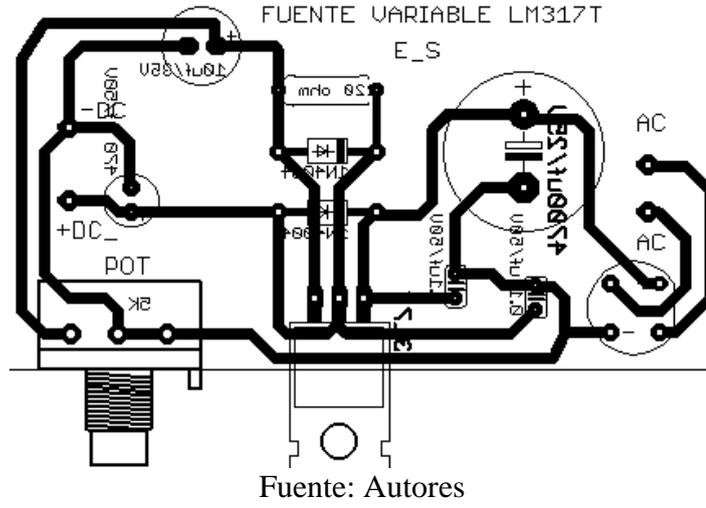
Figura 49. Diagrama de la Fuente con LM 317 T



Fuente: Autores

A estos elementos, se debe adicionar una baquelita, que se utilizará para imprimir las pistas internas para los contactos (Figura 50). Luego con la ayuda de un cautín se procederá a soldar los elementos electrónicos a la baquelita.

Figura 50. Valores de los elementos de la Fuente con LM 317 T



## CAPÍTULO V

### 5. IMPLEMENTACIÓN Y ENSAMBLAJE DE PARTES.

#### 5.1 *Construcción del Múltiple de Escape.*

**5.1.1** *Platina de Acople.* Para la construcción de este elemento, se utilizó platina laminada de acero ASTM A-36 de espesor de 12 mm, en la cual se procedió a realizar una operación de rectificado en la superficie que va en contacto con la culata, con el fin de evitar fugas de los gases de escape.

Figura 51. Platina de Acople



Fuente: Autores

**5.1.2** *Caños Principales del Múltiple.* Una vez diseñado, se procedió a construir los caños utilizando acero ASTM A-36, de una pulgada y media de diámetro, debido a la facilidad de adquisición en el mercado nacional, la relación coste/longitud y las propiedades mecánicas.

Figura 52. Construcción de los Caños Principales



Fuente: Autores

**5.1.3** *Caño Secundario del Múltiple.* Para su construcción se utilizó acero ASTM A-36, de dos pulgadas de diámetro.

Figura 53. Construcción del Caño Secundario



Fuente: Autores

Mediante una dobladora de tubos hidráulica, se facilitó el moldeo de los caños que componen el múltiple.

Además se usó una soldadura MIG para unir todo el múltiple.

Figura 54. Soldadora MIG



Fuente: Autores

**5.2** *Ensamblaje del sistema de sobrealimentación.* Una vez seleccionado el turbocompresor adecuado a los requerimientos del motor, se procedió a instalar el sistema, incorporando otros componentes necesarios en un sistema sobrealimentado, como son el múltiple de escape, turbocompresor, conductos de aire, intercooler y acoples. Algunos elementos necesitaban unirse mediante soldadura como los conductos

y el múltiple de escape, para esto se utilizó suelda tipo MIG, que permite un mejor acabado en las superficies a soldar.

Figura 55. Instalación del sistema de sobrealimentación



Fuente: Autores

Tabla 8. Elementos de la Sobrealimentación

| Elemento           | Material         | Dimensión         |
|--------------------|------------------|-------------------|
| Múltiple de Escape | Acero ASTM A-36  | 2,5 in x 40 in    |
| Intercooler        | Aluminio ER 4043 | 7 in x 7,5 in     |
| Acoples            | Caucho           | 2,5 in x 4 in     |
| Turbocompresor     | K18              | 7,24 in x 3,35 in |

Fuente: Autores

**5.3** *Instalación del sistema de lubricación y refrigeración del turbocompresor.* En el montaje, se debió adquirir elementos específicos para la lubricación y refrigeración, tales como: neoplos, acoples, cañerías reforzadas, mangueras y abrazaderas de presión.

En la lubricación se debió tomar una conexión desde el lugar donde va incorporado un medidor de temperatura de aceite para allí obtener la entrada de lubricante hacia el turbo, ya que en este punto se tiene presión de la bomba de aceite que lo impulsa hacia arriba. Para la salida o retorno de lubricante se procedió a perforar el depósito de aceite o cárter, en este punto no necesita presión, simplemente la acción de la gravedad deja descender el aceite desde las cámaras del turbocompresor.

Figura 56. Lubricación y Refrigeración del turbocompresor



Fuente: Autores

En la refrigeración, la toma de entrada se tomó desde un conducto del circuito de calefacción, el mismo que recibe presión desde la bomba de agua (debido a su cercanía y nivel), la salida o retorno se lo llevó directo a la caja del termostato, debido a la ausencia de contraflujo de refrigerante.

#### 5.4 *Construcción del Generador*

**5.4.1 Eje.** Se construyó el eje previamente diseñado en software, en acero bonificado AISI 4340, de 136 mm de longitud, el mismo que posee buena resistencia a la fatiga, excelente tenacidad y es resistente a los esfuerzos mecánicos.

Figura 57. Mecanizado del Eje



Fuente: Autores

#### 5.4.2 *Carcasas.*

**5.4.2.1 Primaria.** Se procedió a construir inicialmente en nylon, como prototipo. Posteriormente se construyó en aluminio, las mismas que fueron mecanizadas en torno, con dimensiones de 65 mm de longitud, 70 mm de diámetro externo y 58 mm de diámetro interno.

Figura 58. Carcasa primaria de Nylon y Aluminio



Fuente: Autores

**5.4.2.2 Secundaria.** Se construyó del mismo modo en nylon y aluminio para minimizar la transferencia de calor del turbocompresor hacia el generador, siendo mecanizadas en torno, con dimensiones de 94 mm de longitud y 56 mm de diámetro en el acople con la cubierta de la rueda compresora.

Figura 59. Carcasa Secundaria en Nylon y aluminio



Fuente: Autores

Una vez contruidos los respectivos elementos, se procedió a ensamblarlos.

Figura 60. Ensamblaje de las Carcasas



Fuente: Autores

**5.5 Construcción de la Unidad de Control de Tensión.** Para la construcción de la unidad de control se procedió a soldar los componentes electrónicos a la baquelita, con la ayuda de un cautín. Posteriormente se verificó las pistas mediante la utilización del multímetro en la escala de continuidad.

Figura 61. Unidad de Tensión



Fuente: Autores

**5.6** *Ensamblaje del generador al turbocompresor en el motor de combustión interna.* Una vez instalado el sistema de sobrealimentación, se procedió a acoplar el generador a la salida del turbo, mediante 4 prisioneros colocados a 90 grados, los mismos que deben ajustarse uniforme y progresivamente.

El generador está sellado por una cubierta de aluminio que hace más ligero su peso. El generador va acoplado al turbocompresor mediante un acople. El ingreso de aire sigue un camino creado por un collarín unido a una carcasa mayor del generador y a un acople de caucho, este último en contacto con el filtro de aire.

Figura 62. Ensamble del generador al turbocompresor



Fuente: Autores

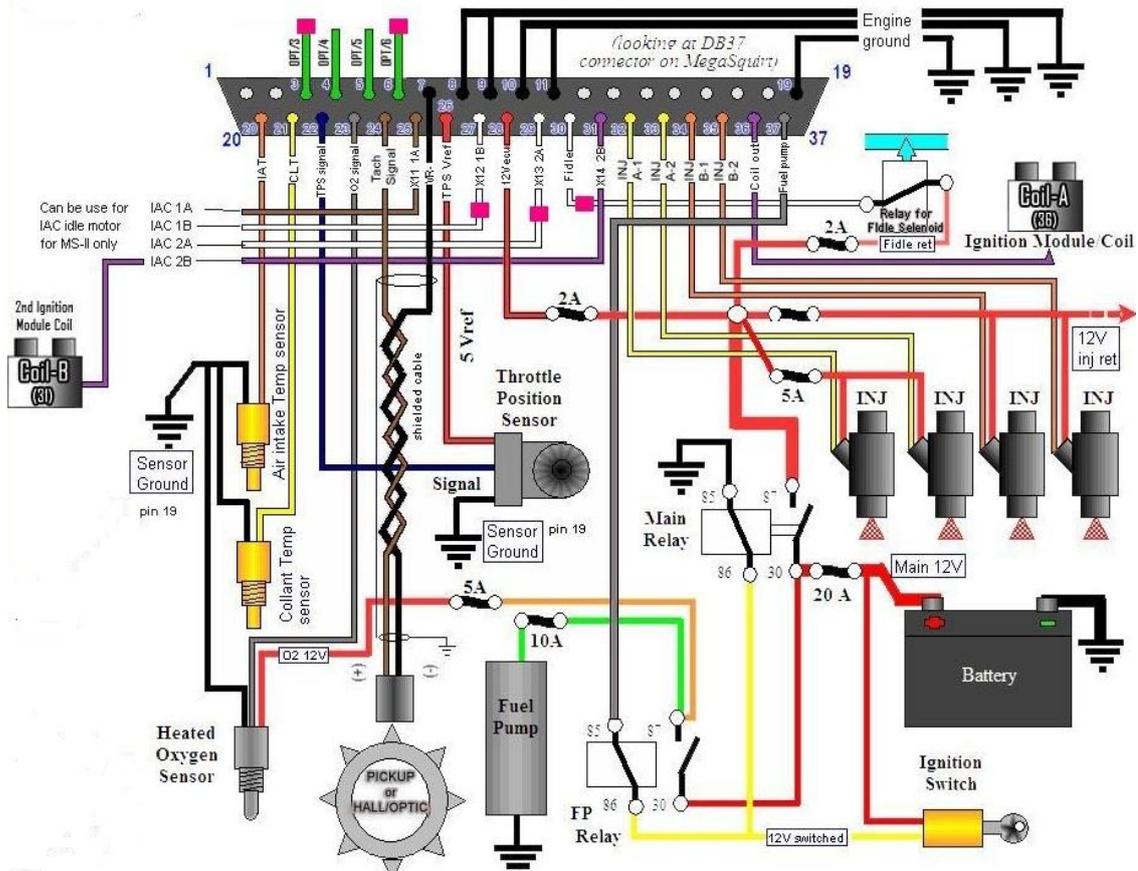
**5.7** *Verificación del motor con LE3-Jetronic.* Una vez que al motor se le completó todos los elementos necesarios faltantes, se puso en funcionamiento mediante una ECU estándar, la cual permitió comprobar el buen estado de algunos componentes mecánicos del motor.

En vista que varios elementos se encontraban en condiciones irregulares, pocos estaban en la posibilidad de ser reparados, pero otros obligatoriamente fueron reemplazados.

Para seguir con el proyecto, fue necesario reemplazar la ECU estándar, por una MegaSquirt II reprogramable, la misma que permite ajustar el pulso de inyección de combustible, de acuerdo a los requerimientos del turbocompresor en la instalación y funcionamiento en el motor.

**5.8** *Instalación de MegaSquirt II.* Luego de verificar el buen funcionamiento del motor, se dio paso a la instalación de una nueva unidad de control del motor (ECU programable MegaSquirt II).

Figura 63. MegaSquirt II V3.0



Fuente: MegaSquirtPR.com

El diagrama de la figura (Figura 64), permitió realizar una instalación completa de todos los sensores y actuadores.

Figura 64. Instalación de MegaSquirt II V3.0



Fuente: Autores

Se realizó las debidas conexiones desde los pines de salida de la MegaSquirt II, hacia los diferentes sensores, actuadores, fusibles y tacómetro.

El arnés original fue recubierto con manguera flexible corrugable, de modo que permita evitar posibles falsos contactos.

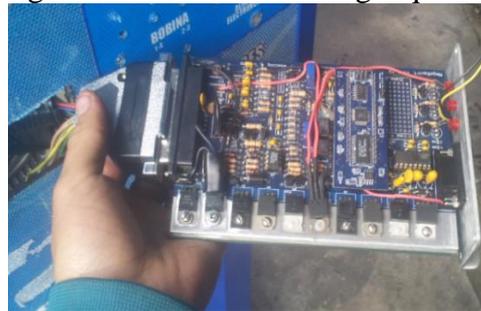
Figura 65. Instalación del arnés de la MegaSquirt II



Fuente: Autores

Una vez terminada la instalación se conectó la MegaSquirt II a su conector DB-37, dando así paso a la modificación de los parámetros de sistema de inyección y encendido.

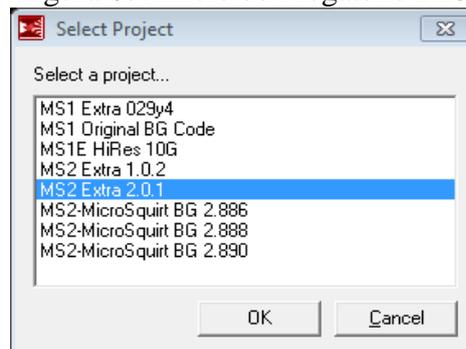
Figura 66. Conexión de MegaSquirt II



Fuente: Autores

**5.8.1** *Asignación de Parámetros Primarios a la ECU.* Se debe utilizar el software Megatune 2.25 p3, para iniciar la grabación de una nueva programación, ya que originalmente viene sin información.

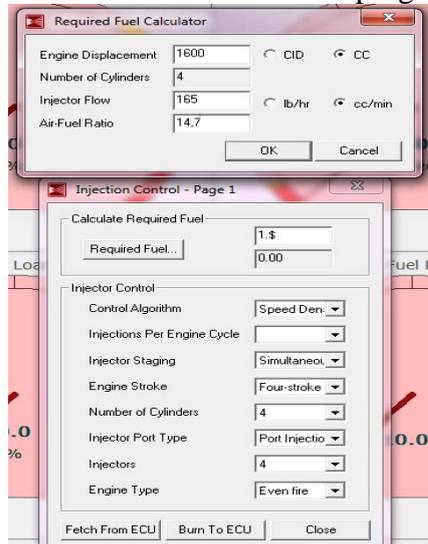
Figura 67. Inicio de Megatune 2.25



Fuente: Autores

Además es necesario un cable serial USB 2.0 a DB-9, para la comunicación entre ECU y PC, en la cual se va a asignar los parámetros iniciales de acuerdo a las características del sistema de inyección y encendido implementado en el motor (Figura 69).

Figura 68. Parámetros iniciales de programación



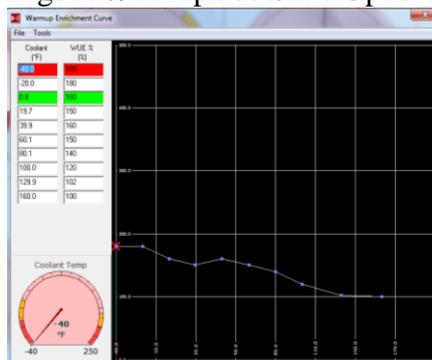
Fuente: Autores

**5.8.2 Modificación de los parámetros de inyección de la ECU.** El ajuste de varios parámetros en el sistema de inyección es indispensable.

Se puede modificar varios, pero entre los más importantes está el corte de inyección, ahorro de combustible en ralentí, arranque en frío, avance al encendido.

**5.8.2.1 Arranque en Frío.** Se procedió a modificar la cartografía mediante coordenadas en un plano, de modo que a una temperatura mínima, haya un mayor flujo de combustible hacia los cilindros.

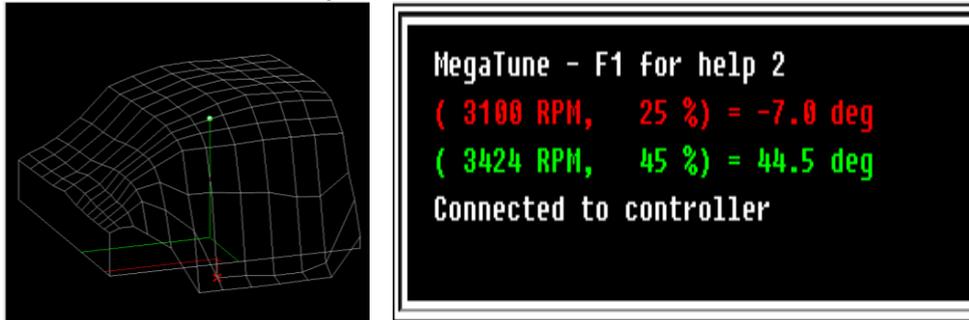
Figura 69. Mapa de Start-Up Idle



Fuente: Autores

**5.8.2.2 Avance al Encendido.** En función del régimen del motor, se calibra en el mapa utilizando comandos del teclado alfanumérico, el adecuado porcentaje del avance resulta en color verde para una calibración normal.

Figura 70. Avance al Encendido

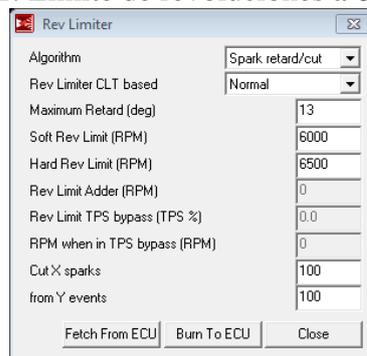


Fuente: Autores

**5.8.3 Programaciones de Funcionamiento.** Se realizó dos programaciones diferentes para el banco de pruebas, en función del régimen del MCI, mediante el corte de combustible y de chispa.

**5.8.3.1 Sistema de Sobrealimentación.** Se realizó una programación para la MS II basada en la implementación y funcionamiento del turbocompresor de acuerdo a sus características con un límite de 6500 RPM del motor. En esta modalidad el turbocompresor admite una carga de aire completa al MCI, llegando éste a su potencia deseada.

Figura 71. Límite de revoluciones a 6500 RPM

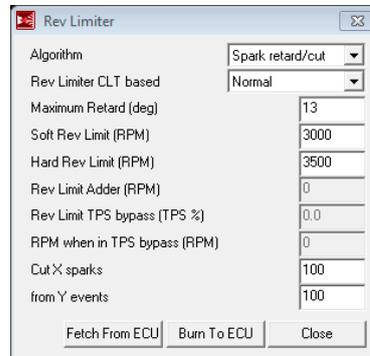


Fuente: Autores

**5.8.3.2 Sistema de Recuperación de Energía.** Se realizó una programación para la MegaSquirt II basada en la implementación y funcionamiento del sistema turbogenerador con un límite de 3500 RPM del motor, debido a la seguridad del

turbocompresor, ya que superado este régimen, se producen efectos perjudiciales para el mismo.

Figura 72. Límite de revoluciones a 3500 RPM



Fuente: Autores

En esta modalidad el dispositivo turbogenerador está en funcionamiento completo, regenerando energía así como sobrealimentando al motor, pese a que la carga de aire entregado por el rodete compresor no es el máximo.

**5.9** *Instalación de la unidad de control de tensión.* Una vez diseñado la unidad de control en los apartados anteriores, se procedió a ensamblar los respectivos elementos en un solo conjunto, que incorpora varios procesos eléctricos como: filtración, rectificación y regulación.

Para ello se utilizó varios componentes de electrónica de precisión.

Figura 73. Instalación del regulador de tensión



Fuente: Autores

Se procedió a incorporar todos los elementos en la baquelita, luego a ubicar el circuito en una caja de polipropileno, para evitar posibles cortocircuitos o desprendimientos de sus elementos. Una vez realizado esto, se ubicó en el tablero de control con algunos

elementos visibles como un potenciómetro, un interruptor y una pantalla LCD, que permite visualizar las magnitudes eléctricas de tensión obtenidas del sistema turbogenerador.

Figura 74. Regulador de tensión



Fuente: Autores

## CAPÍTULO VI

### 6. PRUEBAS EN EL BANCO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

#### 6.1 Plan de Pruebas

Para la comprobación del correcto funcionamiento del banco se realizaron varias pruebas.

En primer lugar se realizaron pruebas en el sistema de inyección y encendido electrónico, usando el multímetro.

Posteriormente con la incorporación de turbocompresor al motor, se realizó las respectivas pruebas de sobrealimentación.

Finalmente con la instalación del generador al turbocompresor se comprobó el comportamiento del sistema de recuperación de energía (ERS).

**6.1.1** *Pruebas electrónicas del sistema de inyección.* Las pruebas conllevan la medición de magnitudes eléctricas en los diferentes sensores y actuadores del motor con el uso del multímetro, además de la lectura de señales mediante la MegaSquirt conectada a la PC.

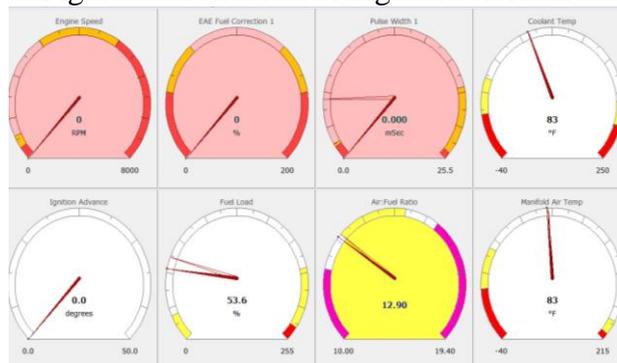
**6.1.1.1** *Prueba de sensores y actuadores.* Se procedió a medir las magnitudes en los terminales respectivos, en estado de KOEO Y KOER, las mediciones obtenidas se listan en el anexo C.

Con esto se verifica que la MegaSquirt está recibiendo todas las señales de sensores, y de la misma manera se están enviando señales hacia los actuadores. Lo que ratifica la correcta instalación del circuito del sistema de inyección y encendido electrónico.

**6.1.1.2** *Prueba de MegaSquirt.* Para comprobar el buen funcionamiento de la ECU reprogramable, se realizó la comunicación con una computadora portátil (PC), mediante el cable serial a USB DB-9 RS-232, con la respectiva instalación de sus drivers.

- *Prueba en KOEO.* Se realizó la prueba mediante simulación de sensores, tales como: TPS, ECT, MAP.
- Para la simulación de TPS se abrió la mariposa de gases, y se verificó en su respectivo gauge de Megatune su porcentaje de apertura.
- Al sensor ECT se conectó una resistencia de 200 ohmios, dando una lectura falsa a la ECU que la temperatura del refrigerante es superior a 90 °C activando el electroventilador.
- Para el sensor MAP, se procedió a realizar una succión en la manguera de vacío que va conectada a la MS II, experimentado en su respectivo gauge una variación de presión en función del nivel de succión.

Figura 75. Pantalla de Megatune en KOEO



Fuente: Autores

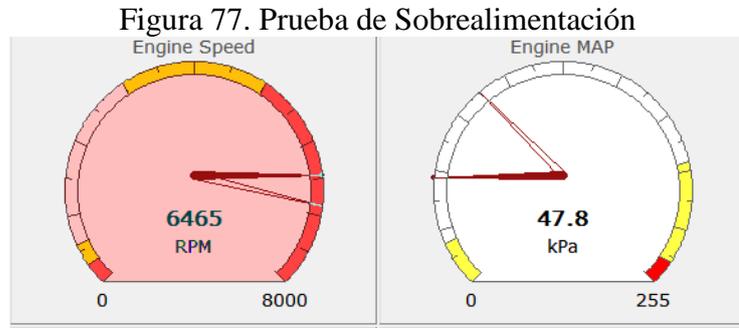
- *Prueba en KOER.* Se dio arranque y se visualizó en la PC, la lectura de revoluciones del motor, dadas por el sensor CKP, la cual es la más relevante para verificar el buen estado del sistema de encendido; además se corroboró el destello de los 3 LEDs rojos los cuales son visibles en la ECU.

Figura 76. Pantalla de Megatune en KOER



Fuente: Autores

**6.1.2 Pruebas en el sistema de sobrealimentación.** Para realizar la prueba de sobrealimentación, se procedió a medir la presión proveniente del sensor MAP de la MegaSquirt, y visualizándola con el programa Megatune; al variar el régimen se obtuvo diferentes valores de presión, que se detallan a continuación.



Fuente: Autores

**Tabla 9. Pruebas en el sistema de Sobrealimentación**

| Velocidad del motor<br>[rpm] | Presión<br>[Kpa] |
|------------------------------|------------------|
| 1500                         | 25,3             |
| 3500                         | 23,5             |
| 6500                         | 47,8             |

Fuente: Autores

**6.1.3 Pruebas en el sistema de recuperación de energía.** Para efectuar la prueba de recuperación de energía, se realizó el acoplamiento del generador al turbocompresor, luego se aumentó el régimen del motor, haciendo girar el sistema turbogenerador y generando energía eléctrica, la misma que fue visualizada en la pantalla LCD, arrojando los siguientes valores.

**Figura 78. Prueba de recuperación de energía**



Fuente: Autores

Tabla 10. Pruebas en el sistema de recuperación de energía

| Velocidad del motor [rpm] | Velocidad del turbogenerador [rpm] | Carga [V] |
|---------------------------|------------------------------------|-----------|
| 1500                      | 0                                  | 0         |
| 1850                      | 148                                | 0,5       |
| 2100                      | 484                                | 3,3       |
| 3000                      | 3672                               | 34,0      |

Fuente: Autores

Mediante el uso de un tacómetro analógico, se procedió a medir las revoluciones del dispositivo turbogenerador, al colocar el tacómetro en la salida del eje del generador y medir la magnitud de giro según el régimen deseado del MCI, además de visualizar el nivel de recuperación de energía en la pantalla LCD.

Figura 79. Mediciones de revoluciones del turbogenerador



Fuente: Autores

**6.1.4 Carga de la batería mediante el Turbo generador.** Con la tensión generada por el turbogenerador, se puede alimentar o acumular esta energía. Se realizó la prueba de carga a una batería de bajos requerimientos (12V y 3Ah), consiguiendo experimentar que el voltaje generado debe ser mayor a 12V, lo cual es necesario para recargar al acumulador.

Figura 80. Batería usada para la recuperación de energía



Fuente: Autores

Posteriormente se procedió a colocar un consumidor eléctrico, para lo cual se instaló un electroventilador de 12V y 350 mA, el que puede ser accionado mediante la energía generada o almacenada.

Además se probó con el equipo de audio convencional de un vehículo y puede ser útil para otros accesorios de bajo requerimientos eléctricos presentes en el habitáculo del automotor.

Figura 81. Prueba de Alimentación al Equipo de Audio



Fuente: Autores

## **6.2 Elaboración del manual de usuario**

Para el presente banco de pruebas de recuperación de energía se ha elaborado un manual de usuario con el objetivo de que el tutor efectúe las respectivas prácticas de laboratorio, el presente plan se encuentra en el anexo D.

## **6.3 Manual de mantenimiento del banco de pruebas**

Para el presente banco de recuperación de energía se ha implementado un plan de mantenimiento con el objetivo de que el equipo funcione en apropiadas condiciones y brinde confianza y seguridad tanto al tutor como a los estudiantes que se encuentran dentro del área de trabajo, el presente plan se encuentra en el anexo F.

## **6.4 Guía de prácticas del banco de pruebas.**

### **6.4.1 Recomendaciones generales:**

Revisar las guías de prácticas indicadas en el anexo E y seguir el procedimiento indicado.

Utilizar las herramientas adecuadas e instrumento adecuados para realizar las prácticas correspondientes.

Evitar posibles golpes o roturas de los elementos electrónicos del banco de pruebas.

Al poner en funcionamiento el banco de pruebas tener precaución en las piezas móviles externas del motor, además de las zonas propensas a alta temperatura.

## CAPÍTULO VII

### 7. COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

#### 7.1 Detalle de costos directos

Tabla 11. Costos del sistema mecánico

| <b>SISTEMA MECÁNICO</b> |  |   |   |                    |
|-------------------------|--|---|---|--------------------|
| Cantidad                | Detalle                                | Descripción   | Valor unitario<br>USD   | Valor total<br>USD |
| 1                       | Sistema de alimentación de combustible | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro de combustible</li> <li>- Mangueras de presión</li> <li>- Abrazaderas</li> <li>- Bomba de alimentación.</li> <li>- Microfiltros y Lavado de Inyectores</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>6,00</li> <li>15,00</li> <li>8,00</li> <li>35,00</li> <li>30,00</li> </ul>   | 94,00              |
| 1                       | Sistema de refrigeración               | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Tapón de Radiador</li> <li>- Mangueras de agua</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>8,00</li> <li>15,00</li> </ul>   | 23,00              |
| 1                       | Sistema de sobrealimentación           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Múltiple de Escape</li> <li>- Turbocompresor</li> <li>- Intercooler</li> <li>- Mangueras de acople</li> <li>- Tubos y abrazaderas</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>350,00</li> <li>600,00</li> <li>250,00</li> <li>80,00</li> <li>80,00</li> </ul>  | 1360,00            |
| 1                       | Sistema Generador                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Generador</li> <li>- Nylon</li> <li>- Aluminio</li> <li>- Acero</li> <li>- Mecanizado de Nylon</li> <li>- Mecanizado de Aluminio</li> <li>- Rodamientos</li> <li>- Base</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>40,00</li> <li>40,00</li> <li>60,00</li> <li>10,00</li> <li>70,00</li> <li>80,00</li> <li>8,00</li> <li>20,00</li> </ul> | 328,00             |
| 1                       | Repuestos motor                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Filtro de aire</li> <li>- Combustible</li> <li>- Aspas de ventilador</li> <li>- Riel armada</li> <li>- Aceite motor</li> <li>- Bayoneta medidora</li> </ul>                        | <ul style="list-style-type: none"> <li>30,00</li> <li>15,00</li> <li>20,00</li> <li>10,00</li> <li>40,00</li> <li>15,00</li> </ul>                              | 130,00             |
| 1                       | Sistema de arranque y encendido        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fusibles</li> <li>- Portafusibles</li> <li>- Bobina de Encendido</li> <li>- Motor de arranque</li> <li>- Batería</li> <li>- Alternador</li> </ul>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>5,00</li> <li>12,00</li> <li>60,00</li> <li>60,00</li> <li>75,00</li> <li>75,00</li> </ul>                               | 287,00             |
| <b>TOTAL</b>            |  |   | <b>2222,00 USD</b>  |                    |

Fuente: Autores

Tabla 12. Costos del sistema eléctrico

| <b>SISTEMA ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO</b> |                              |   |   |                 |
|--|------------------------------|---|---|-----------------|
| Cantidad                               | Detalle                      | Descripción   | Valor Unitario USD  | Valor total USD |
| 1                                      | Tablero de control           | - Switch de Encendido.  | 12,00   | 12,00           |
| 1                                      | Estructura de soporte        | - Mano de obra estructura<br>- Platinas   | 60,00<br>30,00  | 90,00           |
| 1                                      | Sistema Electrónico          | - ECU Estándar<br>- ECU Programable<br>- Sensor CKP<br>- Sensor EGO<br>- Sensor TPS<br>- Actuador IAC<br>- Cable Serial a USB DB-9 RS-232 | 120,00<br>850,00<br>45,00<br>48,00<br>30,00<br>35,00<br>20,00 | 1148,00         |
| 1                                      | Unidad de Control de Tensión | - Transformador de Tensión<br>- Rectificador<br>- Display<br>- Unidad de Ensamble   | 15,00<br>30,00<br>12,00<br>5,00                               | 62,00           |
| <b>TOTAL</b>                           |                              |   | <b>1312,00 USD</b>  |                 |

Fuente: Autores

|                        |                    |
|------------------------|--------------------|
| <b>COSTOS DIRECTOS</b> | <b>3534,00 USD</b> |
|------------------------|--------------------|

## 7.2 Detalle de costos indirectos

Tabla 13. Costos indirectos

| Detalle      | Valor             |
|--------------|-------------------|
| Transporte   | 100,00            |
| Varios       | 50,00             |
| <b>TOTAL</b> | <b>150,00 USD</b> |

Fuente: Autores

|                          |                   |
|--------------------------|-------------------|
| <b>COSTOS INDIRECTOS</b> | <b>150,00 USD</b> |
|--------------------------|-------------------|

## 7.3 Costos totales

Tabla 14. Costos totales

|                          |                    |
|--------------------------|--------------------|
| <b>Costos directos</b>   | 3534,00            |
| <b>Costos indirectos</b> | 150,00             |
| <b>TOTAL</b>             | <b>3684,00 USD</b> |

Fuente: Autores

## **CAPÍTULO VIII**

### **8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **8.1 Conclusiones**

Se estudió acerca del desarrollo y funcionamiento de los turbocompresores en los motores a gasolina.

Con la sobrealimentación mediante turbocargador se logró compensar la pérdida de presión atmosférica, además de mejorar la eficiencia volumétrica del motor.

Con la implementación de la MegaSquirt se logró ajustar los parámetros necesarios para un buen funcionamiento del motor.

Con la implementación del sistema turbogenerador se experimentó la recuperación y transformación de la energía.

Mediante el turbogenerador se obtuvo energía eléctrica, necesaria para alimentar diversos accesorios o a su vez esta poder ser acumulada.

#### **8.2 Recomendaciones**

Antes de poner en funcionamiento el motor, se debe verificar los niveles óptimos de los fluidos.

No se debe sobre revolucionar el motor, al estar instalado el sistema turbogenerador, por seguridad del mismo.

Realizar el mantenimiento del banco en los días indicados y cumplir con los trabajos mencionados en el plan de mantenimiento.

Utilizar el aditivo para arranque en frío, para poner en marcha el motor sin necesidad de forzar los elementos mecánicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, J.M. 2003.** *Técnicas del Automóvil*. Madrid : Thompson-Paraninfo, 2003. pág. 567. 179-190.
- BOHNER, Max. 1985.** *Tecnología del Automóvil*. 20. Barcelona : Reverté, 1985. pág. 698. Vol. 2, Edición alemana.
- COSTA, Joan. 2014.** *Interaccion Electromagnetica Teoria Clasica*. r. Barcelona : Reverte S.A., 2014. pág. 569.
- DÍAZ OLMO, J.M. 2014.** Explicando el ERS segunda parte. *CaranddrivertheF1.com*. [En línea] 04 de Julio de 2014. [Citado el: 2015 de 09 de 24.] <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2014/07/04/93751-explicando-el-ers-segunda-parte>.
- DOMENECH, Eugenio. 2011.** Así funciona el ERS. *Diariomotor.com*. [En línea] 19 de Julio de 2011. <http://www.diariomotor.com/tecmovia/2011/07/19/asi-funciona-el-ers/>.
- GIL, Hermogenes. 1999.** *Manual del Automovil: El motor Diesel*. 3. Madrid : Cultural S.A, 1999. pág. 479.
- GUTIÉRREZ, Lyan Rodrigo. s.f.** Inyeccion Electrónica. *Scribd.com*. [En línea] s.f. [Citado el: 20 de Agosto de 2015.] <http://es.scribd.com/doc/52806821/Inyeccion-electronica#scribd>.
- HERNÁNDEZ, Jorge Luis. 2010.** Academia.edu. *Academia.edu*. [En línea] 2010. [Citado el: 01 de Septiembre de 2015.] [http://www.academia.edu/6357347/Trabajo\\_de\\_Tesis\\_en\\_Ing.\\_Electr%C3%B3nica\\_-\\_DISE%C3%91O\\_E\\_IMPLEMENTACI%C3%93N\\_DE\\_UNA\\_ECU\\_PARA\\_CONTR\\_OLAR\\_EL\\_DESEMPE%C3%91O\\_DE\\_UN\\_MOTOR\\_DE\\_COMBUSTI%C3%93N\\_I\\_NTERNA](http://www.academia.edu/6357347/Trabajo_de_Tesis_en_Ing._Electr%C3%B3nica_-_DISE%C3%91O_E_IMPLEMENTACI%C3%93N_DE_UNA_ECU_PARA_CONTR_OLAR_EL_DESEMPE%C3%91O_DE_UN_MOTOR_DE_COMBUSTI%C3%93N_I_NTERNA).
- HONEYWELL, International. 2012.** Garrett. *Garret*. [En línea] Honeywell International, 3 de Junio de 2012. [Citado el: 20 de Julio de 2015.] <https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/sites/default/files/PDF/Turbo%20Tech%20103.pdf>.
- KINDLER, Handles. 1986.** *Matemática aplicada para la técnica del automóvil*. [trad.] José Company. Octava. Barcelona : Reverté, 1986. ISBN-84-291-1443-2.
- MARÍN, Joan Antoni Ros. 2011.** *Sistemas Electricos de Seguridad y Confortabilidad*. 2. Madrid : Paraninfo, 2011. pág. 593.
- MEGAMANUAL. 2015.** Megamanual.com. [En línea] 01 de Enero de 2015. [Citado el: 25 de Agosto de 2015.] <http://www.megamanual.com/v22manual/mintro.htm>.

**MEGANEBOY, Dani. 2014.** Alternador-Reg. *Aficionadosalamecanica.net*. [En línea] 2014. [Citado el: 10 de Junio de 2015.]  
<http://www.aficionadosalamecanica.net/alternador-reg.htm>.

**MILLER, Jay. 2008.** *Turbo Real Word High- Perfomance Turbocharger Systems*. 2. s.l. : S.A. Design, 2008. pág. 435.

**NILSON, James. 1995.** *Circuitos Eléctricos*. [trad.] Morales Ernesto. 4. Wilmington : Addison-Wesley Iberoamericana, 1995. pág. 981. ISBN 0-201-60101-X.

**OROVIO, Manuel. 2010.** *Tecnología del Automóvil*. s.l. : Paraninfo, 2010.

**RILEY- BEAIRD. s.f.** *Maxim Silencers, Manual para Petroecuador Model M21*. s.f.

**SADIKU, M.N.O. 1998.** *Electromagetismo*. 3. Filadelfia : Continental, 1998. pág. 430.

**SHIGLEY, Joseph Edward. 1990.** *Diseño en Ingeniería Mecánica*. [trad.] Francisco Paniagua. 5. Bogotá : Mc Graw Hill, 1990. pág. 882. ISBN 968-442-778-7.

**TARINGA. 2008.** Taringa.net. *Taringa.net*. [En línea] 2008.  
<http://www.taringa.net/posts/autos-motos/2221920/Megasquirt---Inyeccion-electronica-Home-Made.html>.