

**ANALISIS MATEMATICO DE LA VIABILIDAD TECNICA PARA LA  
MODIFICACION DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA A AIRE  
COMPRIMIDO PARA UN AUTOMOVIL DE USO URBANO EN LA CIUDAD  
DE BOGOTA D.C.**

**DIRECTOR DEL PROYECTO: ING. IVAN DARIO GOMEZ  
ASESOR DEL PROYECTO: Msc. ING. GILBERTO ENCINALES**

**PRESENTADO POR: OSCAR EDUARDO PATAQUIVA JIMENEZ  
IVAN IGNACIO LARA PUENTES**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA, 2008**

**ANALISIS MATEMATICO DE LA VIABILIDAD TECNICA PARA LA  
MODIFICACION DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA A AIRE  
COMPRIMIDO PARA UN AUTOMOVIL DE USO URBANO EN LA CIUDAD  
DE BOGOTA D.C.**

**NUMERO DEL PROYECTO: 732-865.**

**OSCAR EDUARDO PATAQUIVA JIMENEZ  
IVAN IGNACIO LARA PUENTES**

**PROYECTO DE GRADO PRESENTADO COMO PRERREQUISITO PARA  
OBTENER EL TITULO DE INGENIERO MECANICO**

**DIRECTOR:  
IVAN DARIO GOMEZ**

**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
INGENIERIA MECANICA  
BOGOTA, 2008**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

Jurado

---

Jurado

Bogota 03 de Octubre de 2008

## **AGRADECIMIENTOS**

- A Dios por ser nuestro guía en todos nuestros caminos a nivel profesional y personal.
- A nuestras familias por ser nuestro punto máximo de apoyo y motivación durante toda nuestra carrera.
- Al grupo de ingenieros profesores del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Libre, quienes con su labor de enseñanza de cada una de sus cátedras, nos dieron las bases académicas necesarias para ejercer nuestra profesión en cualquier campo de acción.
- A nuestros amigos y compañeros, quienes nos acompañaron en muchas alegrías y tristezas durante nuestra carrera y que por ende dejaron una huella imborrable en nuestras vidas.
- A empresas como Hidrotest y GM Colmotores por su asesoría y apoyo en varias etapas de la realización de nuestro proyecto.

## TABLA DE CONTENIDO

GLOSARIO .....	13
INTRODUCCIÓN .....	15
1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	16
2. JUSTIFICACIÓN .....	17
3. DELIMITACIÓN.....	18
4. OBJETIVOS .....	19
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
5. RECOPIACIÓN DEL TRABAJO DESARROLLADO PREVIAMENTE EN LA UNIVERSIDAD LIBRE Y ANTECEDENTES MUNDIALES .....	20
5.1 EMPALME DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LOS GRUPOS DE ESTRUCTURA, CARROCERÍA Y ERGONOMÍA.....	20
5.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS RELACIONADOS CON EL PROYECTO .....	21
5.2.1 Conversión de un Motor de Gasolina 2T a Aire Comprimido .....	22
5.2.2 Motor Regusci .....	24
5.2.2.1 Descripción del motor .....	24
5.2.2.2 Datos técnicos sobre el motor.....	26
5.2.3 Motor MDI .....	28
6. SELECCIÓN DEL MODELO A SEGUIR SEGÚN INVESTIGACIÓN..	31
6.1 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS PARA LA SELLECCION DEL MODELO A SEGUIR.....	31
6.1.1 Requerimientos del Cliente.....	32
6.1.2 Requerimientos de Diseño.....	33

6.2	RECOPIACION DE LAS CARACTERISTICAS TECNICAS DE ALGUNOS VEHICULOS VENDIDOS EN LA CIUDAD.....	35
6.3	FICHA TÉCNICA MODELO ESCOGIDO PARA EL ANÁLISIS .....	39
6.4	CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR ESCOGIDO PARA EL ANÁLISIS .....	43
7.	DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TECNICA DEL PROYECTO	44
7.1	ANALISIS ESTÁTICO .....	44
7.1.1	Calculo de Torque a 3200 rpm y 35 HP .....	44
7.1.2	Calculo de Torque Máximo.....	45
7.1.3	Calculo de Presión .....	46
7.1.3.1	Presión obtenida para 3200 rpm.....	47
7.1.3.2	Presión obtenida para 5400 rpm.....	48
7.1.4	Calculo de Potencia Requerida para Condiciones Extremas .....	49
7.2	ANALISIS TERMODINAMICO.....	54
7.2.1	Proceso 1-2 Isoentrópico.....	55
7.2.2	Proceso 2-3 Isocórico.....	56
7.2.2.1	Análisis Estequiométrico .....	56
7.2.3	Proceso 3-4 Isoentrópico.....	59
7.2.4	Proceso 4-1 Isoentrópico.....	60
7.3	ANALISIS DINAMICO .....	60
7.3.1	Polígono de Aceleraciones.....	64
7.3.2	Polígono de Fuerzas .....	68
7.4	CALCULO DE AUTONOMÍA.....	81
8.	PARAMETROS, MODIFICACIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL MOTOR ESCOGIDO .....	91
9.	ESTUDIO FINANCIERO .....	93
10.	CONCLUSIONES.....	95
11.	BIBLIOGRAFIA.....	96
12.	INFOGRAFIA.....	97

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. DETERMINACION DE LA RELEVANCIA DE LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE .....	32
Tabla 2. DETERMINACION DEL PARAMETRO DE DISEÑO CON MAYOR RELEVANCIA PARA LA SELECCIÓN DEL MODELO A SEGUIR .....	34
Tabla 3. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS CARROS HATCHBACK MAS UTILIZADOS EN BOGOTÁ.....	37
Tabla 4. POTENCIA REQUERIDA .....	53
Tabla 5. ACELERACIONES DEBIDAS A LOS ANGULOS DE POSICION DEL MECANISMO.....	76
Tabla 6. TORQUE $T'_s$ DEBIDO A LAS FUERZAS EN EL PISTON.....	78
Tabla 7. TORQUE $T''_s$ DEBIDO A LAS FUERZAS EN LA BIELA.....	79
Tabla 8. TORQUE TOTAL $T_s$ .....	79
Tabla 9. RELACIONES DE CAJA.....	81
Tabla 10. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 3200 RPM EN EL MOTOR	83
Tabla 11. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 1000 RPM EN EL MOTOR	86
Tabla 12. AUTONOMIA DEL VEHICULO PARA 1000 RPM EN EL MOTOR	87
Tabla 13. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 2000 RPM EN EL MOTOR	87
Tabla 14. AUTONOMIA DEL VEHICULO PARA 2000 RPM EN EL MOTOR	88
Tabla 15. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 3000 RPM EN EL MOTOR	89
Tabla 16. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 3000 RPM EN EL MOTOR	90
Tabla 17. VALOR COMERCIAL ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA SIGUIENTE ETAPA DEL PROYECTO.....	94

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Motor de Aire Comprimido Desarrollado en Palma de Mallorca ....	24
Figura 2. Motor Regusci.....	25
Figura 3. Motocicleta Propulsada por Aire Comprimido.....	27
Figura 4. Automóvil Propulsado por Aire Comprimido .....	28
Figura 5. Automóvil MDI Cat´s .....	29
Figura 6. Motor MDI Cat´s .....	31
Figura 7. Vehículo con Carrocería Hatchback .....	36
Figura 8. Ficha Técnica Chevrolet Spark .....	41
Figura 9. Curva Característica del Motor del Chevrolet Spark .....	43
Figura 10. Fuerzas Actuantes en el Sistema .....	47
Figura 11. Diagrama de Cuerpo Libre para Plano Inclinado .....	49
Figura 12. Peso Vs Potencia Requerida .....	53
Figura 13. Ciclo Otto en Coordenadas P-V y T-S .....	54
Figura 14. Fuerzas que Actúan sobre el Mecanismo Biela Manivela.....	61
Figura 15. Polígono de aceleraciones.....	64
Figura 16. Fuerzas actuantes en el sistema .....	66
Figura 17. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo biela-manivela.....	67
Figura 18. Polígono de Fuerzas.....	68
Figura 19. Relación geométrica para cálculo de torque .....	69
Figura 20. Fuerzas actuantes en la biela .....	71
Figura 21. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo biela-manivela.....	72
Figura 22. Polígono de Fuerzas.....	73
Figura 23. Relación geométrica para cálculo de torque .....	74
Figura 24. Diagrama de Cuerpo Libre para Cálculo de Torque .....	75
Figura 25. Presión vs. Ángulo del cigüeñal.....	77
Figura 26. Torque vs. Ángulo del cigüeñal.....	80
Figura 27. RPM vs. Velocidad en la rueda para 3200 rpm en el motor.....	83
Figura 28. RPM vs. Velocidad en la rueda para 1000 rpm en el motor.....	86
Figura 29. RPM vs. Velocidad en la rueda para 2000 rpm en el motor.....	88
Figura 30. RPM vs. Velocidad en la rueda para 3000 rpm en el motor.....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS

**Pot: Potencia**

**T: Torque**

**$\omega$ : Velocidad Angular**

**N: Revoluciones por minuto**

**V: Volumen**

**A: Área**

**D: Diámetro**

**h: Altura**

**$V_{\max}$ : Flujo volumétrico máximo**

**$V_{\text{prom}}$ : Flujo volumétrico promedio**

**R.: Fuerza resultante**

**$R_x$ : Fuerza resultante en X**

**$R_y$ : Fuerza resultante en Y**

**F: Fuerza**

**P: Presión**

**$F_a$ : Fuerza de arranque**

**$F_N$ : Fuerza normal**

**$F_r$ : Fuerza de rozamiento**

**W: Peso**

**$\mu_{\text{ROD}}$ : Coeficiente de rodadura**

**$T_r$ : Torque en la rueda**

**$T_c$ : Torque en la caja**

**$T_m$ : Torque en el motor**

**d:** Distancia

**$R_{\text{rueda}}$ :** Radio de la rueda

**$Pot_{\text{REQ}}$ :** Potencia requerida

**T:** Temperatura

**K:** Exponente adiabático

**AC:** Relación aire-combustible

**CA:** Relación combustible-aire

**q:** Calor

**$C_v$ :** Capacidad calorífica a volumen constante

**$r_s$ :** Relación de compresión

**$W_{\text{neto}}$ :** Trabajo neto

**$\eta_T$ :** Eficiencia térmica

**C:** Carrera

**L:** Longitud

**I:** Momento de inercia

**$A_b$ :** Aceleración en b

**$A_a$ :** Aceleración en a

**R:** radio de giro del cigüeñal

**$A_g$ :** Aceleración del centro de gravedad

**$\alpha$ :** Aceleración angular

**$F_o$ :** Fuerza de inercia

**$F_4$ :** Fuerza resultante en el pistón

**$F_{x-x}$ :** Fuerzas ejercidas por un elemento sobre otro

**T's:** Torque generado por las fuerzas actuantes en el pistón

**T''s:** Torque generado por las fuerzas actuantes en la biela

**Ts:** Torque en el cigüeñal

**$n_{\text{motor}}$ :** Revoluciones por minuto en el motor

**$n_{\text{rueda}}$ :** Revoluciones por minuto en la rueda

**$n_{\text{caja}}$ : Revoluciones por minuto en la caja**

**$n_{\text{eje}}$ : Revoluciones por minuto en el eje**

**$rc$ : relación de transmisión en la caja**

**$re$ : relación de transmisión en el eje**

**$m$ : Flujo másico**

**$V$ : Flujo Volumétrico**

**$V_{\text{Rueda}}$ : Velocidad en la rueda**

**$P_{\text{servicio}}$ : Presión de servicio**

**$V_{\text{almacenamiento}}$ : Volumen de almacenamiento**

**$P_{\text{ALM}}$ : Presión de almacenamiento**

**$V_{\text{maxALM}}$ : Volumen máximo de almacenamiento**

**$V_{\text{minALM}}$ : Volumen máximo de almacenamiento**

**$t_{\text{carga}}$ : Tiempo de duración de la carga**

**AUT: Autonomía**

# **ANALISIS MATEMATICO DE LA VIABILIDAD TECNICA PARA LA MODIFICACION DE UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA A AIRE COMPRIMIDO PARA UN AUTOMOVIL DE USO URBANO EN LA CIUDAD DE BOGOTA**

*OSCAR EDUARDO PATAQUIVA JIMENEZ  
IVAN IGNACIO LARA PUENTES*

## **RESUMEN**

El proyecto de investigación análisis matemático de la viabilidad técnica para la modificación de un motor de combustión interna a aire comprimido para un automóvil de uso urbano en la ciudad de Bogotá se desarrolla con el objeto de proponer una alternativa de transporte vehicular en nuestra ciudad que no requiera de combustibles fósiles para su funcionamiento. Además la idea de analizar la viabilidad de este proyecto se basa en confirmar la compatibilidad de las condiciones atmosféricas y viales de la ciudad con respecto a los parámetros mínimos de diseño del motor, por medio de un modelamiento matemático basado en análisis estáticos, dinámicos, termodinámicos y neumáticos.

## **PALABRAS CLAVES**

Aire comprimido, Motor, Fuerza, Presión, Torque, Potencia, Estática, Dinámica, Termodinámica, Autonomía.

## **ABSTRACT**

The investigation project mathematical analysis of the technical viability for the modification of an internal combustion engine to compressed air for a urban car use in Bogotá are developed in order to proposing an alternative of vehicular transport in our city that doesn't require of fossil fuels for their operation. Also the idea of analyzing the viability of this project is based on confirming the compatibility of the atmospheric conditions and roads conditions of the city with regard to the minimum parameters of the motor design, by means of a mathematical modeling based on static, dynamic, thermodynamic and pneumatic analysis.

## **KEYWORDS**

Compressed air, Engine, Force, Pressure, Torque, Power, Static, Dynamics, Thermodynamics, Autonomy.

## GLOSARIO

**Adiabática:** En termodinámica se designa como proceso adiabático a aquel en el cual el sistema (generalmente, un fluido que realiza un trabajo) no intercambia calor con su entorno.

**Carburante:** Mezcla de hidrocarburos que se emplea en los motores de explosión y de combustión interna.

**Cigüeñal:** Doble codo en el eje de ciertas máquinas que transforma el movimiento rectilíneo en circular o a la inversa.

**Embrague:** Mecanismo dispuesto para que un eje participe o no en el mecanismo de otro.

**Entropía:** Función termodinámica que es una medida de la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema o materia. Además se considera como una medida del desorden molecular de una materia o sustancia.

**Estequiométrico:** Parte de la Química que trata sobre las relaciones cuantitativas entre los elementos y los compuestos en reacciones químicas.

**Inyector:** Dispositivo que permite introducir a presión un líquido o un gas en una cavidad.

**Isocórico:** Se da cuando el volumen no cambia, o sea a volumen constante. Es decir, en un proceso Isocórico no hay trabajo realizando por el sistema. Y no se adiciona calor al sistema que ocasione un incremento de su energía interna.

**Isoentropico, Isotérmico:** Es un proceso en el cual la temperatura permanece constante durante la operación. La energía interna de un gas es función de la temperatura exclusivamente.

**Manivela:** Palanca doblada en ángulo recto que unida a un eje sirve para accionar un mecanismo.

**Manómetro:** Instrumento para medir la presión de los líquidos y gases.

**Presurizado:** Mantenimiento de la presión atmosférica de un recinto a niveles normales para los humanos, independientemente de la presión exterior.

**Tracción:** En el cálculo de estructuras e ingeniería se denomina tracción al esfuerzo a que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

**Transmisión:** Se denomina transmisión mecánica a un mecanismo encargado de transmitir potencia entre dos o más elementos dentro de una máquina

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto es realizado bajo la conducción y asesoría del Msc. Ing. Gilberto Encinales y la dirección del Ing. Iván Darío Gómez, en el cual se busca determinar la viabilidad de convertir un motor de combustión de un automóvil de uso urbano, a un motor de aire comprimido que funcione bajo las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá. Teniendo en cuenta que en la actualidad los esfuerzos de la tecnología están enfocados al desarrollo de energías alternativas que puedan suplir la inminente escasez de petróleo en el mundo, se toman como punto de referencia los antecedentes encontrados acerca de vehículos que funcionan por medio de motores de aire comprimido o en su defecto que fueron diseñados con el sistema de motores híbridos, para condiciones atmosféricas y viales de determinadas ciudades a nivel mundial.

En el transcurso del análisis del proyecto se identifica que en la ciudad de Bogotá existe una gran variedad de modelos de automóviles diseñados específicamente para el uso urbano, por lo tanto era indispensable realizar una consulta con el fin de recopilar la información técnica de la mayoría de los vehículos y así poder escoger el que más se acercara a los requerimientos de potencia, velocidad y dimensión planteados inicialmente, para que este sea el modelo a seguir en el proyecto.

Tomando como marco de referencia los datos obtenidos en la consulta anteriormente citada, se procede a realizar el estudio de la viabilidad del proyecto, a través de un análisis matemático en el que se analiza el comportamiento del motor desde el punto de vista estático, dinámico, termodinámico y de autonomía.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La problemática que se está presentando hoy en día con los combustibles fósiles hace necesario buscar fuentes alternativas de energía para ser implementadas de la misma manera que éstos.

Los problemas que se presentan son diversos y afectan a la población mundial, problemas como la contaminación por los gases que se generan a raíz de la combustión y que son causa del efecto invernadero, efecto que ocasiona el incremento de la temperatura del planeta afectando las diversas formas de vida; o problemas como los altos costos que tienen, si nos situamos en un país como Colombia, en donde se presentan incrementos muy seguidos, hace suponer que a futuro resultaría imposible mantener un vehículo cuya fuente de energía sean los combustibles fósiles. Y quizás uno de los problemas que más preocupa al sector industrial es la falta de reservas energéticas de este tipo y la degradación de las mismas lo cual obliga a pensar que la implementación de energías alternativas dejara de ser una opción y se convertirá en una necesidad, de hecho este fenómeno ya se está presentando.

Es precisamente en este punto que se basa este proyecto y con el desarrollo del motor de aire comprimido para las condiciones descritas en el título del presente, es evidente que los problemas enunciados con anterioridad estarían resueltos en gran parte ya que la fuente de energía que se pretende implementar es económica y limpia.

Es importante tener en cuenta la norma creada por la superintendencia de industria y comercio para la creación de combustibles ecológicos ya que en ésta se encuentran los parámetros que se deben seguir para su elaboración.

## 2. JUSTIFICACIÓN

Determinando la viabilidad de modificar un motor de combustión interna a aire para mover un automóvil diseñado para las condiciones de Bogotá D. C desde el punto de vista matemático, se puede incluir otra alternativa de solución a las condiciones ambientales de la ciudad y la escasez de combustibles fósiles actual, a la vez se colabora con la movilidad de la ciudad de forma eficiente.

Además de las razones citadas anteriormente, vale la pena indicar que mediante el desarrollo de este proyecto, es factible que muchos habitantes de la ciudad logren tener acceso a este tipo de vehículo y se vean beneficiados con un precio inferior al de los prototipos que funcionan con energías alternativas existentes en el comercio actual y sin dejar a un lado las ventajas de mantenibilidad y confiabilidad que relacionan las características de este automóvil.

Es importante resaltar que la entidad involucrada en este proyecto, en este caso la Universidad Libre, cuenta con los equipos, materiales, presupuesto y personal necesarios para llevarlo a cabo y obtener los mejores resultados.

### **3. DELIMITACIÓN**

Este proyecto se compromete a presentar una propuesta técnica en cuanto a la modificación de un motor de combustión a aire comprimido; mostrando las condiciones mínimas y características principales del análisis matemático basado en las áreas de estática, termodinámica y, dinámica sin dejar a un lado parámetros numéricos para determinar la autonomía del vehículo.

El tiempo de desarrollo del proyecto será de once (11) meses, cumpliendo todos los objetivos propuestos. Por todo lo anterior el proyecto estará basado y soportado por los desarrollos teóricos, conceptos y cálculos correspondientes a sistemas de potencia y eficiencia, tipos de energía y protección ambiental, principalmente, cuyos nombres se relacionan en las referencias bibliográficas.

## **4. OBJETIVOS**

Los objetivos propuestos para el presente proyecto son:

### **4.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar matemáticamente la viabilidad técnica para la conversión de un motor de combustión interna a un motor de aire comprimido para un vehículo de transporte utilizado bajo las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogotá, de fácil mantenibilidad y operación que se constituya como una alternativa de movilidad.

### **4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Recopilar el trabajo desarrollado previamente en la universidad libre respecto al proyecto Diseño y construcción de un automóvil prototipo alternativo para uso urbano en la ciudad de Bogotá D. C., con el fin de utilizar los datos obtenidos en estas investigaciones, como parámetros de diseño del motor.
- Emplear la mayor cantidad de herramientas y conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera para confirmar y enfocar dichas aptitudes en un proyecto regido por parámetros de investigación.
- Identificar las limitaciones y factores invariable que pueda presentar el proyecto debido a las condiciones atmosféricas y viales de Bogotá D.C. y la clase de recursos disponibles para la realización del proyecto.
- Ofrecer una alternativa de solución en cuanto al sistema de abastecimiento del vehículo, teniendo en cuenta que es un factor de suma importancia en lo que involucra el final de esta etapa del proyecto y el comienzo de la siguiente.
- Efectuar un balance generalizado de los costos que intervienen en esta fase del proyecto integral del automóvil, para determinar su viabilidad desde el punto de vista financiero.

## **5. RECOPIACIÓN DEL TRABAJO DESARROLLADO PREVIAMENTE EN LA UNIVERSIDAD LIBRE Y ANTECEDENTES MUNDIALES**

En el presente capítulo se muestran los datos obtenidos por los demás grupos que trabajan en la construcción del vehículo, que tienen incidencia en el desarrollo del presente proyecto. De igual manera se muestran los desarrollos previos y avances realizados en diversas partes del mundo respecto a la utilización de aire comprimido como fuente de energía alternativa en vehículos.

### **5.1 EMPALME DE LOS DATOS OBTENIDOS POR LOS GRUPOS DE ESTRUCTURA, CARROCERÍA Y ERGONOMÍA**

Al iniciar el presente proyecto los grupos citados en el anterior título ya se encontraban culminando su investigación, los resultados obtenidos por ellos hasta ese momento se entregaron y a partir de estos se inició el trabajo correspondiente, dichos resultados se tomaron como parámetros iniciales para el desarrollo del proyecto, estos parámetros fueron:

- Vehículo de dimensiones pequeñas, que se ajustaran a las condiciones típicas de una ciudad como la de Bogotá, las dimensiones exactas no fueron suministradas debido a que no existía la certeza de dichos datos por parte del grupo encargado.
- Velocidad máxima de 60 km/h de acuerdo con los límites establecidos en la ciudad.
- El motor y los cilindros de almacenamiento estarían ubicados en la parte posterior del vehículo.

- El vehículo estaría en capacidad de transportar dos personas y una cantidad pequeña de equipaje, la cual no se aprecia exactamente en la información indicada por el grupo responsable.
- El sistema de reaprovisionamiento para abastecer los cilindros de aire sería un compresor convencional.
- El vehículo debería tener una autonomía mínima de 100 km y sus emisiones no deberían ser contaminantes.

Sin embargo en el desarrollo del presente proyecto de investigación fueron modificados algunos de ellos y la respectiva justificación para tomar tal decisión se presenta en los capítulos posteriores, pero a grandes rasgos se puede decir que el orden cronológico del proyecto debió iniciar con el desarrollo mecánico del carro, es decir con el motor y sistema de transmisión de potencia, y a partir de allí elaborar la carrocería, la estructura, la ergonomía y los demás componentes que complementan al vehículo tal como el sistema eléctrico y accesorios entre otros.

## **5.2 ANTECEDENTES HISTÓRICOS RELACIONADOS CON EL PROYECTO**

A continuación se presenta una recopilación de los trabajos realizados previamente en diversos lugares del mundo y que tienen como eje principal el desarrollo de motores de aire comprimido o la conversión de uno de combustión. Los lugares en los que fueron desarrollados estos trabajos se encuentran especificados mas adelante.

### 5.2.1 Conversión de un Motor de Gasolina 2T a Aire Comprimido <sup>1</sup>

Este proyecto fue desarrollado a nivel escolar por un estudiante de 1<sup>er</sup> grado de bachillerato tecnológico en la ciudad de Palma de Mallorca, España en el año 2000.

Este motor, procedente de una Derby Variant de 50 c.c., funciona en un ciclo teórico que, representado en un diagrama presión-volumen, resulta del todo análogo al de sus hermanos de gasolina. Hay una fase de compresión, al final de la cual se libera masa en el interior de la cámara (calor, en el caso del motor de gasolina), procedente de un depósito exterior de aire comprimido. Como consecuencia, se incrementa bruscamente la presión, todo ello en las proximidades del "punto muerto superior", es decir, cuando el pistón se halla más próximo a la culata y el volumen es mínimo. Sigue para ambos motores una fase de expansión, durante la cual el pistón se aleja de la cámara (culata) en dirección a su "punto muerto inferior", esto es, a la posición más baja posible del pistón relativo a la cámara, posición para la cual el volumen por él contenido es máximo. En ambos casos el gas empuja al pistón realizando trabajo, a costa de reducir su energía interna (su temperatura). La gran diferencia entre el motor térmico y el motor de aire radica en que, en el primero, la transferencia de calor durante la expansión es de dirección gas-paredes, mientras que para el segundo tiene la dirección paredes-gas.

Cuando la temperatura inicial del aire coincide con la de las paredes, y el proceso es suficientemente lento para ser considerado isoterma. Es decir, el trabajo obtenido en la expansión puede ser superior a la energía inicialmente contenida en el aire comprimido, con lo que el rendimiento del motor puede ser superior al 100 %. Aparentemente esto viola el 2<sup>o</sup> Principio de la

---

<sup>1</sup> <http://www.iesjuniperserra.net/informaciogeneral/motor%5B2%5D.htm>

Termodinámica, pero sólo aparentemente, ya que falta cerrar el ciclo, incluyendo también en la evaluación el proceso durante el cual se comprimió el aire. Obviamente, la evaluación del proceso completo sí satisface el 2º Principio, y proporciona un rendimiento global claramente inferior a 1. Pero es importante señalar que el ciclo completo compresor-motor puede tener un rendimiento superior al del compresor sólo. Si la compresión fue isoterma, la más favorable desde el punto de vista de eficiencia energética, una parte del calor que se generó se perdió allí, es recuperada durante la expansión - también isoterma- del motor, convirtiendo energía térmica ambiental en trabajo mecánico. El motor enfría el ambiente porque convierte calor ambiental en trabajo.

Es decir, el motor de aire no pierde energía térmica durante la expansión, sino que la gana, y esta ganancia es tanto mayor cuanto menos adiabático sea el motor y más lento sea su funcionamiento, lo cual indica que todo funciona al revés que en el caso de un motor térmico convencional. Este último es tanto mejor en rendimiento cuanto más adiabático, es decir, cuanto más grande sea (menor superficie de disipación de calor por unidad de masa de gas contenida en el motor). Por la misma razón, a igualdad de cilindrada unitaria tiene mayor rendimiento cuanto mayor sea la relación carrera-diámetro, ya que para dos cilindros de igual volumen, el de mayor altura tiene menor superficie. Estos son factores fundamentales en el diseño de los motores térmicos, que han de ser interpretados justo al revés para optimizar el motor de aire comprimido, que será tanto más eficiente cuanto más isotermo (más pequeño y lento, y menor relación carrera-diámetro).

El motor mencionado anteriormente se muestra en la figura 1:

**Figura 1. Motor de Aire Comprimido Desarrollado en Palma de Mallorca**



Fuente: <http://www.iesjuniperserra.net/informaciogeneral/motor%5B2%5D.htm> .2008

## **5.2.2 Motor Regusci <sup>2</sup>**

El motor Regusci fue desarrollado en Uruguay por el inventor y profesor de física, matemáticas y ciencias naturales Armando Regusci, hacia el año de 1987 constituyéndose en una gran alternativa para remplazar los motores tradicionales. A continuación se presenta la descripción de dicho motor al igual que algunos datos técnicos del mismo.

### **5.2.2.1 Descripción del motor**

El motor Regusci consiste en un pistón libre y una rueda libre. El motor puede estar constituido por uno o varios pistones pudiendo a su vez ser estos iguales o distintos en un mismo motor.

---

<sup>2</sup> <http://www.aireenergycars.com>

También un pistón puede estar conectado a una o mas ruedas libres pudiendo ser éstas iguales o diferentes para un mismo motor. Los pistones pueden ser de simple o de doble efecto y de diferentes diámetros y recorridos para un mismo motor.

Uno de los tantos tipos de motor seria un cilindro de gran longitud para su diámetro, un pistón conectado a un eje de tal forma que cuando se le inyecta un gas a presión este empuja el pistón el cual esta unido a una cadena y hace girar una rueda libre. Tiene dos válvulas, una para permitir entrar el gas desde un tanque presurizado y otra que deja escapar el aire. Un resorte permite el retorno del pistón a su posición inicial.

El motor Regusci se muestra en la siguiente figura:

**Figura 2. Motor Regusci**



Fuente: <http://www.aireenergycars.com/eshtm/vehiculos/galeria.htm> 2008

### 5.2.2.2 Datos técnicos sobre el motor

Al poder ser el cilindro mucho más largo con respecto al diámetro del pistón esto permite abrir una sola vez la válvula de entrada y salida en lugar de varias veces. Esta ventaja se hace imprescindible cuando el motor trabaja a altas presiones.

Cuando el pistón está a su máxima presión, al iniciarse el movimiento la eficiencia mecánica es la misma que en cualquier otra parte del recorrido, siendo esta muy buena. En un motor a cigüeñal cuando el pistón inicia su recorrido la eficiencia es muy mala.

Se puede usar un resorte para dispersar la fuerza cuando esta es muy alta recuperando luego esta energía. El resorte iría entre el pistón y la rueda libre.

Cuando la presión del tanque es mas baja solo se utilizarían los pistones de más diámetro, pudiendo dejar los otros sin trabajar.

El pistón tiene una gran eficiencia volumétrica y no sufre desgaste ya que no se hacen fuerzas sobre las pared laterales como en el motor de cigüeñal. El motor tiene una gran eficiencia mecánica para todas las posiciones del pistón.

Se puede regular exactamente la cantidad de aire que se va a colocar cada vez que se usa el pistón, esto permite por ejemplo que cuando el pistón termina su recorrido, el aire se encuentre a la presión atmosférica cuando se libera, aprovechando toda la energía de expansión del aire. Si se quiere mas potencia se puede liberar a más presión, también permite elegir entre que presiones trabajar para los motores de varias etapas y cuantas etapas

trabajar dependiendo de la presión del tanque y del torque que se desee para el motor y de la velocidad del vehículo.

Se puede usar sin caja de cambios ni diferencial ni embrague. Esto permite disminuir precios de construcción, peso del vehículo y aumentar su eficiencia. La eficiencia del ciclo de Carnot se hace mucho mayor.

Este motor se puede utilizar en diversos tipos de vehículos, a continuación se muestran algunos de ellos.

**Figura 3. Motocicleta Propulsada por Aire Comprimido**



Fuente: <http://www.aireenergycars.com/eshtm/vehiculos/galeria.htm> 2008

**Figura 4. Automóvil Propulsado por Aire Comprimido**



Fuente: <http://www.aireenergycars.com/eshtm/vehiculos/galeria.htm> 2008

### **5.2.3 Motor MDI <sup>3</sup>**

Moteur Developpment International (MDI), es un grupo industrial, cuya sede social está en Luxemburgo. El principal producto creado por este grupo es el motor propulsado con aire comprimido.

El inventor de este mecanismo es el francés Guy Nègre, quien ha trabajado desde finales de los años 80's en dicho proyecto. Desde entonces MDI ha elaborado diversos modelos de motores, uno de ellos y el más actual pertenece a una serie de vehículos de la misma empresa llamados cat's, mostrados en la figura 5.

---

<sup>3</sup> <http://www.motordeaire.com/>

**Figura 5. Automóvil MDI Cat's**



Fuente: <http://www.motordeaire.com> 2008

El motor desarrollado entre finales del 2001 y principios del 2002 conlleva un dispositivo de control del recorrido de los pistones de 2ª generación y un único cigüeñal. Estos pistones son de dos etapas: una etapa motor y una etapa de compresión y/o de expansión intermedia.

El motor tiene 4 pistones de dos etapas o sea 8 cámaras de compresión y/o de expansión que se utilizan o bien para comprimir el aire ambiente y rellenar los tanques, o bien para efectuar expansiones sucesivas (Recalentamiento del aire por la energía térmica ambiente) y acercase de esta manera de la expansión isotérmica.

Su volante-motor está equipado con un moto alternador eléctrico de 5 kW. Este motor es simultáneamente:

- el motor del grupo en modo compresor
- el motor de arranque
- el alternador para la recarga de la batería
- un moderador/freno eléctrico
- una aportación momentánea de energía (p. ej. para aparcar)

No lleva embrague, el motor no funciona cuando el coche está parado y el arranque se hace sobre el plato magnético para reactivar el grupo de aire comprimido. Las maniobras de parqueo pueden efectuarse sobre el motor eléctrico.

Adicionalmente MDI ha desarrollado una serie de elementos y piezas que se constituyen en un gran avance a nivel tecnológico, entre ellos se destacan una carrocería de una fibra especial que la hace muy ligera, caja de velocidades eléctrica, sistema eléctrico que consta de un solo cable para todo el vehículo, entre otras. El resultado es un vehículo que no contamina, sino que además limpia el aire que toma del ambiente, devolviéndolo al mismo libre de las cargas nocivas para el ser humano.

El motor desarrollado por MDI y con el cual están equipados los automóviles cat's se muestra en la figura 6.

**Figura 6. Motor MDI Cat's**



Fuente: <http://www.motordeaire.com> 2008

## **6. SELECCIÓN DEL MODELO A SEGUIR SEGÚN INVESTIGACIÓN**

A continuación se muestra el estudio realizado para seleccionar el vehículo de combustión interna con las condiciones más favorables para realizar la conversión a aire comprimido.

### **6.1 DETERMINACION DE LOS PARAMETROS PARA LA SELLECCION DEL MODELO A SEGUIR**

Para poder seleccionar el modelo a seguir es necesario determinar los requerimientos del cliente o usuario y los aspectos más relevantes del diseño de los automóviles existentes en la actualidad y que contribuyen con la satisfacción de las expectativas del público. Para ello se utilizo el método de despliegue de la función de calidad realizando la respectiva matriz QFD.

Esta matriz se muestra en la siguiente página.

### 6.1.1 Requerimientos del Cliente

Los requerimientos de los clientes son:

1. Eficiente
2. Bajo costo de adquisición
3. Bajo costo de repuestos
4. Liviano
5. Bajo Consumo de combustible
6. Fácil Operación

Una vez determinados los requerimientos del cliente se comparan entre ellos y se determina su relevancia con respecto a los otros y para ello se asigna un 1 si es más relevante o un 0 si es menos relevante, se realiza la sumatoria de los puntajes obtenidos y se hallan los correspondientes porcentajes.

**Tabla 1. DETERMINACION DE LA RELEVANCIA DE LOS REQUERIMIENTOS DEL CLIENTE**

	1	2	3	4	5	6		
1	-	0	1	1	0	1	3	0,2
2	1	-	0	1	0	1	3	0,2
3	0	1	-	1	0	1	3	0,2
4	0	0	0	-	0	1	1	0,07
5	1	1	1	1	-	1	5	0,33
6	0	0	0	0	0	-	0	0
							15	

Fuente: Autores del proyecto 2008

### 6.1.2 Requerimientos de Diseño

Los requerimientos de diseño que finalmente permitirán hacer la elección adecuada del modelo a seguir son:

- A. Cilindrada del motor
- B. Potencia máxima
- C. Revoluciones por minuto máximas
- D. Torque máximo
- E. Tipo de carrocería
- F. Peso del vehículo
- G. Mantenibilidad

Una vez establecidos los requerimientos de diseño se comparan con los del cliente y se determina la relación que tienen numerándolo de la siguiente manera: 1 para cuando el requerimiento de diseño no tiene relación con el requerimiento del cliente, 3 para cuando existe una relación media entre estos y 9 para cuando los dos requerimientos tienen bastante relación, luego se multiplica este valor asignado por el porcentaje encontrado en la tabla 1 y finalmente se suman los valores obtenidos por requerimiento de diseño.

El requerimiento de diseño con mayor resultado en la sumatoria será el parámetro principal para seleccionar el modelo a seguir en la investigación.

Estas relaciones se encuentran consignadas en la tabla 2, ubicada en la siguiente página.

**Tabla 2. DETERMINACION DEL PARAMETRO DE DISEÑO CON MAYOR RELEVANCIA PARA LA SELECCIÓN DEL MODELO A SEGUIR**

		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>F</b>	<b>G</b>
<b>1</b>	0,2	3 0,6	9 1,8	3 0,6	9 1,8	1 0,2	3 0,6	1 0,2
<b>2</b>	0,2	3 0,6	1 0,2	1 0,2	1 0,2	3 0,6	1 0,2	9 1,8
<b>3</b>	0,2	1 0,2	1 0,2	1 0,2	1 0,2	1 0,2	1 0,2	9 1,8
<b>4</b>	0,07	3 0,21	1 0,07	1 0,07	1 0,07	9 0,63	9 0,63	1 0,07
<b>5</b>	0,33	9 2,97	9 2,97	9 2,97	9 2,97	1 0,33	3 0,99	1 0,33
<b>6</b>	0	1 0	1 0	1 0	1 0	3 0	3 0	1 0
		<b>4,58</b>	<b>5,24</b>	<b>4,04</b>	<b>5,24</b>	<b>1,96</b>	<b>2,62</b>	<b>4,2</b>

Una vez comparados los requerimientos del cliente con los de diseño se puede llegar a la conclusión de que los requerimientos más relevantes son la potencia y el torque, sin embargo los parámetros de cilindrada del motor, el número de revoluciones por minuto y mantenibilidad tienen una gran importancia ya que la sumatoria esta cercana a los parámetros con mayor puntaje.

De acuerdo con esto, el vehículo seleccionado debe tener una buena potencia y un buen torque, pero este valor esta limitado por la cilindrada del motor ya que es otro de los parámetros más relevantes, por lo tanto para la determinación de los valores exactos de potencia y torque es necesario verificar las características de los vehículos que se venden en nuestra ciudad.

## **6.2 RECOPIACION DE LAS CARACTERISTICAS TECNICAS DE ALGUNOS VEHICULOS VENDIDOS EN LA CIUDAD**

Esta recopilación se realizó con el fin de validar las características promedio que presentan los automóviles comerciales diseñados particularmente para las condiciones viales de una ciudad, para ello se procedió a realizar una consulta en la que se recopila información correspondiente a las propiedades mecánicas, las cuales permitirán escoger el modelo más asertivo para realizar el análisis de la conversión de combustible a aire comprimido.

Dentro del trabajo desarrollado se tuvo en cuenta además de las características mecánicas de estos carros los aspectos correspondientes a pesos, dimensiones, combustibles y capacidad de transporte.

Todos los vehículos incluidos en este análisis tienen como característica común el tipo de carrocería utilizado, esta carrocería es tipo hatchback la cual consiste en una cabina o área para pasajeros con un espacio de carga (maletero) integrado al cual se tiene acceso mediante una quinta puerta ubicada en la parte trasera del carro, tal y como se muestra en la figura 7, este tipo de carrocería se seleccionó básicamente por que es la que tiene dimensiones más pequeñas lo cual conlleva a tener un peso inferior al de otro tipo de carrocerías con lo cual se puede llegar a aumentar el requerimiento de potencia citado con anterioridad. Esta es una de las razones tenidas en cuenta para la primera modificación de los parámetros entregados por los grupos anteriores quienes no consideraban la implementación de esta carrocería en su proyecto.

**Figura 7. Vehículo con Carrocería Hatchback**



Fuente: cars.about.com 2008

La información correspondiente a los aspectos mencionados anteriormente se encuentra consignada en la siguiente tabla:

**Tabla 3. CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS CARROS HATCHBACK MAS UTILIZADOS EN BOGOTÁ**

Nº	REFERENCIA	DIMENSIONES				PESO TOTAL (Kg)	MOTOR				COMBUSTIBLE	PASAJEROS
		Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Vol (m <sup>3</sup> )		Cilindraje (cm <sup>3</sup> )	Disposición	Potencia (HP)	RPM		
<b>CHERY</b>												
1	QQ	3,5	1,4	1,4	6,86	1255	812	3 en línea	51	6000	Gasolina	5
<b>CHEVROLET</b>												
2	AVEO 5p	3,9	1,7	1,5	9,95	1125	1399	4 en línea	92,5	6200	Gasolina	5
3	CHEVY 5p	3,8	1,6	1,4	8,51	899	1600	4 en línea	100	5600	Gasolina	5
4	CORSA <sub>ACTIVE</sub>	3,7	1,6	1,4	8,29	945	1389	4 en línea	83,7	6000	Gasolina	5
5	CORSA <sub>EVOLUTION</sub>	3,8	1,6	1,4	8,51	1095	1389	4 en línea	84	6000	Gasolina	5
6	OPTRA 5p	3,8	1,7	1,4	9,04	1260	1799	4 en línea	121	5800	Gasolina	5
7	SPARK	3,5	1,5	1,2	6,30	795	995	4 en línea	65	5400	Gasolina	4
<b>CITROEN</b>												
8	C1	3,4	1,6	1,5	8,16	935	1398	4 en línea	75	5400	Diesel	4
9	C2	3,7	1,65	1,5	9,16	991	1360	4 en línea	75	5400	Gasolina	5
10	C2	3,7	1,66	1,5	9,21	996	1398	4 en línea	70	5400	Diesel	5
11	C3	3,8	1,65	1,5	9,41	991	1360	4 en línea	75	5400	Gasolina	5
12	C3	3,8	1,65	1,5	9,41	1123	1398	4 en línea	70	4000	Diesel	5
<b>DAIHATSU</b>												
13	NEW SIRION	3,6	1,7	1,6	9,79	925	1298	4 en línea	90	3700	Gasolina	5
<b>FIAT</b>												
14	UNO	3,7	1,5	1,4	7,77	851	1242	4 en línea	68	5250	Gasolina	4
15	PALIO	3,8	1,6	1,4	8,51	981	1242	4 en línea	82	5500	Gasolina	5
<b>FORD</b>												
16	FIESTA	3,9	1,9	1,4	10,37	1071	999	4 en línea	95	6000	Gasolina	5
17	FOCUS	4,1	1,7	1,5	10,46	1204	1988	4 en línea	145	6000	Gasolina	5
<b>HAFEI</b>												
18	LOBO	3,6	1,6	1,5	8,64	875	1075	4 en línea	63	5700	Gasolina	5
<b>HONDA</b>												
19	CIVIC	4,4	1,7	1,4	10,47	1197	1798	4 en línea	140	6300	Gasolina	5
20	FIT	3,8	1,6	1,5	9,12	1046	1340	4 en línea	83	5700	Gasolina	5

<b>HYUNDAI</b>												
21	GETZ	3,8	1,7	1,5	9,69	1000	1399	4 en línea	95	6000	Gasolina	5
22	SANTRO	3,6	1,5	1,6	8,64	884	1100	4 en línea	62	5500	Gasolina	4
<b>KIA</b>												
23	PICANTO	3,5	1,6	1,5	8,40	852	1086	4 en línea	65	5500	Gasolina	5
<b>MAZDA</b>												
24	DEMIO	3,8	1,6	1,5	9,12	1020	1324	4 en línea	70,5	5500	Gasolina	5
25	ALLEGRO	4,2	1,7	1,4	10,00	1170	1324	4 en línea	75	5500	Gasolina	5
26	3 SPORT	4,5	1,7	1,4	10,71	1240	1598	4 en línea	103,3	6000	Gasolina	5
<b>MDI</b>												
27	MINICAT'S	1,64	1,62	1,64	4,35	550	800	4 en plano	24,65	4000	Aire Comprimido	3
<b>NISSAN</b>												
28	TIIDA	4,5	1,7	1,5	11,48	1100	1800	4 en línea	124	5200	Gasolina	5
29	MICRA	3,7	1,6	1,5	8,88	985	1386	4 en línea	88	5200	Gasolina	5
<b>PEUGEOT</b>												
30	206	3,8	1,6	1,4	8,51	1025	1400	4 en línea	75	5500	Gasolina	5
31	206 <sup>OFF ROAD</sup>	3,8	1,6	1,5	9,12	1148	1600	4 en línea	110	5500	Gasolina	5
32	307	4,2	1,7	1,5	10,71	1251	1600	4 en línea	110	5500	Gasolina	5
<b>RENAULT</b>												
33	TWINGO	3,4	1,6	1,4	7,62	890	1149	4 en línea	75	5500	Gasolina	5
34	CLIO	4,0	1,8	1,5	10,80	1035	1598	4 en línea	110	5750	Gasolina	5
35	MEGANE	4,2	1,8	1,45	10,96	1299	1998	4 en línea	140	5500	Gasolina	5
<b>SEAT</b>												
36	IBIZA	4,0	1,7	1,4	9,52	1105	2000	4 en línea	115	5200	Gasolina	5
<b>SUBARU</b>												
37	IMPREZA	4,4	1,6	1,4	9,86	1597	1300	4 en línea	110	5200	Gasolina	5
<b>VOLKSWAGEN</b>												
38	GOL	3,9	1,65	1,4	9,01	988	1781	4 en línea	103	5250	Gasolina	5
39	NEW BEETLE	4,1	1,7	1,5	10,46	1228	1984	4 en línea	115	5200	Gasolina	5
40	FOX	3,8	1,7	1,5	9,69	1012	1390	4 en línea	74	5000	Gasolina	5
	<b>PROMEDIO</b>	<b>3,8</b>	<b>1,65</b>	<b>1,45</b>	<b>9,14</b>	<b>1048,5</b>	<b>1422,4</b>		<b>89,68</b>	<b>5415</b>		<b>5</b>

Fuente: Autores del proyecto 2008

Como se puede ver en la tabla anterior se tuvieron en cuenta marcas de diversos lugares del mundo como Japón, Estados Unidos, China, Italia, Francia y Corea principalmente, y de ésta se puede señalar que los modelos con mayor potencia son el Ford Focus, El Honda Civic y el Renault Megane pero la cilindrada del motor esta cercana a los 2000 cm<sup>3</sup> lo cual no cumpliría con el segundo parámetro de diseño, por otra parte los vehículos con menor cilindrada son el Chery QQ y el Chevrolet Spark estos dos vehículos tienen una potencia baja comparada con el resto de los vehículos relacionados sin embargo al tener un motor pequeño resultan mas convenientes para la conversión y pueden ofrecer una mayor autonomía. Finalmente el vehículo escogido como modelo a seguir fue el Chevrolet Spark, el cual cuenta con un motor pequeño de 995 cm<sup>3</sup>, con cuatro cilindros en línea que genera una potencia de 65 HP a tan solo 5400 rpm, con lo cual se cumplen los requerimientos de selección nombrados con anterioridad, superando al Chery en potencia y en el número de revoluciones por minuto.

Otro factor tenido en cuenta es el peso del vehículo ya que con 795 Kg de peso vacio total se constituye en el mas liviano de los citados en la tabla 3 así mismo este vehículo es bastante económico en cuanto al valor comercial que tiene, por otro lado este es un carro utilizado en servicio publico lo cual permite tener un mayor acceso a repuestos y componentes mecánicos dado el caso que se necesitara alguno de ellos dentro del desarrollo del proyecto como efectivamente ocurrió.

### **6.3 FICHA TÉCNICA MODELO ESCOGIDO PARA EL ANÁLISIS**

Para continuar con el desarrollo del proyecto era necesario conocer mas características técnicas del automóvil seleccionado, para ello fue necesario remitirse a la ficha técnica del vehículo, la cual nos brinda datos importantes como la potencia neta que nos brinda el motor con el que cuenta al igual que el torque neto del mismo, de igual manera se necesitaba conocer las dimensiones del motor, mas específicamente el

diámetro y la carrera de cada uno de los pistones de los que esta provisto. Por otro lado se requerirían aspectos relevantes referentes a la transmisión y a los pesos del vehículo al igual que el diámetro de la rueda y el rin de este carro.

La ficha técnica del vehículo Chevrolet Spark, ensamblado en Colombia, se presenta en la siguiente página.

Figura 8. Ficha Técnica Chevrolet Spark

**CHEVROLET SPARK**  **SIEMPRE CONTIGO**



**Nuevo Chevrolet Spark**  
El automóvil joven, dinámico y moderno que llega para hacer parte de tu vida. Déjate seducir con su atractivo diseño y su espectacular línea. No te lo sacarás de la cabeza.



**MOTOR**

Desplazamiento (c.c.)	995
No. cilindros/Configuración	4 cil. en línea SOHC 8 válvulas
Potencia neta (hp @ r.p.m.)	65 @ 5.400
Torque neta (kg-m @ r.p.m.)	9,3 @ 4.200
Relación compresión	9,3 : 1
Diámetro x carrera (mm)	68,5 x 67,5
Inyección combustible	M,P,F,I.
Ajuste válvular	Mecánico
Sistema de encendido	Electrónico DIS
Nivel de emisiones	Euro II
Sensor autodetonación	Si

**TRANSMISIÓN**

Tipo	Manual, 5 vel., sincronizada.
Embrague:	Plato sencillo, disco seco accionado con guaya
Palanca de cambios	En piso
Relaciones	
1ª	3,416
2ª	1,950
3ª	1,280
4ª	0,971
5ª	0,757
Rev.	3,272
Relación de eje	4,444

**CHASIS**

Dirección	Asistencia	Manual / Piñón y cremallera	
Timón		2 radios	
Diámetro de giro (entre paredes)		9,04 m	
Suspensión	Delantera	Tipo	Independiente McPherson
		Capacidad	680 kg
	Posterior	Tipo	Eje de torsión
		Capacidad	690 kg
	Amortiguadores		Hidráulicos, telescópicos de doble acción
Resortes	Delanteros	Helicoidales	
	Posteriores	Helicoidales	
Barra estabilizadora		Delantera	
Frenos	Tipo	Hidráulicos	
	Delanteros	Disco sólido 236 mm	
	Posteriores	Campana 180 mm	
	De parqueo	Manual sobre ruedas posteriores	
Llantas		155/65 R 13	
Aros		13 x 4.5J Acero	

**SEGURIDAD**

Bloqueo timón.	x
Barras de impacto laterales en puertas delanteras y posteriores.	x
Columna de dirección colapsable.	x
Carcera con refuerzos en techo y zonas de absorción de impacto delanteras y posteriores.	x
Cinturón posterior central de dos puntos y laterales de tres puntos.	x
Cinturones de seguridad de 3 puntos	x
Espejo retrovisor día/noche.	x
Limpiaaparabrisas trasero.	x
Limpiaaparabrisas delantero de dos velocidades.	x
Pito eléctrico sobre timón.	x
Puertas posteriores con seguro para niños.	x

**EQUIPAMIENTO**

<b>COMODIDAD</b>	
Aire acondicionado opcional.	x
Alarma opcional.	x
Apoyabrazos delantero.	x
Apoyacabezas delanteros ajustables en altura.	x
Asiento posterior reclinable con apoyacabezas.	x
Asientos delanteros reclinables y deslizantes.	x
Bolillos en el espaldar del asiento del pasajero delantero.	x
Cenicero.	x
Compartimento (bolso) en puertas delanteras.	x
Compartimento de carga lateral en cajuela.	x
Descansapie para conductor.	x
Encendedor.	x
Espejos exteriores de ajuste manual desde interior cabina.	x
Guanteras.	x
Gancho de compras en base de apoyacabezas delanteros.	x
Radio CD y dos parlantes frontales.	x
Lámpara delantera de techo de tres posiciones.	x
Parasol conductor (con espejo) y pasajero (sin espejo).	x
Portagafas.	x
Portavasos en consola de piso (2 delanteros/1 posterior).	x
Reloj digital.	x
Vidrios delanteros y posteriores manuales.	x

**PESOS Y CAPACIDADES**

Peso bruto vehicular	1,230 kg
**Peso vacío total	795 kg (con A/C 820 kg)
Peso vacío eje delantero	(con A/C 508 kg)
Peso vacío eje trasero	(con A/C 312 kg)
Capacidad de carga	435 kg (con A/C 410 kg)
Tanque de combustible	35 L
Capacidad de cajuela (min./máx.)	200 / 845 L
Motor	3,25L

\*\* El peso vacío se tomó con niveles full y 3/4 de combustible.

**SISTEMA ELÉCTRICO**

Batería	35 A.H.
Alternador	65 A

**INTERRUPTORES**

Aire acondicionado (opcional).	x
Controles calefacción.	x
Desempañador vidrio posterior.	x
Limpiaaparabrisas (delantero y posterior).	x
Luces de parqueo.	x
Palanca apertura de cajuela.	x
Palanca apertura de tapa motor.	x
Palanca apertura de tapa tanque de combustible.	x
Difusores centrales y laterales de aire.	x

**LUCES INDICADORAS**

Aviso de puerta abierta.	x
Baja presión de aceite motor.	x
Freno de parqueo aplicado y falla en sistema hidráulico.	x
Funcionamiento motor (Check Engine).	x
Luces de posición y direccionales.	x
Luces principales intermedias y plenas.	x
Sistema eléctrico deficiente.	x

**DIMENSIONES INTERNAS (mm)**

Largo	1,729 mm.
Ancho	1,270 mm.
Alto	1,238 mm.
Espacio para cabeza (del./post.)	1,004/959 mm.
Espacio para piernas (del./post.)	1,022/900 mm.
Espacio para hombros (del./post.)	1,250/1,250 mm.

**CONTROLES Y MEDIDORES**

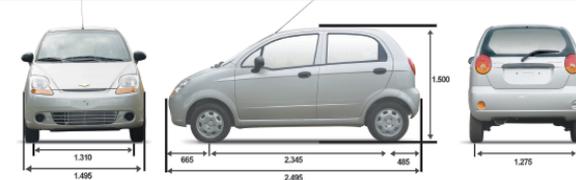
Nivel de combustible	x
Odómetro total y parcial.	x
Velocímetro.	x

**OTRO EQUIPO**

Llanta de repuesto	x
Manual del conductor	x

**APARIENCIA**

Alfombra piso cajuela.	x
Antena.	x
Asientos en tela.	x
Bandeja portaobjetos posterior.	x
Bumpers color carrocería.	x
Corbatín "Chevrolet" en tapa motor.	x
Emblema posterior "Spark"	x
Espejos exteriores color negro.	x
Manijas exteriores de puertas color negro.	x
Manija cajuela negra.	x
Panel de instrumentos color negro.	x
Tapa cubos sobre aros de acero.	x
Vidrio frontal con banda degradé.	x
Vidrios tinturados.	x

**DIMENSIONES EXTERNAS (mm)**

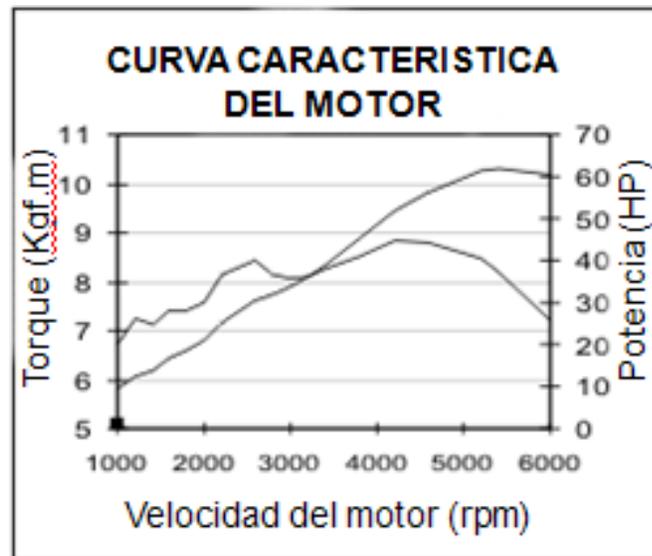
## 6.4 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR ESCOGIDO PARA EL ANÁLISIS

Una vez revisados los datos técnicos del vehículo, se centro la atención en los datos de potencia y torque para iniciar el diseño del motor.

La importancia de estos datos es que a través de ellos se puede determinar si el aire comprimido es capaz de ejercer una fuerza tal sobre los pistones que permitiera el giro del cigüeñal y por ende hacer funcional el motor, de ser así no habría necesidad de diseñar un motor nuevo sino que por el contrario se modificaría el motor de combustión para que pudiese funcionar con aire.

La curva característica del motor del Chevrolet Spark se muestra en la figura 9.

**Figura 9. Curva Característica del Motor del Chevrolet Spark**



Fuente: Centro de atención al cliente General Motors Colmotores 2008

De esta curva característica se tomo como dato relevante el punto en el que se cruzan las curvas de torque y potencia, es decir a una potencia de 35 HP y una velocidad de 3200 rpm, estos datos se utilizaron como origen para los cálculos mostrados en el siguiente capítulo.

## 7. DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD TECNICA DEL PROYECTO

Para determinar la viabilidad del proyecto es necesario realizar cálculos de diversas áreas y dependiendo del análisis de los resultados obtenidos de ellos tomar decisiones respecto al desarrollo del proyecto. En el presente capítulo se presentan los análisis desarrollados para la determinación de la viabilidad del proyecto.

### 7.1 ANALISIS ESTÁTICO

A continuación se presentan los cálculos de torque y presión, a diferentes revoluciones por minuto y con diferentes valores de potencia, vistos desde el lado de la estática.

#### 7.1.1 Calculo de Torque a 3200 rpm y 35 HP<sup>4</sup>

Para calcular el torque requerido a 3200 rpm y 35 hp se divide la potencia sobre la velocidad angular y estos son los resultados:

$$Pot = \omega * T \quad (1)$$

$$\omega = 3200 * \frac{2\pi}{60}$$

$$\omega = 335.7 \frac{rad}{s}$$

$$Pot = 35HP * \frac{745.7W}{HP}^5$$

$$Pot = 26099.5W$$

---

<sup>4</sup> Datos tomados de la ficha técnica del Chevrolet Spark

$$T = \frac{Pot}{\omega}$$

$$T = \frac{26099.5W}{335.1 \frac{rad}{s}}$$

$$T = 77.89N.m$$

### 7.1.2 Calculo de Torque Máximo

En este caso se realiza el mismo cálculo anterior pero con la velocidad angular máxima de 5400 rpm:

$$Pot = \omega * T$$

$$\omega = N * \frac{2\pi}{60}$$

$$\omega = N * 5400 * \frac{2\pi}{60}$$

$$\omega = 565.5 \frac{rad}{s}$$

$$\omega = 565.5 \frac{rad}{s}$$

$$Pot = 65HP * \frac{745.7W}{1HP}$$

$$Pot = 48470.5W$$

$$T = \frac{Pot}{\omega}$$

$$P = \frac{1153.9N}{0.0039m^2}$$

$$P = 313110Pa$$

$$T = \frac{48470.5W}{565.5 \frac{rad}{s}}$$

$$T = 85.71N.m$$

### 7.1.3 Calculo de Presión

Basados en la aproximación inicial generada en los cálculos anteriores se procede a calcular la presión en las condiciones dadas:

Multiplicando el área del cilindro por su altura, se determina el volumen, el valor del diámetro D es igual a 68.5 mm tal y como se indica en la ficha técnica del vehículo:

$$V = A * h \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi D^2}{4} * h$$

$$V = \frac{\pi(68.5 * 10^{-3})^2}{4} * 67.5 * 10^{-3}$$

$$V = 2.48 * 10^{-4} m^3$$

Obteniendo el valor del volumen del pistón se multiplica por la velocidad angular máxima y así se obtiene el flujo volumétrico máximo:

$$\dot{V}_{\max} = 2.48 * 10^{-4} m^3 * 5400 rpm$$

$$\dot{V}_{\max} = 1.34 \frac{m^3}{\min} * \frac{60 \min}{1 h} \quad (3)$$

$$\dot{V}_{\max} = 80.4 \frac{m^3}{h}$$

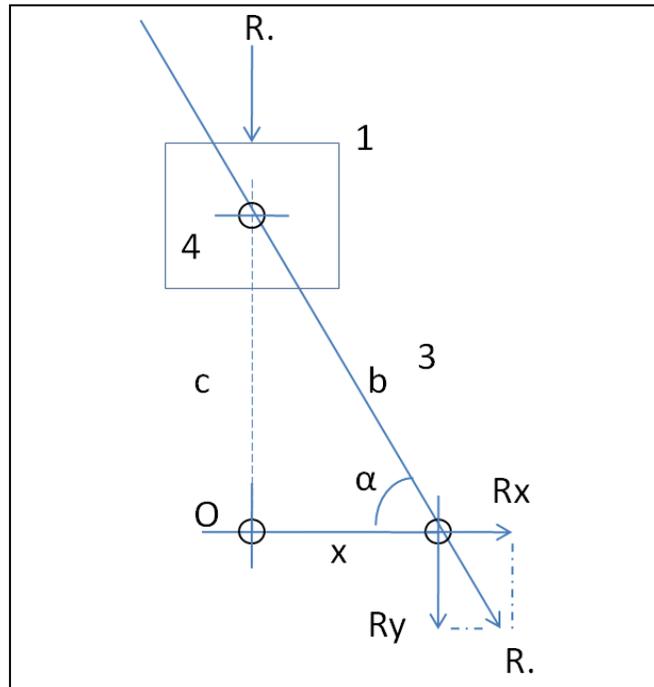
Luego se realiza el mismo procedimiento anterior, en esta ocasión con la velocidad angular promedio y se obtiene:

$$\dot{V}_{prom} = 2.48 * 10^{-4} m^3 * 3200 rpm$$

$$\dot{V}_{prom} = 0.79 \frac{m^3}{\min} * \frac{60 \min}{1 h} \quad (4)$$

$$\dot{V}_{prom} = 47.62 \frac{m^3}{h}$$

**Figura 10. Fuerzas Actuantes en el Sistema**



Fuente: Autores del proyecto 2008

### 7.1.3.1 Presión obtenida para 3200 rpm

A continuación se realiza el cálculo de las fuerzas que actúan en el sistema, representadas en la figura anterior las cuales se dividen por el área del cilindro y se obtiene los siguientes resultados de presión para la velocidad angular planteada.

El torque alrededor del punto O es igual al producto entre la fuerza  $R_y$  y la longitud del brazo del cigüeñal  $x$ , la cual se calcula utilizando el teorema de Pitágoras para resolver el triangulo conformado por  $x$ ,  $c$  y la longitud de la biela  $b$ . valores que se tomaron directamente de de los elementos involucrados.

$$T = Ry * x \quad (5)$$

$$b^2 = c^2 + x^2$$

$$x = \sqrt{b^2 - c^2} \quad (6)$$

$$x = \sqrt{0.1^2 - 0.0675^2} m$$

$$x = 0.073m$$

$$\cos \alpha = \frac{x}{b}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{x}{b}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{0.073m}{0.1m} \quad (7)$$

$$\alpha = 42.45^\circ$$

$$\text{sen} \alpha = \frac{Ry}{R}$$

$$R = \frac{Ry}{\text{sen} \alpha} \quad (8)$$

$$R = \frac{1067N}{\text{sen} 42.45}$$

$$R = 1580.85N$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$P = \frac{2142.45}{0.0037m^2} \quad (10)$$

$$P = 579041.7Pa$$

$$P = 84psi$$

$$Ry = \frac{T}{x}$$

$$Ry = \frac{77.89N.m}{0.073m}$$

$$Ry = 106.7N$$

$$\cos \alpha = \frac{R}{F} \quad (9)$$

$$F = \frac{R}{\cos \alpha}$$

$$F = \frac{1580.85N}{\cos 42.45} = 2142.45N$$

### 7.1.3.2 Presión obtenida para 5400 rpm

Se repite el procedimiento anterior y se obtiene la presión requerida para la velocidad angular máxima planteada:

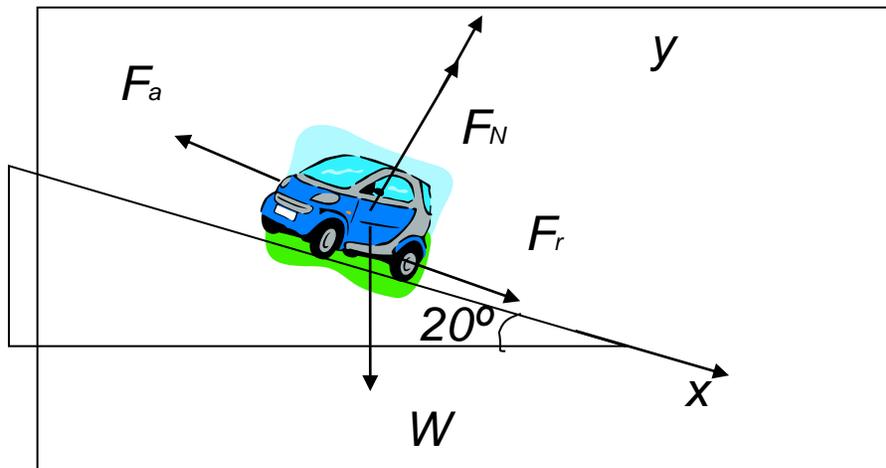
$$\begin{aligned}
 T &= Ry * x & R &= \frac{Ry}{\text{sen}\alpha} & \cos\alpha &= \frac{R}{F} \\
 Ry &= \frac{T}{x} & R &= \frac{1174.2N}{\text{sen}42.45} & F &= \frac{R}{\cos\alpha} \\
 Ry &= \frac{85.71N.m}{0.073m} & R &= 1739.56N & F &= \frac{1739.56N}{\cos42.45} \\
 Ry &= 1174.2N & & & F &= 2357.65
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{F}{A} \\
 P &= \frac{2357.55N}{0.0037m^2} \quad (11) \\
 P &= 6371764Pa \\
 P &= 92.4psi
 \end{aligned}$$

#### 7.1.4 Calculo de Potencia Requerida para Condiciones Extremas

Para determinar si el vehículo estaba en capacidad de iniciar la marcha en una pendiente con alto porcentaje de inclinación se realizaron los cálculos mostrados a continuación, estos se hicieron teniendo en cuenta el peso máximo del vehículo. Este peso corresponde a 1200 Kg incluido el peso del vehículo, sus ocupantes y el equipaje.

#### Figura 11. Diagrama de Cuerpo Libre para Plano Inclinado



Fuente: Autores del Proyecto 2008

Para ello lo primero que se hizo fue determinar las fuerzas que actúan sobre el objeto, estas fuerzas están representadas en el diagrama de cuerpo libre mostrado en la figura 5, para ello se realizó sumatoria de fuerzas en cada uno de los ejes y se obtuvo un sistema de tres ecuaciones con tres incógnitas que se resolvió tal y como se indica en los cálculos siguientes

$$W = 1200Kg \times 9,8$$

$$W = 11760N \quad (12)$$

$$\gamma = 20^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ - \gamma$$

$$\alpha = 90^\circ - 20^\circ \quad (13)$$

$$\alpha = 70^\circ$$

$$\mu_{rod} = 0,02^6$$

(14)

---

<sup>6</sup> Tomado de dinámica de Meriam

$$\sum Fx = W \cos \alpha + F_r - F_a = 0$$

$$\sum Fy = F_N - W \operatorname{sen} \alpha = 0 \quad (15)$$

$$F_r = F_N \times \mu_{rod} \quad (16)$$

De.15.

$$F_N = W \operatorname{sen} \alpha$$

$$F_N = 11760N \times \operatorname{sen} 70^\circ$$

$$F_N = 11050,8N$$

De.16.

$$F_R = 11050,8N \times 0,02$$

$$F_R = 221N$$

De.14.

$$F_a = W \cos \alpha + F_r$$

$$F_a = 11760N \times \cos 70 + 221N$$

$$F_a = 4243,17N$$

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones se calcularon los torques generados en la rueda, la caja y el motor.

El torque en la rueda se calcula multiplicando la fuerza de arranque por el radio de la rueda que equivale a 0,26 m según la ficha técnica del vehículo.

$$T_r = F_a \times R_{rueda}$$

$$T_r = 4243,17N \times 0,26m \quad (17)$$

$$T_r = 1103,22Nm$$

El torque en la caja  $T_c$  se calcula utilizando las relaciones de caja que se encuentran en la ficha técnica, el torque en la rueda se transmite a la caja según la relación de eje y a su vez este se transmite al motor de acuerdo con

la relación de transmisión de la primera marcha. Esta relación es válida puesto que la relación de torques se mantiene de igual manera que la relación de velocidades, es decir que cuando se pierde velocidad se gana en torque y viceversa.

El valor de 4,444<sup>7</sup> corresponde a la relación de transmisión en el eje y el de 3,416<sup>8</sup> corresponde a la relación de transmisión en la caja para la primera velocidad que es en la cual el vehículo iniciara la marcha.

$$\begin{aligned}
 T_c &= \tau_r / r_e \\
 T_c &= 1103,22Nm / 4,444 \\
 T_c &= 248,25Nm \\
 T_m &= \tau_c / r_c \\
 T_m &= 248,25Nm / 3,416 \\
 T_m &= 72,67Nm
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Finalmente se calculo la potencia requerida para poder cumplir con las condiciones dadas, esta potencia se calculó multiplicando el torque que se genera en el motor por la velocidad angular del mismo.

$$\begin{aligned}
 Pot_{req} &= T_m \times \omega \\
 Pot_{req} &= 72,67Nm \times 3200 \times (2\pi / 60s) \\
 Pot_{req} &= 24,35KW \times \frac{1HP}{0,746KW} \\
 Pot_{req} &= 32,6HP
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

---

<sup>7</sup>Tomado de la ficha técnica del Chevrolet Spark

<sup>8</sup> Tomado de la ficha técnica del Chevrolet Spark

La potencia requerida para que el vehículo pueda iniciar su marcha en una pendiente con las condiciones determinadas anteriormente es de 32,6 HP, es decir que el carro esta en condiciones de hacerlo puesto que la potencia que entrega el motor a 3200 rpm es de 35 hp.

En la siguiente tabla se muestran los valores de potencia requerida para diversos pesos del vehículo.

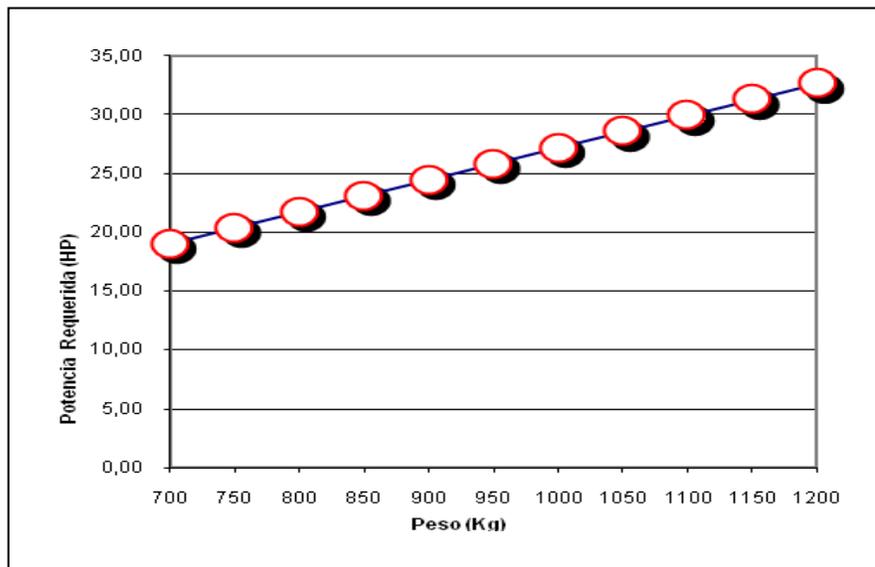
**Tabla 4. POTENCIA REQUERIDA**

W (Kg)	Fn (N)	Fr(N)	F(n)	Tr(Nm)	Tc(Nm)	Tm(Nm)	Potreq (W)	Potreq (hp)
700	6446,29	128,93	2475,18	643,55	144,81	42,39	14205,86	19,04
750	6906,74	138,13	2651,98	689,52	155,16	45,42	15220,56	20,40
800	7367,19	147,34	2828,78	735,48	165,50	48,45	16235,27	21,76
850	7827,64	156,55	3005,58	781,45	175,84	51,48	17249,97	23,12
900	8288,09	165,76	3182,38	827,42	186,19	54,50	18264,68	24,48
950	8748,54	174,97	3359,18	873,39	196,53	57,53	19279,38	25,84
1000	9208,99	184,18	3535,98	919,35	206,88	60,56	20294,09	27,20
1050	9669,44	193,39	3712,78	965,32	217,22	63,59	21308,79	28,56
1100	10129,89	202,60	3889,57	1011,29	227,56	66,62	22323,49	29,92
1150	10590,34	211,81	4066,37	1057,26	237,91	69,64	23338,20	31,28
1200	11050,79	221,02	4243,17	1103,22	248,25	72,67	24352,90	32,64
1230	11327,05	226,54	4349,25	1130,81	254,46	74,49	24961,72	33,46

Fuente: Autores del proyecto 2008

Como era de esperarse con el aumento del peso del vehículo se requiere una mayor potencia para que este pueda arrancar, este comportamiento se muestra en la siguiente figura.

**Figura 12. Peso Vs Potencia Requerida**



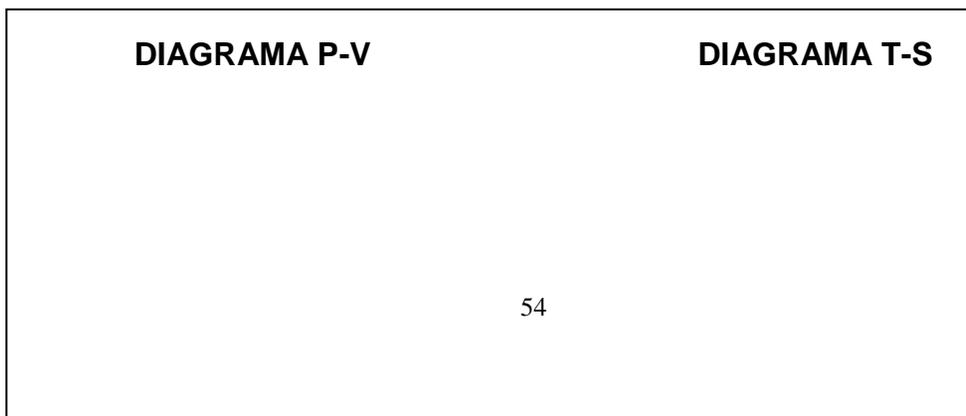
Fuente: Autores del proyecto 2008

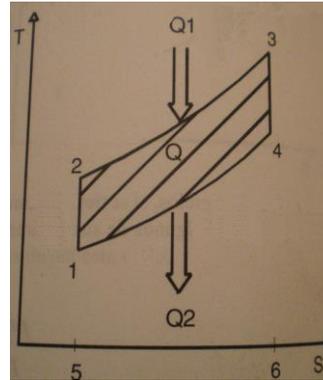
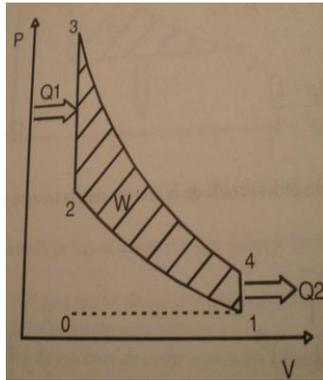
## 7.2 ANALISIS TERMODINAMICO

Una vez obtenidos los resultados del análisis estático se procedió a realizar el análisis termodinámico, éste se realizó con el fin de determinar la presión requerida para hacer girar el cigüeñal y observar el comportamiento termodinámico del motor. El valor de presión allí encontrado debe ser igual al de la presión de servicio del aire comprimido o de lo contrario el motor no funcionara.

El motor del Chevrolet Spark es un motor que funciona según el ciclo Otto, por ello lo primero que se realizó fue determinar los procesos termodinámicos que se producen en este y que se muestran en los diagramas presión – volumen (P-V) y temperatura - entropía (T-S).

**Figura 13. Ciclo Otto en Coordenadas P-V y T-S**





Fuente: Maquinas térmicas motoras 2008

Una vez representados los procesos en los diagramas se calcularon los datos allí consignados tales como presión y temperatura desarrollando cada uno de ellos de manera individual.

### 7.2.1 Proceso 1-2 Isoentrópico

El proceso 1-2 es un proceso isoentrópico en el cual se produce una compresión adiabática del fluido de trabajo generada por el pistón.

La presión y la temperatura para el punto dos se calculan de la siguiente manera:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1} \quad (20)$$

$$r_s = \left( \frac{V_1}{V_2} \right) = 9,3_9 \quad (21)$$

Donde

$$T_1 = 15^\circ C + 273 = 288^\circ K$$

$$P_1 = 74,6 KPa \quad 10$$

<sup>9</sup> Tomado de la ficha técnica del Chevrolet Spark

<sup>10</sup> Presión atmosférica y temperatura media de la ciudad de Bogotá

$$K = 1,4^{11}$$

$$T_2 = T_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{K-1}$$

$$T_2 = 288^\circ K * (9,3)^{1,4-1}$$

$$T_2 = 702,73^\circ K$$

$$\frac{P_2}{P_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^K \quad (22)$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^K$$

$$P_2 = 74,6 KPa * (9,3)^{1,4}$$

$$P_2 = 1692,8 KPa$$

## 7.2.2 Proceso 2-3 Isocórico

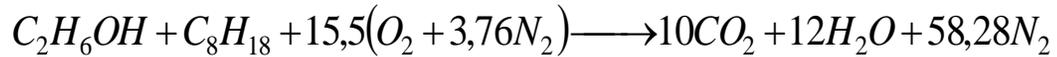
En el proceso 2-3 se produce un aporte de calor a volumen constante, para calcular la presión tres es necesario determinar el valor de dicho calor el cual se genera como producto de la reacción química y para ello es necesario desarrollar el siguiente análisis:

### 7.2.2.1 Análisis Estequiométrico

---

<sup>11</sup> Tomado del libro termodinámica de Cengel

La reacción química que se produce en el motor se muestra a continuación:



Vale la pena aclarar que esta ecuación ya se encuentra balanceada y se tuvo en cuenta la mezcla de gasolina y alcohol carburante del combustible utilizado en nuestra ciudad.

El resultado del balanceo se muestra a continuación:

$$10C \longrightarrow 10C$$

$$24H \longrightarrow 24H$$

$$32O \longrightarrow 32O$$

$$58,28N \longrightarrow 58,28N$$

Una vez hecho esto se procedió a calcular la relación aire combustible para con ella poder encontrar el calor aportado en la combustión y así calcular los valores de presión y temperatura en el punto mas alto del ciclo, dato que indica la presión que se debe generar en la cámara de combustión para que el cigüeñal gire, tal y como se muestra a continuación:

$$AC = \frac{\text{PesoAire}}{\text{PesoCombustible}}$$

$$AC = \frac{(15,5 + 58,28)(28,97)}{[(12 * 2) + (6 * 1) + (16 * 1)] + [(12 * 8) + (18 * 1)]} \quad (23)$$

$$AC = \frac{2137,41}{160} = 13,3 \frac{Kg \text{ Aire}}{Kg \text{ Combustible}}$$

$$CA = \frac{1}{AC} = 0,075 \frac{Kg_{Combustible}}{Kg_{Aire}} \quad (24)$$

$$h_{combustible} = 44610 \frac{KJ}{Kg}$$

$$q_{2-3} = CA * h_{combustible} \quad (25)$$

$$q_{2-3} = 0,075 \frac{Kg_{Aire}}{Kg_{Combustible}} * 44610 \frac{KJ}{Kg}$$

$$q_{2-3} = 3345,75 \frac{KJ}{Kg}$$

$$C_{V_{Aire}} = 0,7176 \frac{KJ}{Kg^{\circ} K}^{12}$$

$$q_{2-3} = C_V * (T_3 - T_2)$$

$$T_3 = \frac{q_{2-3}}{C_V} + T_2$$

$$T_3 = \frac{3345,75 \frac{KJ}{Kg}}{0,7176 \frac{KJ}{Kg^{\circ} K}} + 702,73^{\circ} K \quad (26)$$

$$T_3 = 5365,14^{\circ} K$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2}$$

$$P_3 = \frac{T_3 * P_2}{T_2}$$

$$P_3 = \frac{5365,14^{\circ} K * 1692,8 KPa}{702,73^{\circ} K} \quad (27)$$

---

<sup>12</sup> Tomado del libro termodinámica de Cengel

$$P_3 = 12924 \text{ KPa}$$

### 7.2.3 Proceso 3-4 Isoentrópico

El proceso 3-4 es una expansión adiabática correspondiente al trabajo realizado por el fluido de trabajo la temperatura y presión en el punto cuatro se calculó de la siguiente forma:

$$\frac{T_4}{T_3} = \left( \frac{V_3}{V_4} \right)^{K-1} \quad (28)$$

$$T_4 = T_3 * \left( \frac{1}{r_s} \right)^{K-1}$$

$$T_4 = 5365,14^\circ \text{ K} * \left( \frac{1}{9,3} \right)^{1,4-1}$$

$$T_4 = 2198,81^\circ \text{ K}$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left( \frac{V_4}{V_3} \right)^K$$

$$P_4 = \frac{P_3}{(r_s)^K}$$

$$P_4 = \frac{12924 \text{ KPa}}{(9,3)^{1,4}}$$

$$P_4 = 569,54 \text{ KPa}$$

### 7.2.4 Proceso 4-1 Isoentrópico

En este proceso se realiza la extracción de calor a volumen constante que se calcula de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}q_{4-1} &= C_V * (T_4 - T_1) \\q_{4-1} &= 0,7176 \frac{KJ}{Kg \cdot K} * (2198,81^\circ K - 288^\circ K) \quad (29) \\q_{4-1} &= 1371,2 \frac{KJ}{Kg}\end{aligned}$$

Una vez calculados  $q_H$  y  $q_L$  se halló el valor del trabajo neto y de la eficiencia del motor.

$$\begin{aligned}W_{Neto} &= q_H - q_L \\W_{Neto} &= 3345,75 \frac{KJ}{Kg} - 1371,2 \frac{KJ}{Kg} \quad (30) \\W_{Neto} &= 1974,55 \frac{KJ}{Kg}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\eta_T &= \frac{W_{Neto}}{q_H} \\ \eta_T &= \frac{1974,55 \frac{KJ}{Kg}}{3345,75 \frac{KJ}{Kg}} \quad (31)\end{aligned}$$

$$\eta_T = 0,59 \Rightarrow 59\%$$

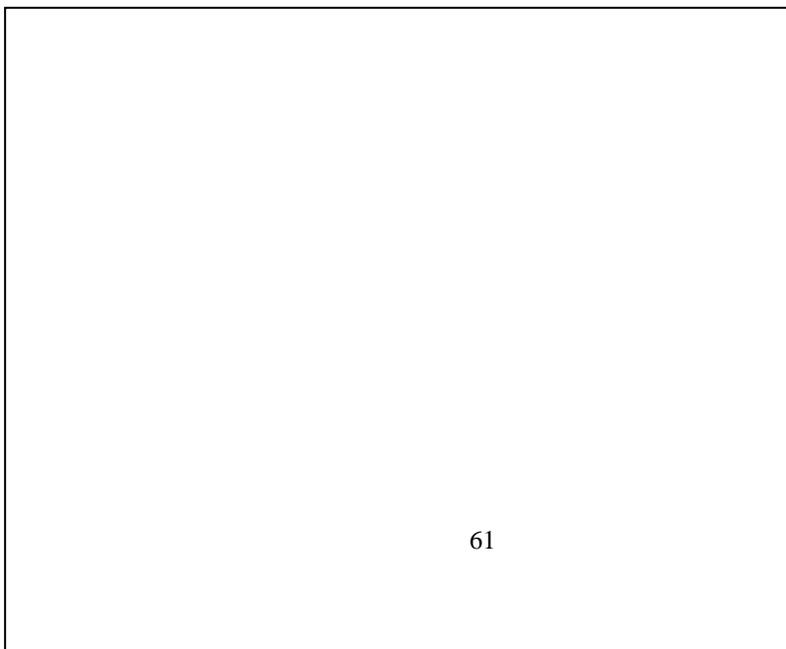
### 7.3 ANALISIS DINAMICO

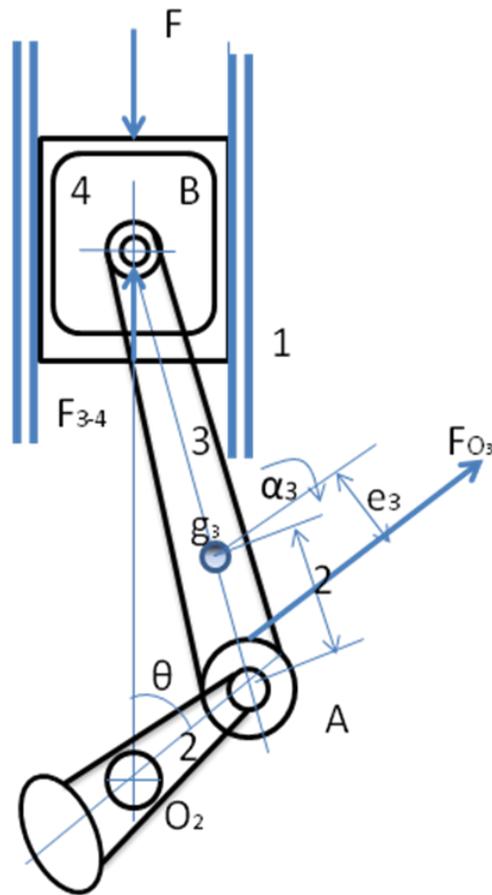
A continuación se muestra el análisis dinámico realizado sobre el mecanismo biela manivela para las condiciones que se muestran mas adelante, condiciones que se asemejan a las que se encuentran en el motor de combustión interna que se ha venido trabajando en análisis previos, y con el cual se pretendía determinar la viabilidad del proyecto basados en los resultados obtenidos a partir de este.

Por tal motivo se procedió a hacer un análisis de fuerzas en el motor teniendo en cuenta las cargas dinámicas que actúan en el pistón y la biela, las fuerzas de inercia que actúan en los mismos, las fuerzas de gravedad que actúan en el mecanismo y las fuerzas de inercia generadas por el contrapeso.

La figura 14. presenta un esquema de las fuerzas que actúan sobre el mecanismo, mencionadas anteriormente, y los diversos símbolos y nomenclaturas empleados en el desarrollo del cálculo y posterior a ella se muestran los datos tomados como referencia inicial para el desarrollo del mismo. Vale la pena aclarar que los datos utilizados en el presente análisis fueron tomados directamente del pistón, la biela y el cigüeñal del motor del Chevrolet Spark por parte de los autores del proyecto exceptuando los valores de presión y velocidad los cuales ya se habían trabajado previamente.

**Figura 14. Fuerzas que Actúan sobre el Mecanismo Biela Manivela**





Fuente: Mecanismos y dinámica de maquinaria 2008

Velocidad Cigüeñal ( $\omega$ ) = 3200 rpm

Carrera (C) = 67,5 mm

Peso pistón ( $W_4$ ) = 0,4 Kg

Area piston ( $A_4$ ) = 0,0037m<sup>2</sup>

Peso biela ( $W_3$ ) = 0,3 Kg

Longitud biela ( $L_3$ ) = 130mm

Presión (P) = 12924 Kpa

Longitud cigüeñal ( $L_2$ ) = 36 mm

$\rho_{biela} = 16511\text{gm/cm}^2$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = P \times A$$

$$F = 12924\text{Kpa} \times 0,0037\text{m}^2$$

$$F = 47,82\text{KN}$$

La presión ejercida por el aire comprimido se representa con la letra P y su magnitud se determinó por medio del análisis termodinámico presentado previamente. La fuerza del gas F en el pistón es el producto de la presión del aire por el área de la cabeza del pistón esta fuerza es igual a 47,82KN.

Como medida siguiente se calcularon las aceleraciones de los puntos A y B teniendo en cuenta los ángulos formados entre los componentes del mecanismo

$$A_b = R\omega^2 \left( \cos\theta + \frac{R}{L} \cos 2\theta \right)$$

$$A_b = 0,036m \times \left( 335,1 \frac{Rad}{s} \right)^2 \times \left( \cos 3,61 + \frac{0,036m}{0,13m} \cos(2 \times 3,61) \right)$$

$$A_b = 5145,18 \frac{m}{s^2}$$

(32)

$$A_a = R\omega^2$$

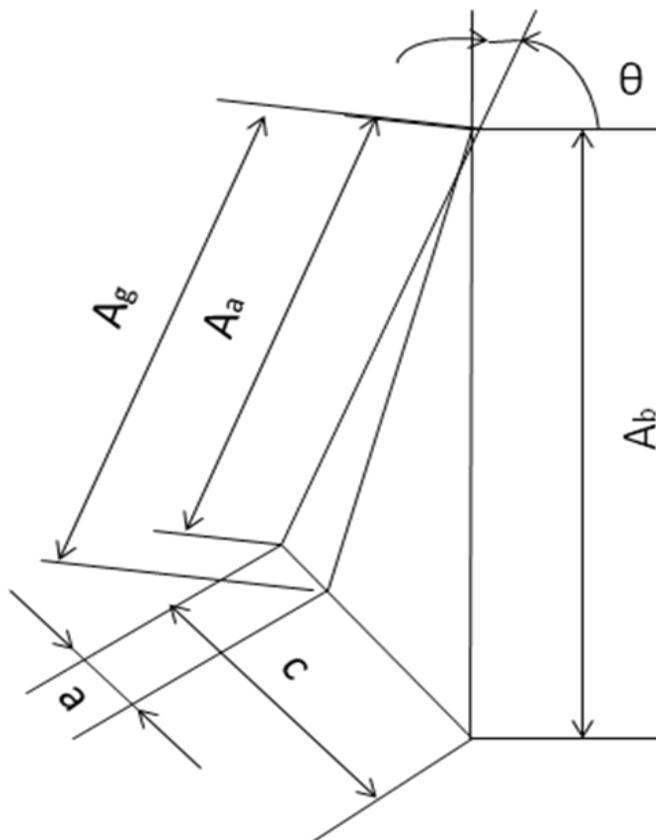
$$A_a = 0,036m \times \left( 335,1 \frac{Rad}{s} \right)^2$$

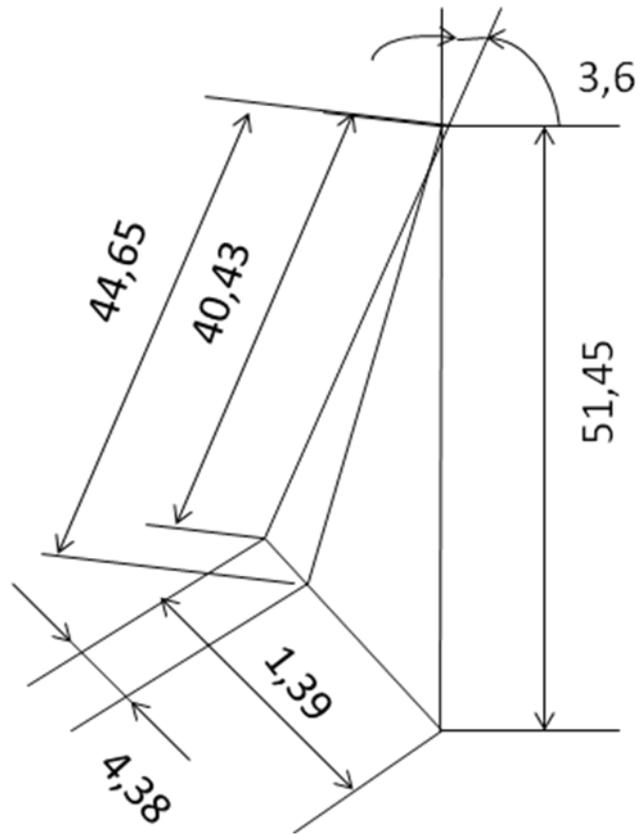
$$A_a = 4042,59 \frac{m}{s^2}$$

### 7.3.1 Polígono de Aceleraciones

Una vez calculadas las aceleraciones  $A_a$  y  $A_b$  se procedió a graficarlas para encontrar el valor de las aceleraciones restantes que se presentan en el mecanismo, la aceleración  $A_b$  tiene un valor de  $5145,18 \text{ m/s}^2$  y esta dirigida hacia abajo, puesto que el desplazamiento del pistón es únicamente vertical, la aceleración  $A_a$  tiene una magnitud de  $4042,59 \text{ m/s}^2$  y su dirección esta determinada por el ángulo  $\theta$ , la aceleración  $A_g$  es la aceleración del centro de gravedad y su magnitud se determina midiendo directamente sobre el polígono, la aceleración angular  $\alpha_3$  es la raíz de los cuadrados de las magnitudes de las aceleraciones  $A_a$ ,  $A_b$  y  $A_g$  dichos valores se muestran en la siguiente figura:

**Figura 15. Polígono de aceleraciones**





Fuente: Autores del proyecto 2008

Los valores del polígono de aceleraciones se deben multiplicar por cien para obtener los datos correspondientes a cada una de las fuerzas allí intervinientes puesto que se encuentran a escala 1:100, con estos datos podemos calcular las fuerzas que actúan sobre el mecanismo tal y como se muestra a continuación:

$$A_{g3} = 4465 \frac{m}{s^2}$$

$$\alpha_3 = 7921,59 \frac{\text{Rad}}{s^2}$$

$$F_{O4} = m_4 A_b \quad (33)$$

$$F_{O4} = 0,4Kg \times 5145,18 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{O4} = 2058,07N$$

$$F_{O3} = m_3 A_{g3}$$

$$F_{O3} = 0,3Kg \times 4465 \frac{m}{s^2} \quad (34)$$

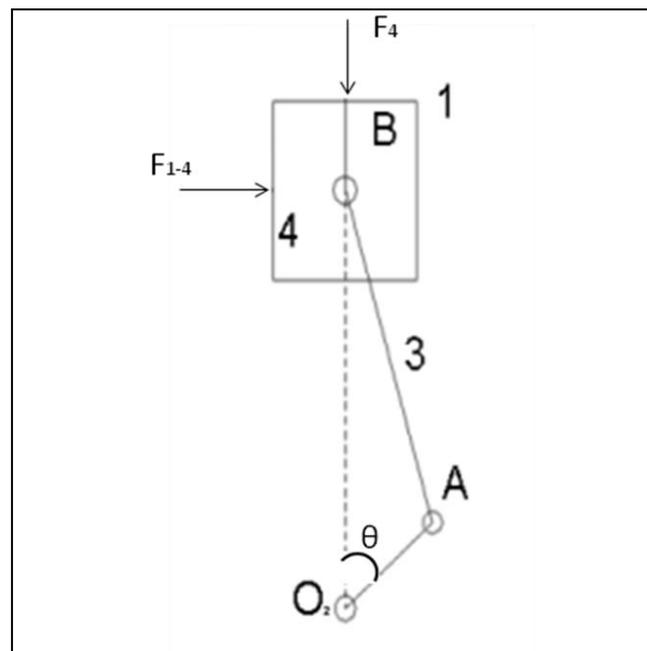
$$F_{O3} = 1339,5N$$

$$F_4 = F - F_{o4}$$

$$F_4 = 47820N - 2058,07N \quad (35)$$

$$F_4 = 45760,73N$$

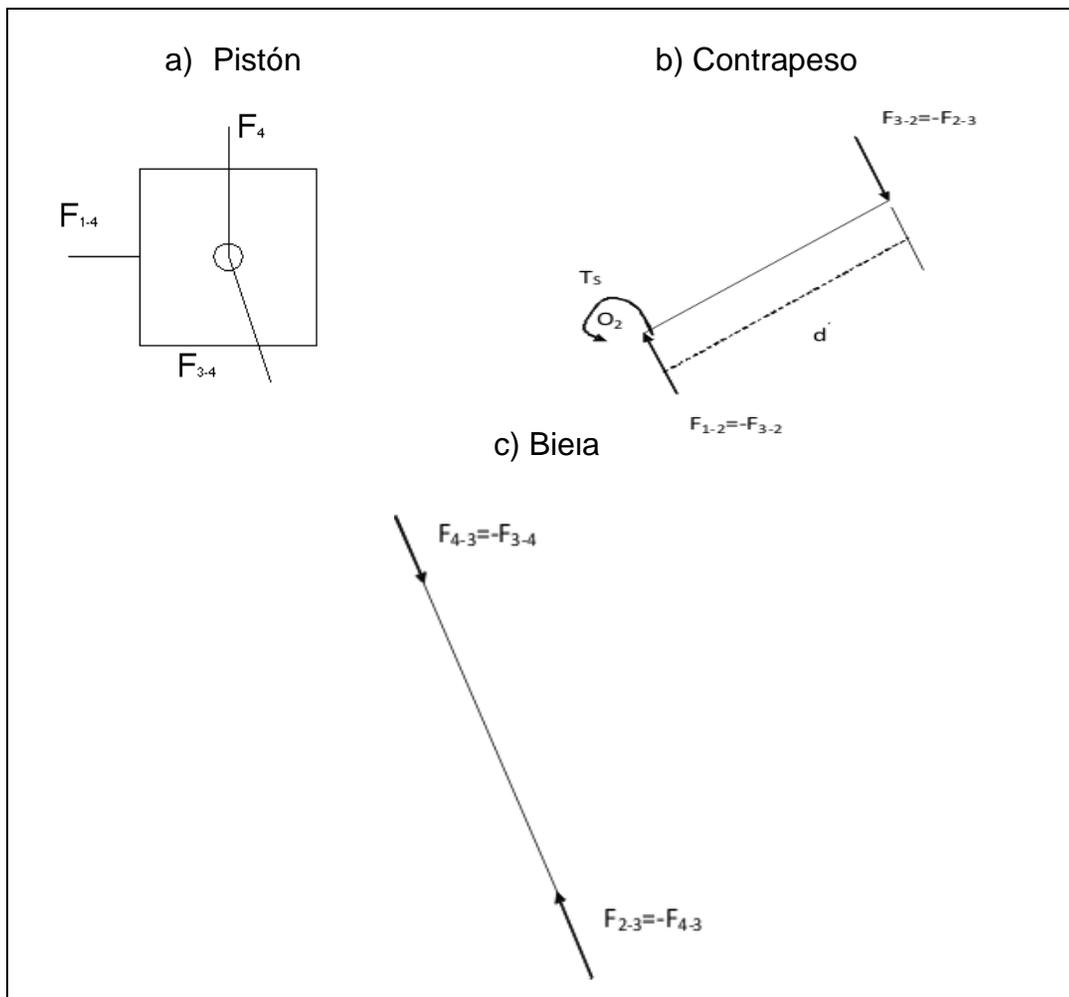
**Figura 16. Fuerzas actuantes en el sistema**



Fuente: Autores del proyecto 2008

El diagrama de cuerpo libre correspondiente a las fuerzas intervinientes en el mecanismo se muestra en la siguiente figura, la figura 17.a corresponde a las fuerzas que actúan sobre el pistón, la figura 17.b corresponde a las fuerzas actuantes en el contrapeso y la figura 17c corresponde al diagrama de las fuerzas actuantes en la biela.

**Figura 17. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo biela-manivela**



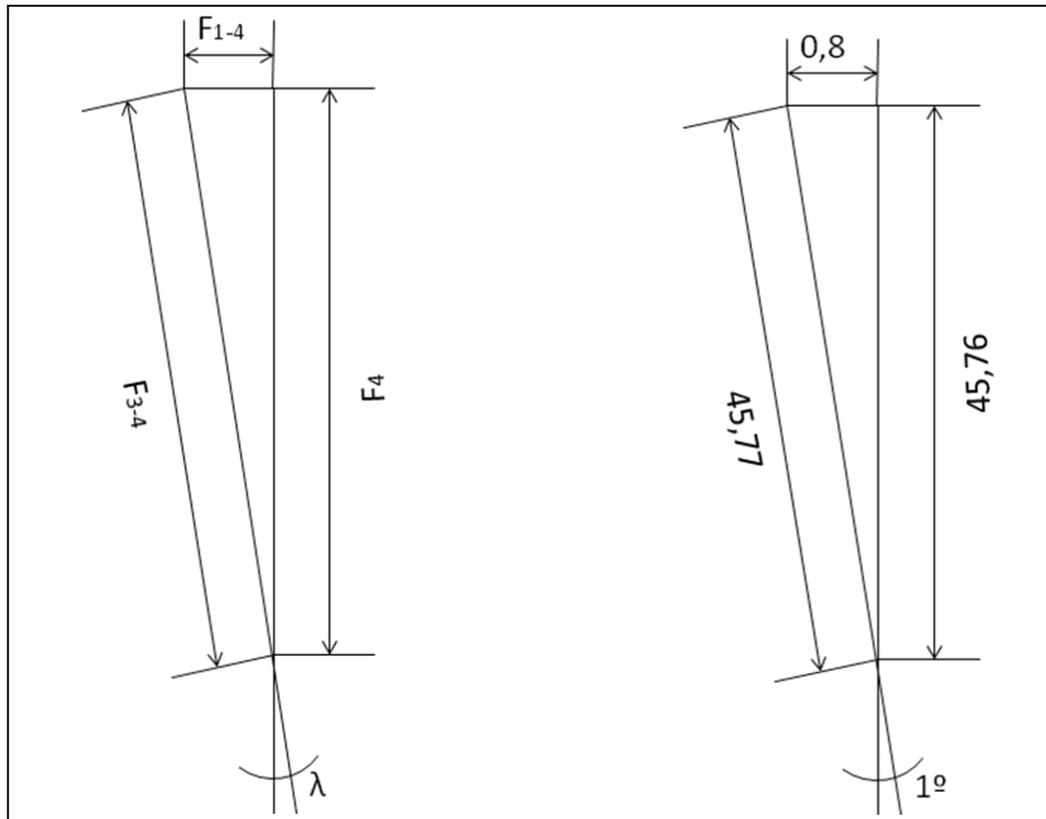
Fuente: Autores del proyecto 2008

### 7.3.2 Polígono de Fuerzas

Para calcular las fuerzas mostradas anteriormente se realizó el correspondiente polígono de fuerzas de la misma manera que se efectuó el polígono de aceleraciones este se muestra en la figura 18.

La fuerza  $F_4$  esta dirigida hacia abajo ya que el aire empuja el pistón en la dirección mencionada y este no tiene posibilidad de otro movimiento diferente al vertical, la fuerza  $F_{1-4}$  esta dirigida horizontalmente y corresponde a la fuerza generada por la camisa sobre el pistón y la fuerza  $F_{3-4}$  corresponde a la fuerza que ejerce el pistón sobre la biela y su dirección esta determinado por el ángulo  $\lambda$ .

**Figura 18. Polígono de Fuerzas**

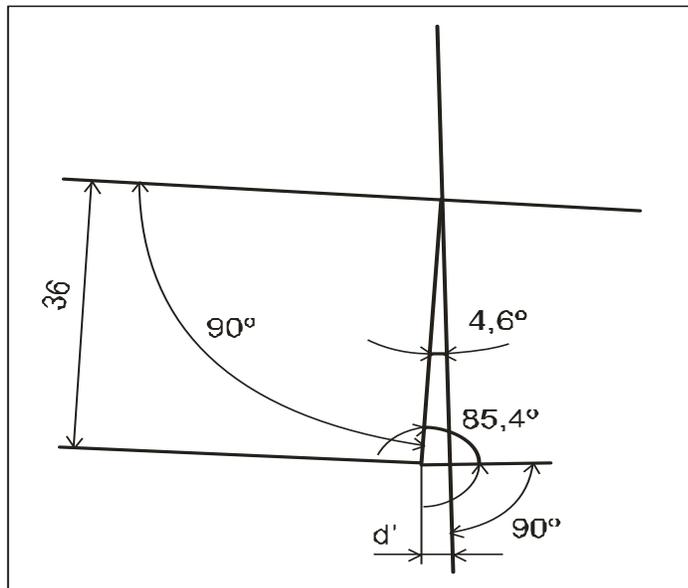


Fuente: Autores del proyecto 2008

Los valores del polígono de fuerzas se deben multiplicar por cien para obtener las magnitudes reales de estas ya que se encuentran en una escala de 1:100.

$$\begin{aligned}
 F_{1-4} &= 800\text{N} \\
 F_{3-4} &= 45767,72 \\
 F_{3-4} &= F_{4-3} = F_{2-3} = F_{3-2} = F_{1-2}
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

**Figura 19. Relación geométrica para cálculo de torque**



Fuente: Autores del proyecto 2008

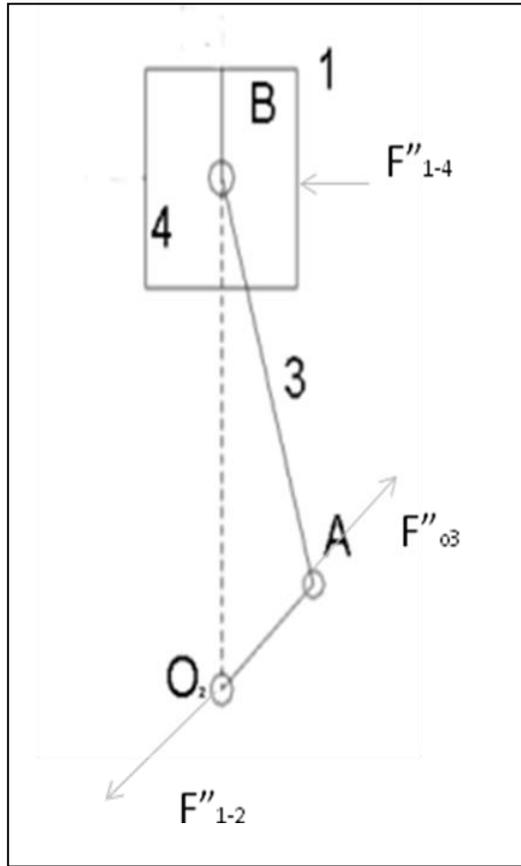
La figura anterior nos permite determinar la distancia perpendicular necesaria para el cálculo del torque  $T$ 's:

$$\begin{aligned}
T'_S &= F_{1-2} \times d' \\
d' &= 0,036m \times \cos 85,4^\circ \\
d' &= 0,0029m \\
T'_S &= 45767,72N \times 0,0029m \\
T'_S &= 132,14Nm
\end{aligned}
\tag{37}$$

$$\begin{aligned}
e_3 &= \frac{I_3 \alpha_3}{F_{03}} \\
e_3 &= \frac{0,00165Kg.m^2 \times 7921,59 \frac{Rad}{s^2}}{1339,5N} \\
e_3 &= 0,00976m
\end{aligned}
\tag{38}$$

Con referencia a la figura 20, la cual se muestra en la siguiente pagina, se observa que la fuerza desconocida del mecanismo articulado es  $F_{03}$ , esta es igual que las fuerzas  $F$  y  $F_{04}$ , también genera fuerzas de inercia. Empleando el diagrama de cuerpo libre se pueden ubicar estas fuerzas.

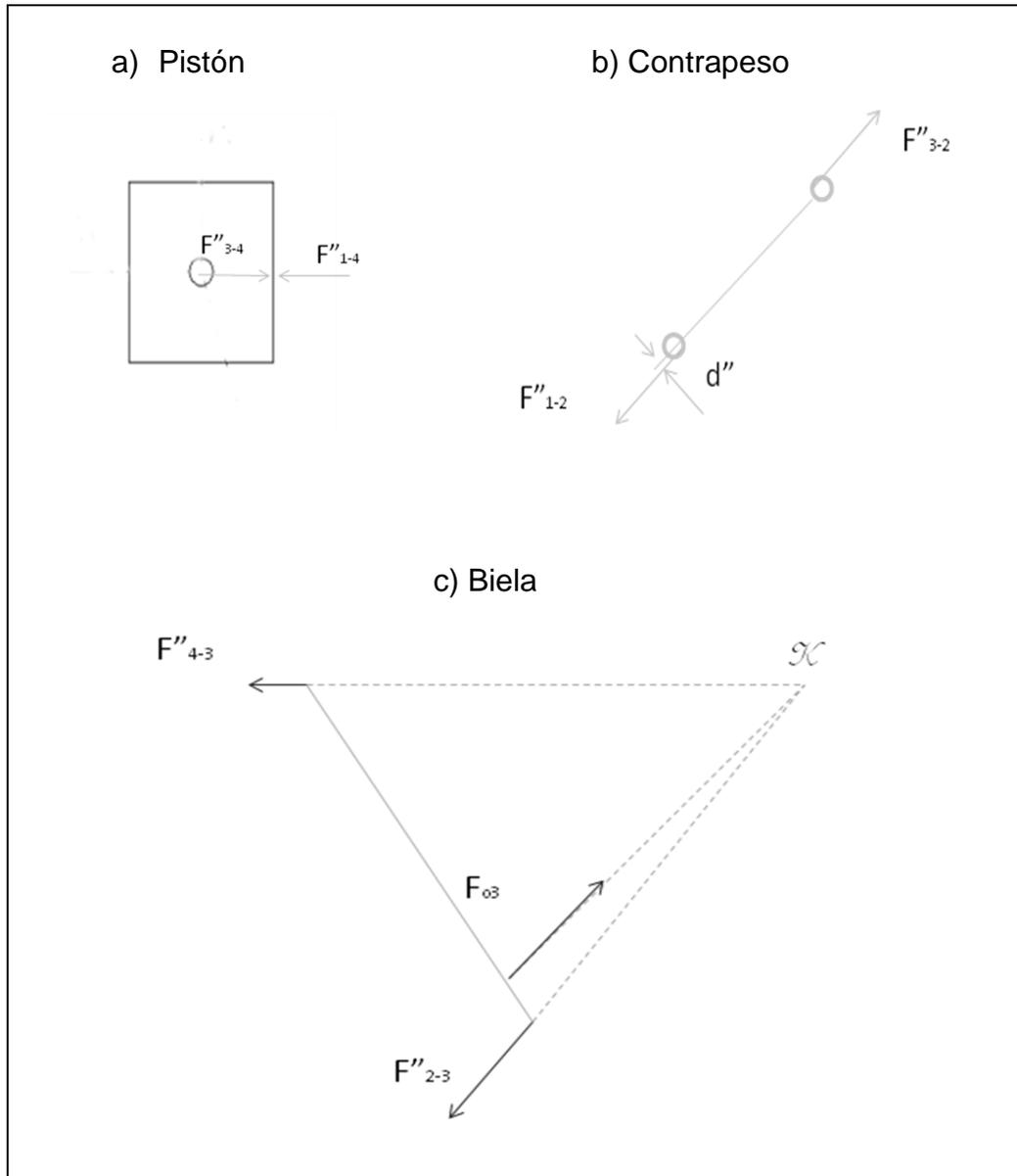
Figura 20. Fuerzas actuantes en la biela



Fuente: Autores del proyecto 2008

Al hacer los correspondientes diagramas de cuerpo libre se pueden observar las fuerzas actuantes en el pistón, la biela y el contrapeso. Dichos diagramas se presentan en la siguiente figura.

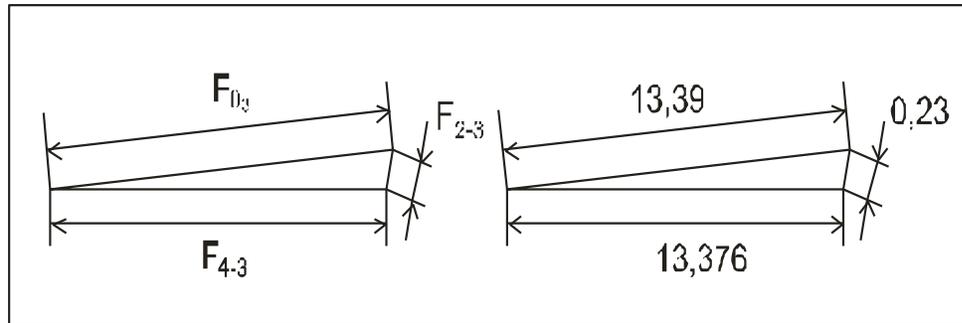
Figura 21. Diagrama de cuerpo libre del mecanismo biela-manivela



Fuente: Autores del proyecto 2008

Estas fuerzas se calculan empleando el polígono de fuerzas, este polígono se muestra en la figura 22, una vez calculadas estas fuerzas es posible hallar el torque generado por las mismas.

**Figura 22. Polígono de Fuerzas**



Fuente: Autores del proyecto 2008

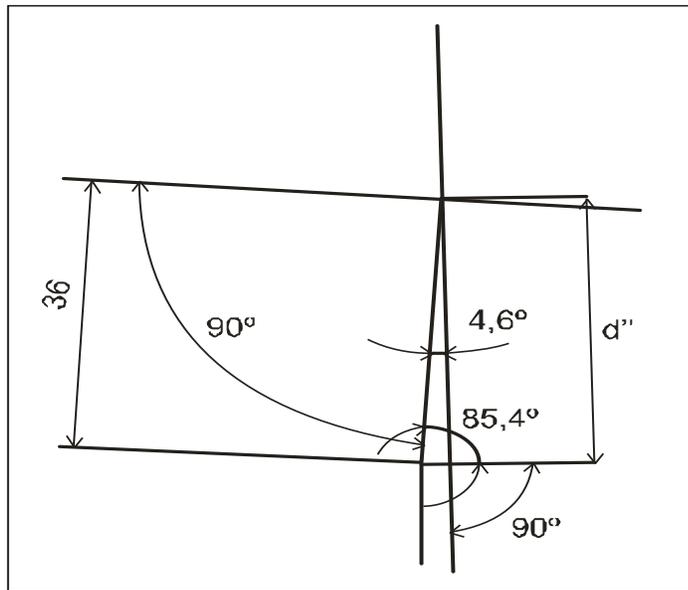
Los valores del polígono de fuerzas se deben multiplicar por cien para obtener las magnitudes reales de estas ya que se encuentran en una escala 1:100.

$$F''_{4-3} = F''_{3-4} = F''_{1-4} = 1337,3N$$

$$F''_{2-3} = F''_{3-2} = F''_{1-2} = 23,4N$$

El torque se calcula multiplicando la fuerza  $F''_{2-3}$  por la distancia  $d''$  la cual se encuentra haciendo la relación geométrica mostrada en la figura 23.

**Figura 23. Relación geométrica para cálculo de torque**



Fuente: Autores del proyecto 2008

$$d'' = 0,036m \times \cos 4,6^\circ \quad (39)$$

$$d'' = 0,0358m$$

$$T''_s = F''_{2-3} \times d''$$

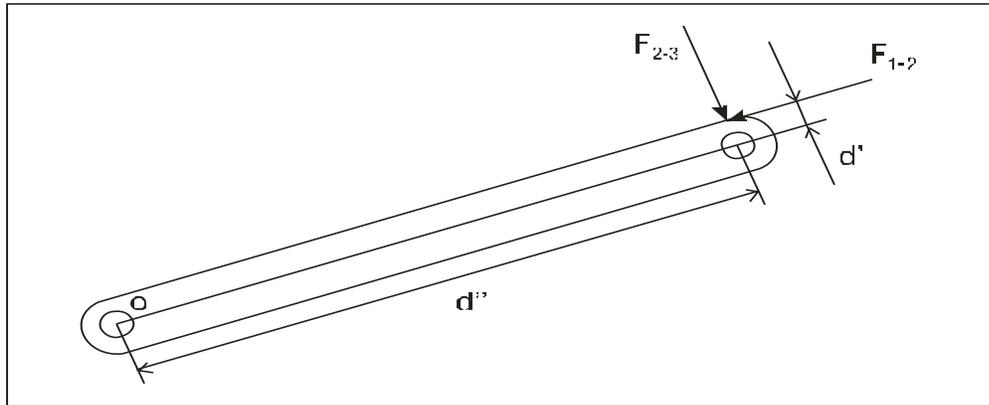
$$T''_s = 23,4N \times 0,0358m \quad (40)$$

$$T''_s = 0,84Nm$$

El torque total  $T_s$  del cigüeñal es la suma algebraica de de los torques  $T'_s$  y  $T''_s$  calculados con anterioridad.

En la figura 24 se representan las fuerzas que generan estos torques y las respectivas distancias perpendiculares para el calculo de los mismos.

**Figura 24. Diagrama de Cuerpo Libre para Cálculo de Torque**



Fuente: Autores del proyecto 2008

$$\begin{aligned} T_s &= T's + T''_s \\ T_s &= 132,14Nm - 0,84Nm \\ T_s &= 131,3Nm \end{aligned} \quad (41)$$

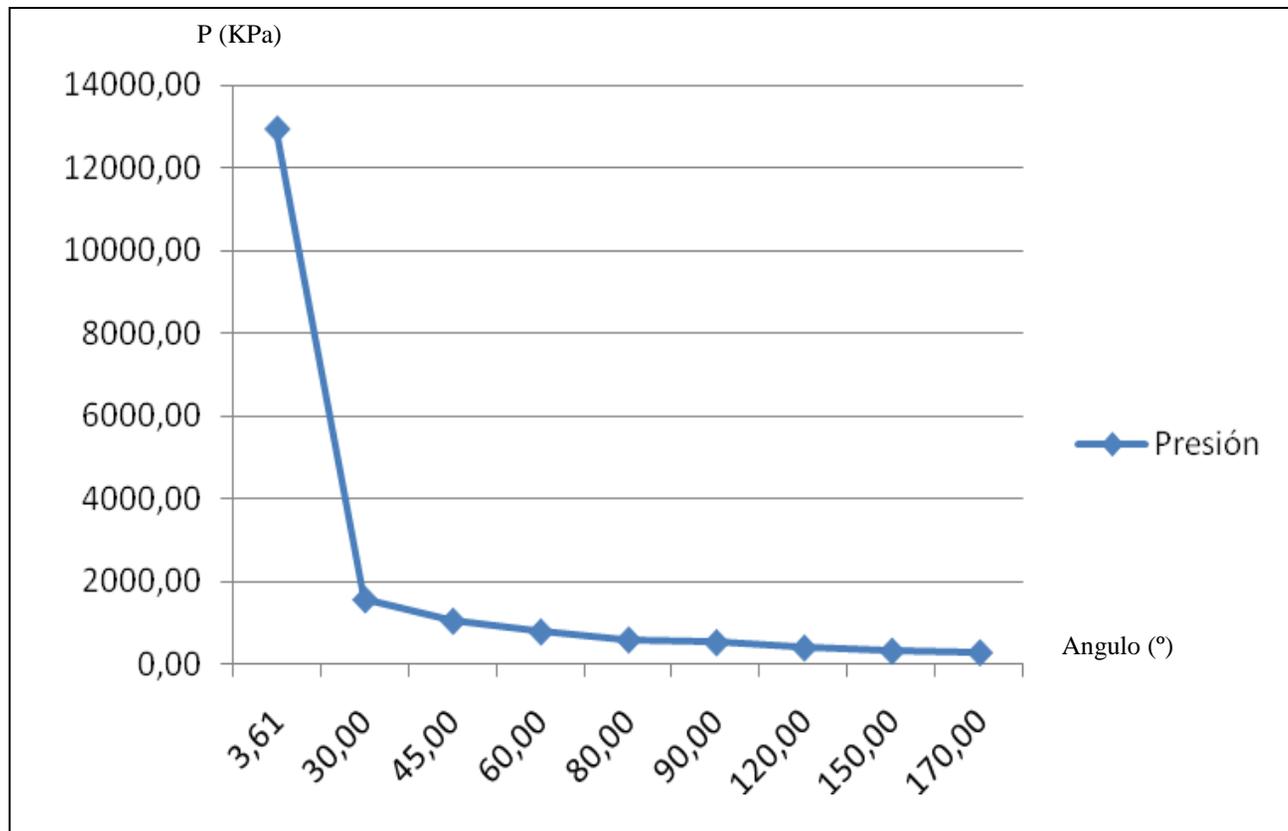
Vale la pena aclarar que el cálculo anterior corresponde a la posición del mecanismo en la cual el pistón se encuentra en el punto muerto superior, sin embargo este cálculo se realizó para ocho posiciones más y los resultados se muestran en las siguientes tablas.

**Tabla 5. ACELERACIONES DEBIDAS A LOS ANGULOS DE POSICION DEL MECANISMO**

DATOS INICIALES	ANGULOS DE POSICION							ACELERACIONES							
	3200	$\lambda$	$\theta$	$\text{sen } \lambda$	$\text{sen } \theta$	$\phi$	Ab (m/s <sup>2</sup> )	Aa (m/s <sup>2</sup> )	Ag (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha^3$ (Rad/s <sup>2</sup> )	Pos. Piston(m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Presión (Kpa)	Fuerza (KN)	
VELOCIDAD CIGÜEÑAL (RPM)	3200	$\lambda$	$\theta$	$\text{sen } \lambda$	$\text{sen } \theta$	$\phi$	Ab (m/s <sup>2</sup> )	Aa (m/s <sup>2</sup> )	Ag (m/s <sup>2</sup> )	$\alpha^3$ (Rad/s <sup>2</sup> )	Pos. Piston(m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Presión (Kpa)	Fuerza (KN)	
VELOCIDAD CIGÜEÑAL (Rad/s)	335,1	1	1,00	3,61	0,02	0,06	175,39	5145,18	4042,59	4465,00	7921,59	1,35E-03	5,01E-06	12924,00	47,82
CARRERA (mm)	67,5	2	7,96	30,00	0,14	0,50	142,04	4060,73	4042,59	3919,20	6942,06	1,13E-02	4,16E-05	1555,19	5,75
PESO PISTON (Kg)	0,4	3	11,29	45,00	0,20	0,71	123,71	2858,54	4042,59	3356,60	5981,69	1,69E-02	6,24E-05	1036,79	3,84
AREA PISTON (m <sup>2</sup> )	0,004	4	13,88	60,00	0,24	0,87	106,12	1461,55	4042,59	2812,30	5136,90	2,25E-02	8,33E-05	777,59	2,88
PESO BIELA (Kg)	0,3	5	15,83	80,00	0,27	0,98	84,17	-349,98	4042,59	2548,00	4791,38	3,00E-02	1,11E-04	583,20	2,16
LONGITUD BIELA (m)	0,13	6	16,08	90,00	0,28	1,00	73,92	-1119,49	4042,59	2525,4	4896,27	3,38E-02	1,25E-04	518,40	1,92
LONGITUD CIGÜEÑAL (m)	0,036	7	13,88	120,00	0,24	0,87	46,12	-2581,04	4042,59	3105,6	5713,93	4,50E-02	1,67E-04	388,80	1,44
PRESION (Kpa)	12924	8	7,96	150,00	0,14	0,50	22,04	-2941,24	4042,59	3513,3	6110,38	5,63E-02	2,08E-04	311,04	1,15
FUERZA (KN)	47,82	9	2,76	170,00	0,05	0,17	7,24	-2929,20	4042,59	3603,3	6156,83	6,38E-02	2,36E-04	274,44	1,02

Fuente: Autores del proyecto 2008

Figura 25. Presión vs. Ángulo del cigüeñal



77

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 6. TORQUE T's DEBIDO A LAS FUERZAS EN EL PISTON**

	Fo4(N)	Fo3(N)	F4(N)	F1-4(N)	F3-4(N)	T's(Nm)
1	2058,07	1339,50	45760,73	800	45767,72	132,14
2	1624,29	1175,76	4129,90	580	4170,43	92,43
3	1143,42	1006,98	2692,71	540	2746,33	82,16
4	584,62	843,69	2292,48	570	2362,28	81,71
5	-139,99	764,40	2297,82	650	2387,98	85,48
6	-447,79	757,62	2365,86	682	2462,20	88,14
7	-1032,42	931,68	2470,96	610	2545,15	91,11
8	-1176,50	1053,99	2327,34	325	2349,92	84,12
9	-1171,68	1080,99	2187,13	105	2189,65	78,38

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 7. TORQUE T''s DEBIDO A LAS FUERZAS EN LA BIELA**

	F''23(N)	F''43(N)	T''s(Nm)
1	23,4	1337,3	0,84
2	186,62	1062,5	5,30
3	278,81	790,37	5,57
4	404,78	468,5	4,05
5	1200,2	446,9	-4,59
6	727,4	209,7	-7,25
7	446,7	1290,6	-11,15
8	168,5	1128,1	-5,62
9	51,82	1067,48	-1,85

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 8. TORQUE TOTAL T<sub>s</sub>**

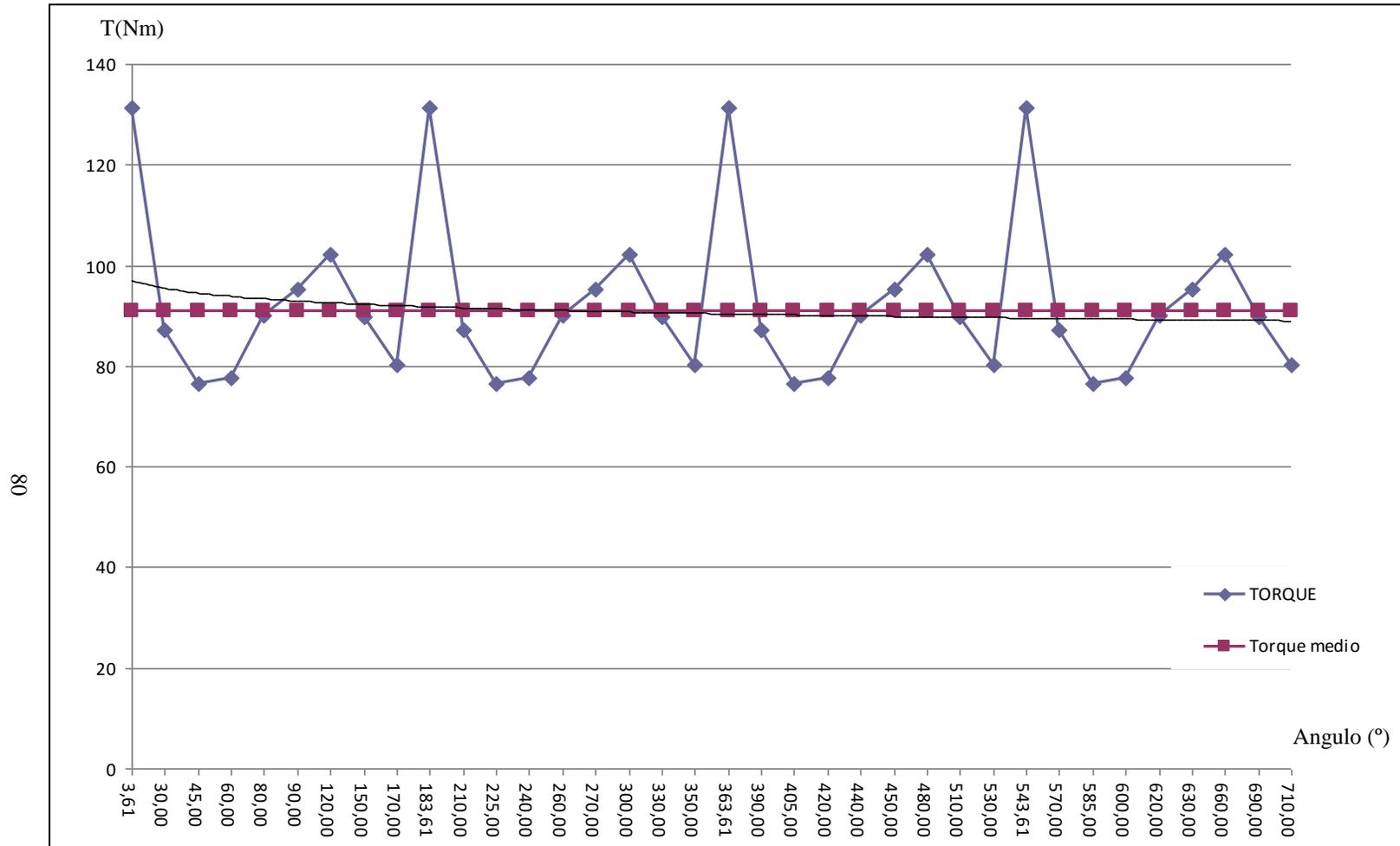
$\theta$	T <sub>s</sub> (Nm)
3,61	131,2991052
30,00	87,13569278
45,00	76,58702457
60,00	77,66060563
80,00	90,07201899
90,00	95,39031993
120,00	102,2531274
150,00	89,74079157
170,00	80,23156256

Fuente: Autores del proyecto 2008

El procedimiento de cálculo utilizado en las tablas anteriores es igual al empleado para hallar los resultados en la primera posición, por lo tanto para efectos prácticos solo se presentan los resultados obtenidos después de emplear este método y aplicar las formulas allí contenidas.

Y finalmente se determino el torque medio que se genera dentro del motor. La siguiente figura muestra la variación del torque en función de la posición del cigüeñal y el torque medio.

Figura 26. Torque vs. Ángulo del cigüeñal



Fuente: Autores del proyecto 2008

Realizando el correspondiente cálculo estadístico se puede determinar que el torque medio es de 91.06 Nm, hecho que supera el torque mínimo requerido para que el vehículo pueda empezar un desplazamiento, por lo tanto desde el punto de vista dinámico el motor es viable.

#### 7.4 CALCULO DE AUTONOMÍA

El cálculo de autonomía se realizó para determinar el máximo recorrido que puede efectuar el vehículo sin tener que reaprovisionar, teniendo en cuenta el espacio disponible dentro de la carrocería para la ubicación de los cilindros de almacenamiento, el resultado esperado para dicho cálculo era de 100Km como mínimo o de lo contrario habría que replantear algunos aspectos como la presión de servicio, el tamaño de los tanques, de la carrocería, de la rueda o de otros elementos que intervinieran en el desempeño del vehículo.

Para realizar el cálculo se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

**Tabla 9. RELACIONES DE CAJA**

RELACIONES DE CAJA	
1	3,416
2	1,95
3	1,28
4	0,971
5	0,767
Reversa	3,272
Relación de eje	4,444

Fuente: Ficha técnica Chevrolet Spark

$n_{motor}$ : 3200 rpm

$R_{rueda}$ : 0,266 m

Y los resultados obtenidos a partir de estos son los siguientes

$$n_{caja} = \frac{n_{motor}}{rc}$$

$$n_{caja} = \frac{3200rpm}{3,416} \quad (42)$$

$$n_{caja} = 936,77rpm$$

$$n_{eje} = \frac{n_{caja}}{re}$$

$$n_{eje} = \frac{936,77rpm}{4,444} \quad (43)$$

$$n_{eje} = 210,79rpm$$

$$\dot{m} = \frac{4 \times m_4 \times n_{eje}}{60}$$

$$\dot{m} = \frac{4 \times 4,68 \times 10^{-3} Kg \times 210,79rpm}{60s} \quad (44)$$

$$\dot{m} = 0,066 Kg/s$$

$$\dot{v} = \frac{4 \times V_3 \times n_{eje}}{60}$$

$$\dot{v} = \frac{4 \times 3,01 \times 10^{-5} \times 210,79rpm}{60s} \quad (45)$$

$$\dot{v} = 4,23 \times 10^{-4} m^3/s$$

$$V_{rueda} = n_{eje} \times R_{rueda} \times \frac{2\pi}{60s} \times \frac{3600s}{1h} \times \frac{1km}{1000m}$$

$$V_{rueda} = 210,79rpm \times 0,266m \times \frac{2\pi}{60s} \times \frac{3600s}{1h} \times \frac{1km}{1000m} \quad (46)$$

$$V_{rueda} = 21,1 Km/h$$

Los anteriores cálculos fueron realizados para la primera relación de la caja, sin embargo las formulas empleadas y el procedimiento utilizado es el mismo para las cuatro restantes y para la reversa.

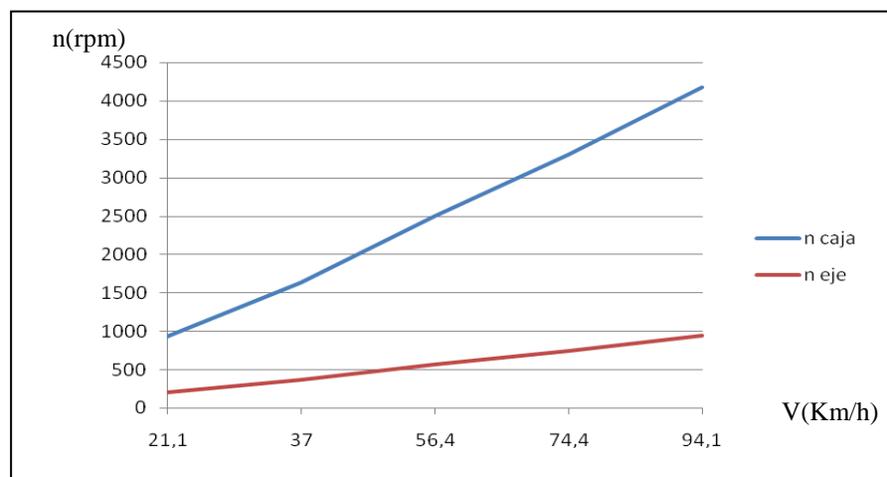
Los resultados obtenidos para las relaciones restantes están consignados en la siguiente tabla:

**Tabla 10. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 3200 RPM EN EL MOTOR**

$n_{motor}$ (rpm) 3200	CAJA DE VELOCIDADES						Rueda (m)
	1	2	3	4	5	Reversa	
$n_{caja}$ (rpm)	936,77	1641,03	2500,00	3295,57	4172,10	978,00	
$n_{eje}$ (rpm)	210,79	369,27	562,56	741,58	938,82	220,07	
$\dot{m}$ (Kg/s)	0,066	0,115	0,176	0,231	0,293	0,069	
$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> /s)	4,23E-04	7,41E-04	1,13E-03	1,49E-03	1,88E-03	4,42E-04	
$V_{rueda}$ (Km/h)	21,1	37,0	56,4	74,4	94,1	22,1	

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Figura 27. RPM vs. Velocidad en la rueda para 3200 rpm en el motor**



Fuente: Autores del proyecto 2008

Para determinar la autonomía se requiere la presión de servicio, el volumen de almacenamiento y la presión máxima en los cilindros, estos datos son los siguientes:

$$P_{servicio} : 12924 KPa^{13}$$

$$V_{almacenamiento} : 40l^{14}$$

$$P_{alm} : 250bar$$

Las dimensiones del cilindro que se va a utilizar para transportar el aire son 240mm de diámetro externo X 1050mm de longitud total, las dimensiones del espacio destinado para los cilindros en la carrocería son de 900mm X 400mm X 1100 mm con lo cual se pueden transportar 3 de estos para tener un almacenamiento de 120 litros.

Es decir que la capacidad de almacenamiento de los tres cilindros a la presión máxima de 250 bares será:

$$V_{\max_{alm}} = \frac{P_{alm} \times 3V_{almacenamiento}}{P_{atm}}$$

$$V_{\max_{alm}} = \frac{\left( 250bar \times 3 \times 40l \times \frac{100KPa}{1bar} \times \frac{1m^3}{1000l} \right)}{74,6KPa} \quad (47)$$

$$V_{\max_{alm}} = 40,2m^3$$

Teniendo en cuenta que el flujo volumétrico de aire a una velocidad máxima de 94,1Km/h para la quinta marcha es de  $1,88 \times 10^{-3} m^3/s$ , tal y como se muestra en la anterior tabla, se calculo el tiempo que duraría la carga en los

<sup>13</sup> Tomado del análisis termodinámico

<sup>14</sup> Datos suministrados por Hydrotest

tanques para dichas condiciones teniendo en cuenta que el reaprovisionamiento de aire se debe hacer cuando la presión de los tanques alcance la presión de servicio, es decir cuando se indique una presión de 12924KPa. Los resultados obtenidos tras este análisis son:

$$V \min_{alm} = \frac{V \max_{alm} \times P_{servicio}}{P_{alm}}$$

$$V \min_{alm} = \frac{40,2m^3 \times 12924KPa}{25000KPa} \quad (48)$$

$$V \min_{alm} = 20,8m^3$$

$$t_{carga} = \frac{V \min_{alm}}{\dot{v}}$$

$$t_{carga} = \frac{20,8m^3}{1,88 \times 10^{-3} m^3/s} \quad (49)$$

$$t_{carga} = 11054,1s$$

Finalmente se calculó la autonomía en kilómetros que nos brindan los cilindros para las condiciones citadas en el párrafo anterior.

$$AUT = t_{carga} \times V_{rueda}$$

$$AUT = 11054,1s \times 94,1 \frac{km}{h} \times \frac{1h}{3600s} \quad (50)$$

$$AUT = 288,58Km$$

Como puede apreciarse la autonomía obtenida supera ampliamente las expectativas iniciales, sin embargo este es un cálculo teórico ya que el motor no siempre estará en el mismo régimen de revoluciones y por ende la

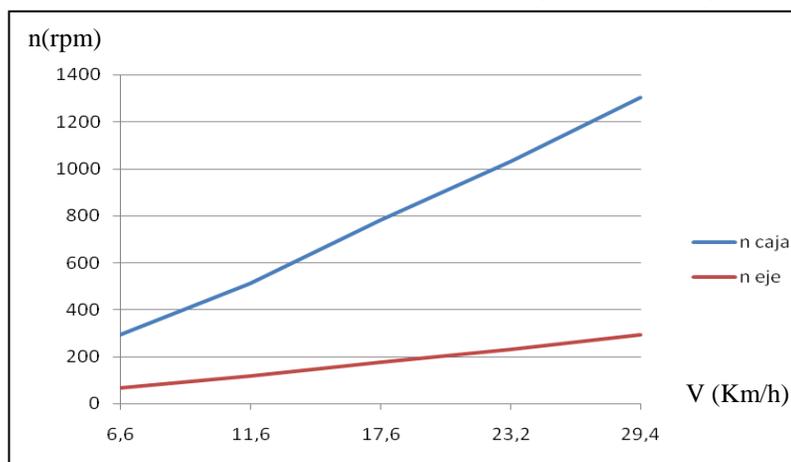
velocidad del carro va a variar al igual que el consumo de aire dentro de este. Sin embargo la reducción de la velocidad del motor contribuye a un incremento en el tiempo de descarga de los cilindros manteniendo los kilómetros de autonomía, tal y como se muestra en las siguientes tablas, pese a esto el calculo de autonomía realizado nos da un acercamiento medio de la cantidad de aire que se consumirá y del tiempo y la duración en kilómetros del mismo.

**Tabla 11. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 1000 RPM EN EL MOTOR**

$n_{motor}$ (rpm)	CAJA DE VELOCIDADES						Rueda (m)
	1	2	3	4	5	Reversa	
1000							0,266
$n_{caja}$ (rpm)	292,74	512,82	781,25	1029,87	1303,78	305,62	
$n_{eje}$ (rpm)	65,87	115,40	175,80	231,74	293,38	68,77	
$\dot{m}$ (Kg/s)	0,021	0,036	0,055	0,072	0,092	0,021	
$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> /s)	1,32E-04	2,32E-04	3,53E-04	4,65E-04	5,89E-04	1,38E-04	
$V_{rueda}$ (Km/h)	6,6	11,6	17,6	23,2	29,4	6,9	

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Figura 28. RPM vs. Velocidad en la rueda para 1000 rpm en el motor**



Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 12. AUTONOMIA DEL VEHICULO PARA 1000 RPM EN EL MOTOR**

AUTONOMIA			
Presión(Pa)	Valmac(m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Tiempo(s)
74600	0,12	0,001	1,0
25000000	40,21447721	20,78927614	<b>35313,13096</b>
12924000	20,78927614	<b>Tiempo(S)</b>	<b>Desplaza(Km)</b>
		3600	29,4
		35313,13096	<b>288,5878754</b>

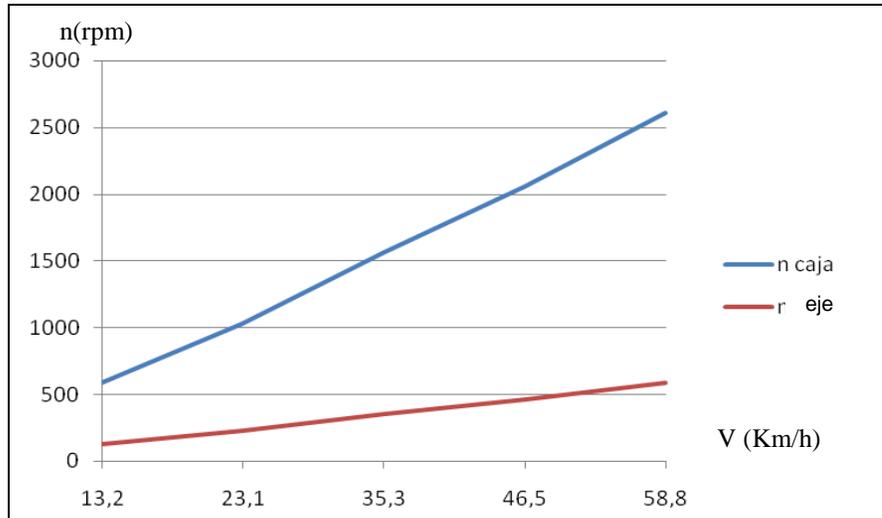
Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 13. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 2000 RPM EN EL MOTOR**

$n_{motor}$ (rpm)	CAJA DE VELOCIDADES						Rrueda (m)	
	2000	1	2	3	4	5		Reversa
$n_{caja}$ (rpm)	2000	585,48	1025,64	1562,50	2059,73	2607,56	611,25	0,266
$n_{eje}$ (rpm)		131,75	230,79	351,60	463,49	586,76	137,54	
$\dot{m}$ (Kg/s)		0,041	0,072	0,110	0,145	0,183	0,043	
$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> /s)		2,64E-04	4,63E-04	7,06E-04	9,30E-04	1,18E-03	2,76E-04	
$V_{rueda}$ (Km/h)		13,2	23,1	35,3	46,5	58,8	13,8	

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Figura 29. RPM vs. Velocidad en la rueda para 2000 rpm en el motor**



Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 14. AUTONOMIA DEL VEHICULO PARA 2000 RPM EN EL MOTOR**

AUTONOMIA				
Presión(Pa)	Valmac(m <sup>3</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )		Tiempo(s)
74600	0,12	0,001		1,0
25000000	40,21447721	20,78927614		<b>17656,56548</b>
12924000	20,78927614		<b>Tiempo(S)</b>	<b>Desplaza(Km)</b>
		3600		58,8
		17656,56548		<b>288,5878754</b>

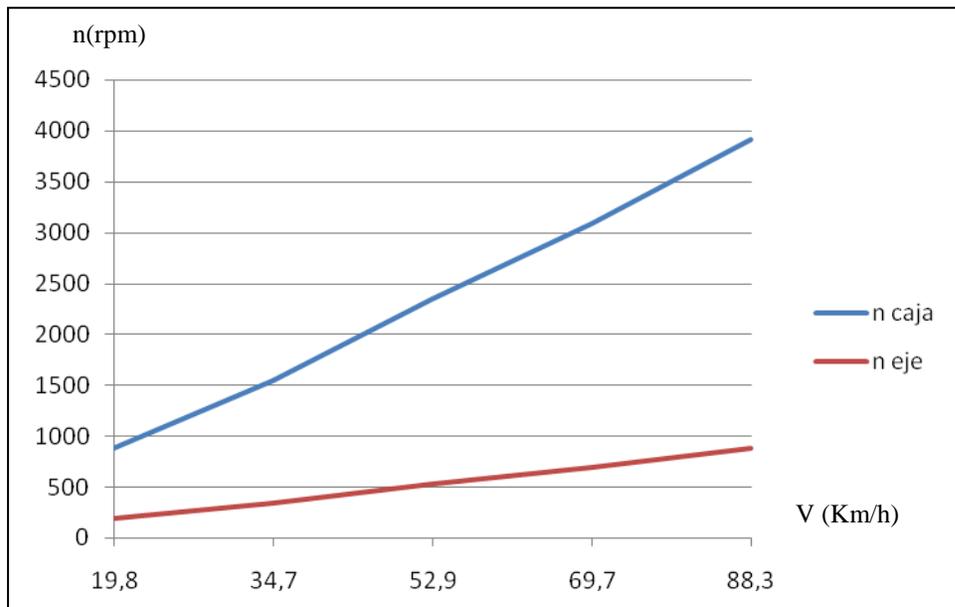
Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 15. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 3000 RPM EN EL MOTOR**

$n_{motor}$ (rpm)	CAJA DE VELOCIDADES						Rueda (m)
	1	2	3	4	5	Reversa	
3000							0,266
$n_{caja}$ (rpm)	878,22	1538,46	2343,75	3089,60	3911,34	916,87	
$n_{eje}$ (rpm)	197,62	346,19	527,40	695,23	880,14	206,32	
$\dot{m}$ (Kg/s)	0,062	0,108	0,165	0,217	0,275	0,064	
$\dot{V}$ (m <sup>3</sup> /s)	3,97E-04	6,95E-04	1,06E-03	1,40E-03	1,77E-03	4,14E-04	
$V_{rueda}$ (Km/h)	19,8	34,7	52,9	69,7	88,3	20,7	

Fuente: Autores del proyecto 2008

**Figura 30. RPM vs. Velocidad en la rueda para 3000 rpm en el motor**



Fuente: Autores del proyecto 2008

**Tabla 16. VELOCIDAD DEL VEHICULO PARA 3000 RPM EN EL MOTOR**

<b>AUTONOMIA</b>			
<b>Presión(Pa)</b>	<b>Valmac(m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Tiempo(s)</b>
74600	0,12	0,002	1,0
25000000	40,21447721	20,78927614	<b>11771,04365</b>
<b>12924000</b>	<b>20,78927614</b>	<b>Tiempo(S)</b>	<b>Desplaza(Km)</b>
		3600	88,3
		11771,04365	<b>288,5878754</b>

Fuente: Autores del proyecto 2008

## **8. PARAMETROS, MODIFICACIONES Y RECOMENDACIONES PARA EL MOTOR ESCOGIDO**

Como ya se había mencionado en el capítulo 6 el motor seleccionado como base para ser modificado y adaptado al uso de aire comprimido será el motor del automóvil Chevrolet Spark, por lo tanto las características del modelo propuesto serán similares a las de este, los parámetros con los que debe contar el motor y otros elementos relacionados directamente con el desempeño y buen funcionamiento del mismo que se derivan de los resultados obtenidos en la presente investigación son los siguientes:

- Cuatro cilindros con disposición en línea, dos válvulas y 995 cm<sup>3</sup>.
- Presión de servicio de 12924 Kpa
- Potencia de 35 HP a 3200 rpm.
- Transmisión mecánica de cinco marchas adelante y una atrás.
- Tracción delantera.
- Rueda 155/65 R13.
- 3 cilindros de 40 lt cada uno.
- Presión máxima de carga en los cilindros de 250 bares.
- Peso máximo de 1200Kg.

Se utilizan cuatro cilindros dispuestos en línea tal y como aparecen en el motor del Chevrolet Spark, las dos válvulas por cilindro corresponden a una de admisión y una de escape, la válvula de admisión hace las veces de inyector e introduce pulsos de aire al cilindro a la presión de servicio, la cual es suficiente para sacar a los pistones de los puntos muertos tanto superior como inferior, con esta presión también se debe asegurar una potencia de 35 HP en un régimen de 3200 rpm para que el motor este en capacidad de iniciar su desplazamiento en un plano inclinado con una pendiente de hasta 36.4 %, la cual será transmitida a una caja mecánica de cinco velocidades y a su vez hacia los ejes delanteros los cuales transmiten el movimiento a las ruedas de 155 mm de ancho y 100.75 mm de perfil que corresponde a la

distancia que hay entre el suelo y el rin el cual tiene un diámetro de 13 in, el perfil equivale al 65 % del ancho de la rueda.

Por otra parte el motor recibe el aire a la presión requerida de unos cilindros que se ubicaran en la parte posterior del vehiculo y los cuales estarán cargados a una presión máxima de 250 bares, cuando la presión en ellos llegue a la presión de servicio el sistema deberá ser recargado. Los tanques fueron seleccionados, en lo que a tamaño se refiere, de acuerdo con los datos suministrados por los grupos de la estructura y la carrocería, grupos que a su vez están encargados del diseño correspondiente al chasis, la seguridad y la comodidad del vehiculo.

Como modificaciones al motor seleccionado y recomendaciones para los futuros grupos de trabajo se debe decir que el ajuste valvular debe estar sujeto al tiempo de respuesta de las válvulas de admisión y escape del aire comprimido dentro de los cilindros, dependiendo esto se debe hacer la elección entre un sistema mecánico, tal y como lo es el del motor base, o inclinarse por un sistema eléctrico o electrónico, en cualquiera de los dos casos resulta necesario hacer una alteración en la culata del motor para ajustar los mecanismos anteriormente nombrados.

La parte correspondiente a transmisión de potencia, que esta directamente relacionada con la autonomía del vehiculo, se hizo utilizando las características de la caja del Chevrolet Spark por lo tanto se recomienda que este sistema se mantenga como base para futuros diseños y cálculos y que se hagan las modificaciones estrictamente necesarias para incrementar el desempeño y autonomía del carro.

El sistema eléctrico corresponde a otro proyecto, sin embargo se recomienda que en la elaboración de este se tengan en cuenta a demás de las luces indicadoras tradicionales un testigo que indique si hay algún problema con la operación de los cilindros y las válvulas reguladoras, adicionalmente se debe incorporar un manómetro que indique la presión de los tanques y el momento en el cual se deben recargar.

## 9. ESTUDIO FINANCIERO

A continuación se presentan los costos comerciales de los elementos relacionados en la elaboración de este proyecto y que deben ser tenidos en cuenta para la continuación del mismo.

Teniendo en cuenta que en el estudio de la viabilidad de funcionamiento de un motor de aire comprimido en un automóvil para las condiciones de la ciudad de Bogota D.C., intervienen elementos del vehículo que están directamente relacionados únicamente con su movimiento. Dichos elementos son:

- Motor
- Caja
- Ruedas (completas)
- Ejes de transmisión delantera
- Tanques (3)

Cada uno de estos elementos representan un valor comercial poco factible para su adquisición por separado, ya que la suma del valor de las partes exceden el costo total del vehículo. Sin embargo los valores que se indican a continuación determinan una proyección financiera para la siguiente etapa del proyecto la cual comprende las modificaciones necesarias para las pruebas físicas del motor:

**Tabla 17. VALOR COMERCIAL ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA SIGUIENTE ETAPA DEL PROYECTO**

<b>Elementos</b>	<b>Valor (\$)</b>
Motor Chevrolet Spark 1.0	11'132.000
Caja Chevrolet Spark 1.0	4'452.000
Ejes de transmisión delantera (x2)	600.000
Tanques para almacenamiento de gnv (x3)	550.000
Ruedas (x4)	200.000

Fuente: Los Coches Sabana

## 10.CONCLUSIONES

Luego de comprobar la viabilidad del proyecto mediante el modelo matemático empleado, se pueden realizar las siguientes apreciaciones y a su vez observar el cumplimiento de los objetivos propuestos:

- Teniendo en cuenta que uno de los objetivos propuestos en el desarrollo de este proyecto era confirmar el uso de la herramientas y conocimientos adquiridos por los autores a lo largo de la carrera, se puede confirmar que si se cumplió, ya que fue indispensable emplear un completo análisis desde el punto de vista de ingeniería donde se integraron diferentes conocimientos de varias áreas con el animo de obtener un resultado optimo hacia el desarrollo del proyecto.
- Luego de realizar el estudio pertinente a las condiciones atmosféricas y viales de la ciudad de Bogotá, se puede concluir que una limitación o característica invariable de un lugar determinado no es un impedimento sino que se convierte en un parámetro de diseño fundamental desde el punto de vista de ingeniería.
- Al realizar un proyecto de investigación de esta magnitud, es importante tener en cuenta que los resultados no siempre van concordar con las expectativas planteadas, pero al que al ocurrir esta eventualidad, éste, no va a dejar de ser un avance para la investigación y por esta razón sus resultados deben ser justificados y expuestos.
- El objetivo general, el cual se basa en determinar la viabilidad del proyecto, se cumplió ya que en el análisis de los resultados obtenidos mediante los cálculos se muestra que un vehiculo cuyo motor funcione a base de aire comprimido es funcional teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas de la ciudad de Bogota.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- **ALVAREZ JESUS; CALLEJON ISMAEL** Maquinas térmicas motoras. Ediciones UPC, S.L. Alfaomega, Barcelona 2005.
- **ARIAS PAZ MANUEL.** Manual de automóviles 5ª Edición, Ed Grafico Ibérico, Madrid 1990.
- **CENGEL YUNUS; BOLES MICHAEL A.** Termodinámica 5ª Edición. Ed. McGraw Hill, México D.F. 2006.
- **GREENE RICHARD W.** Compresores Selección uso y mantenimiento. Ed. McGraw Hill. Mexico D.F. 1990.
- **JOVAC M.S.** Motores de automóvil. Ed Mir, Moscú 1982
- **LUKANIN, V.N.** Motores de combustión interna. Ed Mir, Moscú.
- **MABIE HAMILTON H.** Mecanismos y dinámica de maquinaria. Ed Limusa, México D.F. 1978.
- **MERIAM J.L.** Dinámica 2ª Edición. Ed Reverte, Caracas 1984.
- **OBERT EDWAR F.** Motores de combustión interna, Análisis y aplicaciones. Ed Continental S.A, México D.F. 1986.

## 12. INFOGRAFIA

- [www.motordeaire.com](http://www.motordeaire.com).
- [www.aireenergycars.com](http://www.aireenergycars.com)
- [www.iesjuniperserra.net/informaciogeneral/motor%5B2%5D.htm](http://www.iesjuniperserra.net/informaciogeneral/motor%5B2%5D.htm)
- [www.todomotores.cl/mecanica/el\\_motor.htm](http://www.todomotores.cl/mecanica/el_motor.htm)
- [www.sapiensman.com/neumatica/](http://www.sapiensman.com/neumatica/)