

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIANTE LA COMPRESIÓN DE AIRE PARA SOBREALIMENTACIÓN DE UN MOTOR DE AUTOMÓVIL

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

**DAVID ALEJANDRO SOLANO GALARZA
JORGE LUIS ZURITA CAICEDO**

**DIRECTOR: ING. GUILLERMO CABRERA
CODIRECTOR: ING. OSWALDO MARIÑO**

Sangolquí 2012- 11

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIANTE LA COMPRESIÓN DE AIRE PARA SOBREALIMENTACIÓN DE UN MOTOR DE AUTOMÓVIL” fue realizado en su totalidad por los señores: David Alejandro Solano Galarza y Jorge Luis Zurita Caicedo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Guillermo Cabrera

Ing. Oswaldo Mariño

DIRECTOR

CODIRECTOR

Sangolquí, 2012-08-08

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN SISTEMA DE
RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIANTE LA
COMPRESIÓN DE AIRE PARA SOBREALIMENTACIÓN DE UN
MOTOR DE AUTOMÓVIL**

ELABORADO POR:

David Alejandro Solano Galarza

Jorge Luis Zurita Caicedo

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Ing. Xavier Sánchez
DIRECTOR DE LA CARRERA

Sangolquí, 2012-11

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi hermano mayor, *Daniel*. Siempre vivirá en mí

David

A Margarita, Jorge y Gabriel;

Mi familia, mi todo.

Para ustedes

Jorge Luis

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a los Ingenieros Guillermo Cabrera y Oswaldo Mariño, Director y Codirector de tesis respectivamente; por su guía y ayuda en la elaboración de este proyecto. De manera especial al Ingeniero Ernesto Soria por su valioso aporte.

Al Ingeniero Alexis Ortiz nuestro profesor y amigo por su constante apoyo y desinteresada colaboración en gran parte del desarrollo de éste proyecto

Por su ayuda en diferentes etapas de desarrollo de ésta tesis, agradecemos al Doctor Marcelo Mejía, Ingeniero Xavier Sánchez, Ingeniero Alberto Naranjo, Ingeniero Germán Huebla, Roberti Velasco y Nelson Cárdenas.

Agradezco a mis padres, César y María por su apoyo incondicional en todo momento. A mi hermano Daniel quien siempre fue y será mi ejemplo a seguir y a quien llevo siempre conmigo como inspiración en todas las acciones de mi vida. A Nathaly, quien me dio fuerzas para seguir adelante en este duro camino, a mi familia por su cariño y finalmente a Jorge mi compañero de tesis y amigo por su dedicación en este duro camino.

David

A Jorge y Margarita mis padres, ejemplo digno a seguir; por su amor, confianza e incondicional apoyo; A Gabriel, el mejor regalo de mis padres, por una vida junto a mi inigualable amigo, compañero de risas, aventuras y peleas; A Estefanía por su apoyo, consejos y paciencia y sin lugar a dudas para David, querido amigo sin ti esto no hubiese sido posible ¡Lo logramos! Para Uds. mi agradecimiento es eterno...

Jorge Luis

INDICE DE CONTENIDOS

| | |
|----------------------------------------------------|-------|
| CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO | II |
| LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO..... | III |
| DEDICATORIA | IV |
| AGRADECIMIENTO | V |
| INDICE DE CONTENIDOS | VI |
| ÍNDICE DE TABLAS | XI |
| INDICE DE FIGURAS..... | XIII |
| RESUMEN | XVIII |

CAPITULO 1

| | |
|--------------------------------------------------------------------|----------|
| GENERALIDADES | 1 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 1 |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO DE TESIS | 3 |
| 1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA. | 4 |
| 1.4 OBJETIVOS | 5 |
| 1.4.1 OBJETIVO GENERAL..... | 5 |
| 1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 5 |
| 1.5 ALCANCE | 5 |

CAPITULO 2

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| MARCO TEÓRICO | 6 |
| 2.1 ENERGÍA | 6 |
| 2.1.1 TIPOS Y CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA. | 6 |
| 2.1.2 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA..... | 11 |
| 2.1.3 EFICIENCIA DE LA CONVERSIÓN | 18 |
| 2.2 SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA AUTOMOTRICES | 18 |
| 2.2.1 TIPOS DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA AUTOMOTRICES | 22 |
| 2.3 AIRE COMPRIMIDO | 26 |
| 2.3.1 DEFINICIONES Y PROPIEDADES GENERALES | 27 |
| 2.3.2 COMPRESORES DE AIRE | 30 |
| 2.3.3 SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO..... | 30 |
| 2.3.4 EL AIRE COMPRIMIDO COMO MEDIO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.. | 35 |
| 2.4 SOBREALIMENTACIÓN DE MOTORES AUTOMOTRICES | 37 |

CAPITULO 3

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA PARA SOBREALIMENTACIÓN..... | 41 |
| 3.1 DISEÑO DEL SISTEMA..... | 41 |
| 3.1.1 REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES DE DISEÑO..... | 41 |
| 3.1.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS..... | 43 |
| 3.1.3 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA..... | 46 |
| 3.1.4 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA E IDENTIFICACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS..... | 49 |
| 3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA..... | 54 |
| 3.2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA..... | 54 |
| 3.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO..... | 81 |
| 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN..... | 84 |
| 3.3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN Y REGULACIÓN DE AIRE..... | 84 |
| 3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL..... | 95 |
| 3.4.1 CONTROL DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN..... | 96 |
| 3.4.2 CONTROL DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN..... | 97 |
| 3.5 ELABORACIÓN DE PLANOS..... | 98 |

CAPITULO 4

| | |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE..... | 99 |
| 4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO..... | 99 |
| 4.1.1 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE INFERIOR PARA POLEA..... | 102 |
| 4.1.2 PASOS DE FABRICACIÓN DEL DISCO SOPORTE..... | 103 |
| 4.1.3 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA FLECHA PRINCIPAL..... | 104 |
| 4.1.4 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA POLEA INFERIOR..... | 105 |
| 4.1.5 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA ALETA..... | 106 |
| 4.1.6 PASOS DE FABRICACIÓN DEL CILINDRO PARA ALETA..... | 107 |
| 4.1.7 PASOS DE FABRICACIÓN DE CILINDRO SOPORTE..... | 107 |
| 4.1.8 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA CREMALLERA..... | 109 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.9 PASOS DE FABRICACIÓN DEL CILINDRO GUÍA DE LA ALETA | 110 |
| 4.1.10 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA GUÍA PARA CREMALLERA | 111 |
| 4.1.11 PASOS DE FABRICACIÓN DEL PIÑÓN..... | 112 |
| 4.1.12 PASOS DE FABRICACIÓN DE REDUCCIÓN PARA MANGUERA | 113 |
| 4.1.13 PASOS DE FABRICACIÓN DE BASE PARA ACTUADOR | 114 |
| 4.1.14 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE DEL DISTRIBUIDOR DE AIRE | 115 |
| 4.1.15 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE VERTICAL DEL DISTRIBUIDOR. | 116 |
| 4.1.16 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SUJETADOR DE VÁLVULA..... | 117 |
| 4.1.17 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SUJETADOR DE CILINDRO DE ALETA..... | 118 |
| 4.1.18 PASOS DE MODIFICACIÓN A LA TUBERÍA TEE | 119 |
| 4.1.19 PASOS DE FABRICACIÓN DEL EJE PARA RODAMIENTO | 120 |
| 4.1.20 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE PARA RODAMIENTO | 121 |
| 4.1.21 PASOS DE FABRICACIÓN DEL BOCÍN PARA RESORTE | 122 |
| 4.1.22 PASOS DE FABRICACIÓN DEL BRAZO TENSOR | 123 |
| 4.1.23 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE DEL TENSOR..... | 124 |
| 4.1.24 PASOS DE FABRICACIÓN DEL EJE DEL TENSOR | 125 |
| 4.1.25 PASOS DE FABRICACIÓN DEL EJE DE LA POLEA DEL TENSOR | 126 |
| 4.1.26 PASOS DE FABRICACIÓN DEL BOCÍN PARA EMBRAGUE..... | 127 |
| 4.1.27 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE PARA EMBRAGUE..... | 128 |
| 4.1.28 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA FLECHA SECUNDARIA | 129 |
| 4.2 ELABORACIÓN DE LOS PLANOS DE MONTAJE..... | 130 |
| 4.3 MONTAJE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO | 131 |
| 4.4 SISTEMA DE INTERCAMBIO DE ALIMENTACIÓN ATMOSFÉRICA Y SOBREALIMENTACIÓN..... | 132 |
| 4.5 MONTAJE E INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO | 132 |

CAPITULO 5

| | |
|---------------------------------------|------------|
| PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO..... | 133 |
|---------------------------------------|------------|

| | |
|--------------------------------------------|------------|
| 5.1 DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS..... | 133 |
|--------------------------------------------|------------|

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.1 PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA | 133 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.1.2 PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN..... | 135 |
| 5.1.3 PRUEBAS A REALIZARSE..... | 138 |
| 5.1.4 EQUIPO A UTILIZAR | 158 |
| 5.1.5 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS | 159 |
| 5.1.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS | 165 |

CAPITULO 6

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO | 177 |
| 6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO-FINANCIERO | 177 |
| 6.2 COSTOS | 178 |
| 6.2.1 COSTOS DIRECTOS..... | 179 |
| 6.2.2 COSTOS INDIRECTOS..... | 182 |
| 6.3 COSTO TOTAL DEL SISTEMA DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE ENERGIA PARA SOBREALIMENTACIÓN..... | 184 |
| 6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO..... | 184 |

CAPITULO 7

| | |
|-----------------------------------------------|------------|
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 185 |
| 7.1 CONCLUSIONES..... | 185 |
| 7.2 RECOMENDACIONES DEL PROYECTO | 185 |
| BIBLIOGRAFÍA | 187 |

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 3

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| TABLA 3. 1 ENERGÍA DISPONIBLE A DIFERENTES VELOCIDADES | 42 |
| TABLA 3. 2 MATRIZ DE PUNTAJES Y PARÁMETROS..... | 47 |
| TABLA 3. 3 MATRIZ DE SELECCIÓN DEL TIPO DE ACOPLAMIENTO O EMBRAGUE | 47 |
| TABLA 3. 4 MATRIZ DE SELECCIÓN DEL TIPO DE COMPRESOR..... | 48 |
| TABLA 3. 5 MATRIZ DE SELECCIÓN DEL TIPO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA..... | 48 |
| TABLA 3. 6 MATRIZ DE SELECCIÓN DEL TIPO DE CONTROL | 49 |
| TABLA 3. 7 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL COMPRESOR SCHULZ | 83 |
| TABLA 3. 8 DATOS PARA LA FABRICACIÓN DEL PIÑÓN | 94 |
| TABLA 3. 9 DATOS PARA LA FABRICACIÓN DE LA CREMALLERA | 94 |
| TABLA 3. 10 DATOS SIGNIFICATIVOS DEL CILINDRO DE SIMPLE EFECTO. | 94 |

CAPÍTULO 5

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABLA 5. 1 DETERMINACIÓN DE LA EFICACIA Y EFICIENCIA DE LOS SISTEMAS..... | 138 |
| TABLA 5. 2 INSTRUMENTOS PARA PRUEBA DE POTENCIA MÁXIMA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE. | 140 |
| TABLA 5. 3 INSTRUMENTOS PARA PRUEBA DE CAUDAL | 145 |
| TABLA 5. 4 INSTRUMENTOS PARA PRUEBA DE PRESIÓN EN EL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN | 147 |
| TABLA 5. 5 INSTRUMENTOS PARA PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA. | 151 |
| TABLA 5. 6 INSTRUMENTOS PARA PRUEBA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA NEUMÁTICA. | 155 |
| TABLA 5. 7 ESPECIFICACIONES DEL COMPRESOR | 158 |
| TABLA 5. 8 EFICACIA DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA..... | 165 |

CAPÍTULO 6

| | |
|------------------------------------------------------------|-----|
| TABLA 6. 1 COSTO DE MATERIALES DIRECTOS..... | 179 |
| TABLA 6. 2 COSTO DE ELEMENTOS NORMALIZADOS Y EQUIPOS | 180 |
| TABLA 6. 3 COSTO DE MAQUINADO Y MANO DE OBRA | 181 |
| TABLA 6. 4 COSTO DE TOTAL DIRECTO..... | 182 |
| TABLA 6. 5 COSTO DE MATERIALES INDIRECTOS | 182 |
| TABLA 6. 6 COSTO TOTAL INDIRECTO | 183 |
| TABLA 6. 7 COSTO TOTAL..... | 184 |

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

| | |
|--------------------------------------------------------------------|---|
| FIGURA 1. 1 RESERVAS DE PETRÓLEO EN EL MUNDO..... | 1 |
| FIGURA 1. 2 TENDENCIAS DEL USO DE LA ENERGÍA A NIVEL MUNDIAL. | 2 |

CAPÍTULO 2

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2. 1 ENERGÍA CINÉTICA DE UN VEHÍCULO LIVIANO SEGÚN SU VELOCIDAD..... | 8 |
| FIGURA 2. 2 ESQUEMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE (TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS E IMPACTO AMBIENTAL, CIEMAT) | 13 |
| FIGURA 2. 3 ESQUEMA DE UNA REPRESA DE AGUA COMO ALMACENADORA DE ENERGÍA POTENCIAL GRAVITATORIA..... | 14 |
| FIGURA 2. 4 ESQUEMA DE UN RESORTE CON DEFORMACIÓN X | 15 |
| FIGURA 2. 5 CONSERVACIÓN DE ENERGÍA EN EL AUTOMÓVIL | 20 |
| FIGURA 2. 6 CONCEPTO DE EXERGÍA APLICADO AL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA..... | 21 |
| FIGURA 2. 7 COMPORTAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA..... | 23 |
| FIGURA 2. 8 COMPORTAMIENTO BÁSICO DEL SISTEMA MECÁNICA DE VOLANTE DE INERCIA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA..... | 25 |
| FIGURA 2. 9 COMPRESIBILIDAD DEL AIRE | 27 |
| FIGURA 2. 10 SIMBOLOGÍA DE LA UNIDAD DE MANTENIMIENTO..... | 32 |
| FIGURA 2. 11 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE AIRE COMPRIMIDO BAJO TIERRA..... | 36 |
| FIGURA 2. 12 TURBOCOMPRESOR..... | 38 |
| FIGURA 2. 13 FUNCIONAMIENTO DEL TURBOCOMPRESOR | 39 |
| FIGURA 2. 14 SUPERCARGADOR CON COMPRESOR AXIAL..... | 40 |

CAPÍTULO 3

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 3. 1 CUADRO DE SELECCIÓN DE COMPRESOR | 45 |
| FIGURA 3. 2 SISTEMA PRINCIPAL, SISTEMAS SECUNDARIOS Y SUBSISTEMAS..... | 51 |
| FIGURA 3. 3 ESQUEMA DEL SISTEMA A CONSTRUIR | 53 |
| FIGURA 3. 4 ESQUEMA DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA | 55 |
| FIGURA 3. 5 ANÁLISIS DE CARGAS | 56 |
| FIGURA 3. 6 DIAGRAMA DE MOMENTO (N MM) FLECHA PRINCIPAL..... | 56 |
| FIGURA 3. 7 DIAGRAMA DE CORTANTE (N) FLECHA PRINCIPAL | 56 |
| FIGURA 3. 8 ANÁLISIS DE CARGAS..... | 62 |
| FIGURA 3. 9 DIAGRAMA DE MOMENTO (N MM) FLECHA SECUNDARIA | 62 |
| FIGURA 3. 10 DIAGRAMA DE CORTANTE (N) FLECHA SECUNDARIA | 63 |
| FIGURA 3. 11 DISPOSICIÓN DE UBICACIÓN DE POLEAS | 68 |
| FIGURA 3. 12 SELECCIÓN DE RODAMIENTO EN FLECHA PRIMARIA | 75 |
| FIGURA 3. 13 ESQUEMA DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO | 82 |
| FIGURA 3. 14 ESQUEMA DEL SISTEMA DISTRIBUCIÓN Y REGULACIÓN DE AIRE | 85 |
| FIGURA 3. 15 REPRESENTACIÓN DEL DISTRIBUIDOR DE AIRE | 93 |
| FIGURA 3. 16 ESQUEMA DEL SISTEMA CONTROL..... | 96 |

CAPÍTULO 4

| | |
|------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4. 1 SOPORTE INFERIOR..... | 102 |
| FIGURA 4. 2 DISCO SOPORTE. | 103 |
| FIGURA 4. 3 FLECHA PRIMARIA | 104 |
| FIGURA 4. 4 POLEA INFERIOR | 105 |
| FIGURA 4. 5 ALETA | 106 |
| FIGURA 4. 6 CILINDRO EXTERIOR PARA ALETA | 107 |
| FIGURA 4. 7 CILINDRO SOPORTE | 108 |
| FIGURA 4. 8 CREMALLERA..... | 109 |
| FIGURA 4. 9 CILINDRO GUÍA PARA ALETA | 110 |
| FIGURA 4. 10 GUÍA PARA CREMALLERA..... | 111 |

| | |
|------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4. 11 PIÑÓN | 112 |
| FIGURA 4. 12 REDUCCIÓN..... | 113 |
| FIGURA 4. 13 BASE ACTUADOR | 114 |
| FIGURA 4. 14 SOPORTE DEL DISTRIBUIDOR DE AIRE | 115 |
| FIGURA 4. 15 SOPORTE VERTICAL DEL DISTRIBUIDOR | 116 |
| FIGURA 4. 16 SUJETADOR VÁLVULA..... | 117 |
| FIGURA 4. 17 SUJETADOR CILINDRO DE ALETA..... | 118 |
| FIGURA 4. 18 TUBERÍA TEE | 119 |
| FIGURA 4. 19 EJE DEL RODAMIENTO | 120 |
| FIGURA 4. 20 SOPORTE PARA RODAMIENTO | 121 |
| FIGURA 4. 21 BOCÍN | 122 |
| FIGURA 4. 22 BRAZO TENSOR..... | 123 |
| FIGURA 4. 23 SOPORTE TENSOR..... | 124 |
| FIGURA 4. 24 EJE TENSOR | 125 |
| FIGURA 4. 25 EJE POLEA TENSOR | 126 |
| FIGURA 4. 26 BOCÍN PARA EMBRAGUE..... | 127 |
| FIGURA 4. 27 SOPORTE EMBRAGUE | 128 |
| FIGURA 4. 28 FLECHA SECUNDARIA..... | 129 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| GRÁFICO 5. 1 $\Delta P/TR$ VS V_v | 165 |
| GRÁFICO 5. 2 EFICIENCIA DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA | 166 |
| GRÁFICO 5. 3 COMPARACIÓN ENTRE PFSE Y PFSA | 167 |
| GRÁFICO 5. 4 VARIACIÓN DE POTENCIA MÁXIMA | 168 |
| GRÁFICO 5. 5 VARIACIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE..... | 168 |
| GRÁFICO 5. 6 CAUDAL DE AIRE CONSUMIDO POR EL MOTOR EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DE GIRO | 169 |
| GRÁFICO 5. 7 CAÍDA DE PRESIÓN EN EL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN | 170 |
| GRÁFICO 5. 8 EFICIENCIA DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN EN EL TANQUE | 171 |

INDICE DE ANEXOS

| | |
|----------------------------------------------------|-----|
| ANEXO A. TABLA COMPARATIVA DE COMPRESORES | 189 |
| ANEXO B. GUÍA DAYCO PARA BANDAS | 192 |
| ANEXO C. CATÁLOGO RODAMIENTOS SKF..... | 205 |
| ANEXO D. DATOS TÉCNICOS COMPRESOR | 214 |
| ANEXO E. MEMORIA DE CÁLCULOS | 216 |
| ANEXO F. HOJAS TÉCNICAS ELEMENTOS NEUMÁTICOS | 230 |
| ANEXO G. PLANOS DE TALLER | 235 |
| ANEXO H. PLANOS DE MONTAJE | 236 |
| ANEXO I. PLANOS ELÉCTRICO Y NEUMÁTICO..... | 237 |
| ANEXO J. HOJAS TÉCNICAS MATERIALES | 241 |

RESUMEN

En la actualidad el mundo se desarrolla de manera acelerada, la demanda de recursos sigue una tendencia ascendente cada vez más pronunciada y sus costos se disparan sin control.

Existe una permanente búsqueda de nuevos pozos petroleros para complementar los actuales que se encuentran ya en producción.

Es por esta necesidad creciente que se está buscando con urgencia optimizar el uso de los recursos energéticos a todo nivel. Actualmente nos hemos percatado del desperdicio infame e irresponsable que se viene dando desde hace décadas atrás con el petróleo, como una fuente de energía que parecía interminable y relativamente barata.

Como Ingenieros Mecánicos es nuestro deber desarrollar tecnología más eficiente y sistemas que permitan una optimización del uso de la energía buscando su reciclaje y reutilización.

El Sistema de Recuperación de Energía Cinética (SREC) es una opción para recuperar energía que normalmente sería disipada y perdida en el ambiente, siendo recuperada, almacenada y posteriormente reutilizada.

El SREC absorbe parte de la energía cinética del vehículo, se activa cuando se acciona el pedal de freno, en este momento el sistema transforma la energía cinética en neumática y la almacena en el tanque de aire comprimido.

El aire almacenado es luego inyectado en el motor por el Sistema de Sobrealimentación (SS), con el fin de aumentar el flujo de aire hacia en la cámara de combustión y de esta forma aumentar la eficiencia volumétrica, mejorando el desempeño del mismo.

Se diseñaron pruebas para evaluar el desempeño de los sistemas SREC y SS, estableciendo eficiencia y eficacia de los mismos.

El presente proyecto establece las bases para una investigación más profunda y detallada de nuevos métodos de recuperación y almacenamiento de energía.

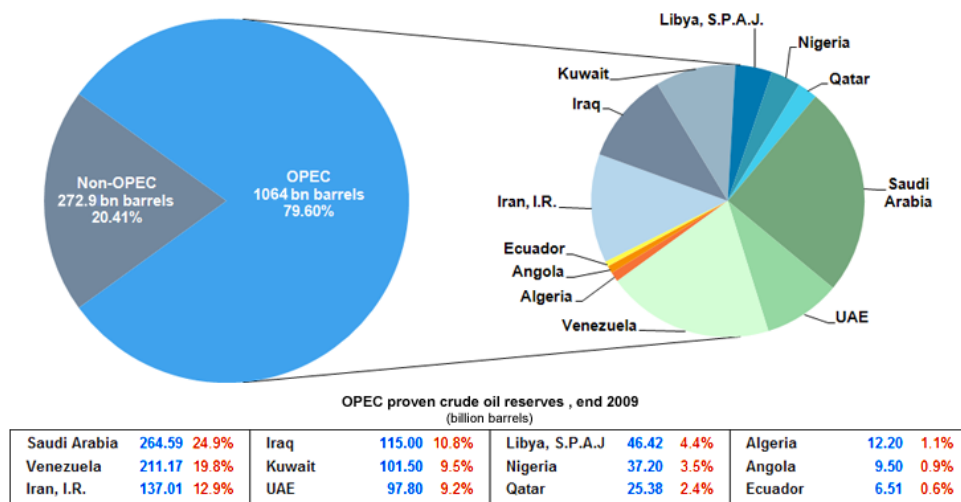
CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), en la actualidad más del 70% del consumo energético mundial proviene de actividades comerciales, industriales y residenciales; asimismo América Latina incluido Brasil, emite el 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. Datos estadísticos indican que de seguir así la tendencia, para el año 2030, las economías emergentes aumentarán su demanda de electricidad 60%, siendo generadoras de 47% del total de CO2.

OPEC Share of World Crude Oil Reserves 2009



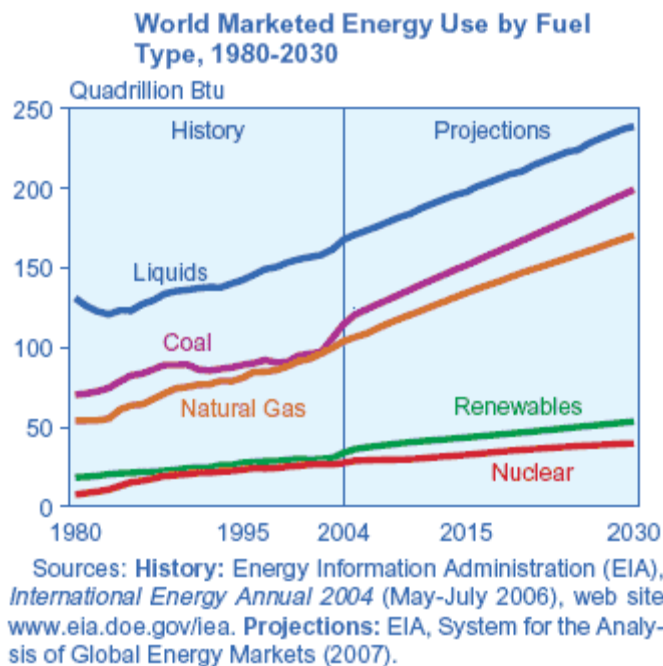
Source: OPEC Annual Statistical Bulletin 2009

Fuente: Internet

Figura 1. 1 Reservas de Petróleo en el mundo.¹

¹: http://www.opec.org/opec_web/en/data_graphs/330.htm Página de internet OPEC, ingles, 2012

Con el aumento de la preocupación por el estado del medio ambiente y el agotamiento de los recursos energéticos fósiles, se han producido grandes avances en la producción de energía de fuentes renovables debido a la necesidad de sustituir o por lo menos reducir la dependencia de los combustibles fósiles y desarrollar sistemas más eficientes que requieran menos energía para realizar el mismo trabajo.



Fuente: Internet

Figura 1. 2 Tendencias del uso de la energía a nivel mundial.²

Como se puede ver en el grafico, a pesar de los esfuerzos en el área de energías renovables las fuentes fósiles son y seguirán siendo la principal fuente de energía en el futuro cercano; por lo tanto es necesario optimizar su uso y hacerlo más eficiente.

² <http://www.eia.gov> Página de internet EIA (Independent Statistics and Analysis), Inglés, 2012

Frente al creciente desgaste e incertidumbres de las energías tradicionales y en un afán por la conservación del medio ambiente, a manera de una estrategia energética nacen los sistemas de recuperación de energía; formando parte de diversas industrias, de generación eléctrica, automotriz (vehículos híbridos), transporte masivo de personas (trenes eléctricos), por nombrar las pioneras en este ámbito.

En el Ecuador los sistemas de recuperación de energía son una novedad. Se encuentran prácticamente en el anonimato en el mercado nacional a través de su utilización en los vehículos híbridos. Esta es una de las motivaciones para desarrollar este proyecto que busca recuperar parte de la energía cinética no utilizada y que se disipada por el sistema de frenado.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL PROYECTO DE TESIS

El petróleo es una fuente de energía no renovable por lo tanto es necesario optimizar su utilización mediante la creación de nuevos sistemas que eleven los niveles de eficiencia de todos los procesos que utilizan hidrocarburos como combustible y la mejora de sistemas ya existentes.

Es por eso que en la actualidad todos los esfuerzos se concentran en la búsqueda de mayor eficiencia para disminuir cada vez más las pérdidas de energía

Una solución es la utilización de sistemas de recuperación de energía; con el fin de dar uso a la energía disipada, transformándola y almacenándola para conseguir un ahorro energético y tener la llave para un futuro energético más limpio.

La energía almacenada por aire comprimido tiene varios usos potenciales y para el proyecto en cuestión dicha energía se utiliza para la sobrealimentación del motor enviando aire a mayor presión que la atmosférica y de esta forma

mejorar las prestaciones del motor, tanto en potencia como torque, todo esto con la ayuda de la energía recuperada.

Mediante las pruebas que van a ser realizadas podremos definir cualitativamente las mejoras presentadas en el motor de combustión interna y las posibilidades de la implementación del sistema en la industria automotriz.

Por tal razón, el presente proyecto tiene como prioridad analizar la eficiencia en la en la transformación de energía y comprobar la variación del rendimiento del motor al cual se sobrealimentará lo que servirá para establecer conclusiones en el funcionamiento del sistema de recuperación de energía.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

No existen estudios en el Ecuador sobre el comportamiento de los sistemas de recuperación de energía en el desempeño de un automóvil y de un motor a gasolina; este proyecto va a arrojar información sobre que tan eficiente y eficaz es la recuperación de energía cinética y las potenciales aplicaciones en la industria automotriz.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema de recuperación de energía cinética mediante la compresión de aire para sobrealimentación de un motor de automóvil.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar la energía cinética que se disipa al ambiente a través del sistema de frenado del vehículo y establecer la cantidad disponible para utilizar en el proyecto.
- Diseñar el sistema de recuperación de energía cinética.
- Construir e instalar los sistemas de recuperación de energía cinética y sobrealimentación en el automóvil.
- Evaluar los resultados mediante la ejecución de un plan de pruebas

1.5 ALCANCE

El presente proyecto incluye el diseño, construcción, instalación y pruebas de un sistema de recuperación de energía cinética (prototipo) y de un sistema de sobrealimentación momentánea en un vehículo previamente seleccionado.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 ENERGÍA

Energía se define de manera práctica como la capacidad para realizar trabajo, sin embargo tiene una connotación mucho más compleja ya que en la interacción con la materia son responsables de todos los fenómenos que ocurren en el universo. Muchos autores definen a la energía como una propiedad de la misma y en algunas teorías la materia se la considera simplemente como otro tipo de energía, por ésta razón encontrar el concepto de energía es un tema extremadamente ambiguo y complejo.

2.1.1 TIPOS Y CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA.

Existen diversos tipos de energía provocando cada uno fenómenos físicos distintos y la conversión entre una y otra se la realiza dependiendo de cuáles son los efectos deseados.

Los principales tipos de energía son los siguientes:

- Energía cinética
- Energía potencial
- Energía mecánica
- Energía interna
- Energía química
- Calor (energía calórica)

Energía Cinética. Es aquella que se manifiesta por el movimiento de la materia. Cualquier partícula que contenga masa y velocidad tiene energía cinética.

El comportamiento de la energía cinética varía según el campo que se la trate (física clásica o newtoniana, relativista o física cuántica), por lo que para efectos prácticos en este proyecto la trataremos desde el punto de vista de la física clásica o newtoniana.

La energía cinética es el trabajo que genera una fuerza que produce cambios de estado de movimiento en un cuerpo y para un objeto puntual (dimensiones despreciables) o un cuerpo rígido sin rotación viene dada por:

$$K = W = \int \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int m \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{v} dt$$

$$K = \frac{1}{2} m \cdot v^2$$

Ec. 2. 1

Donde m es la masa del cuerpo (kg) y v la velocidad (m/s).

En el caso de los cuerpos en rotación, la energía cinética depende de la velocidad de rotación y el momento de inercia de dicho cuerpo.

$$K = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2$$

Ec. 2. 2

En donde J es la inercia de masa [kg m] y ω es la velocidad angular [rad/s].

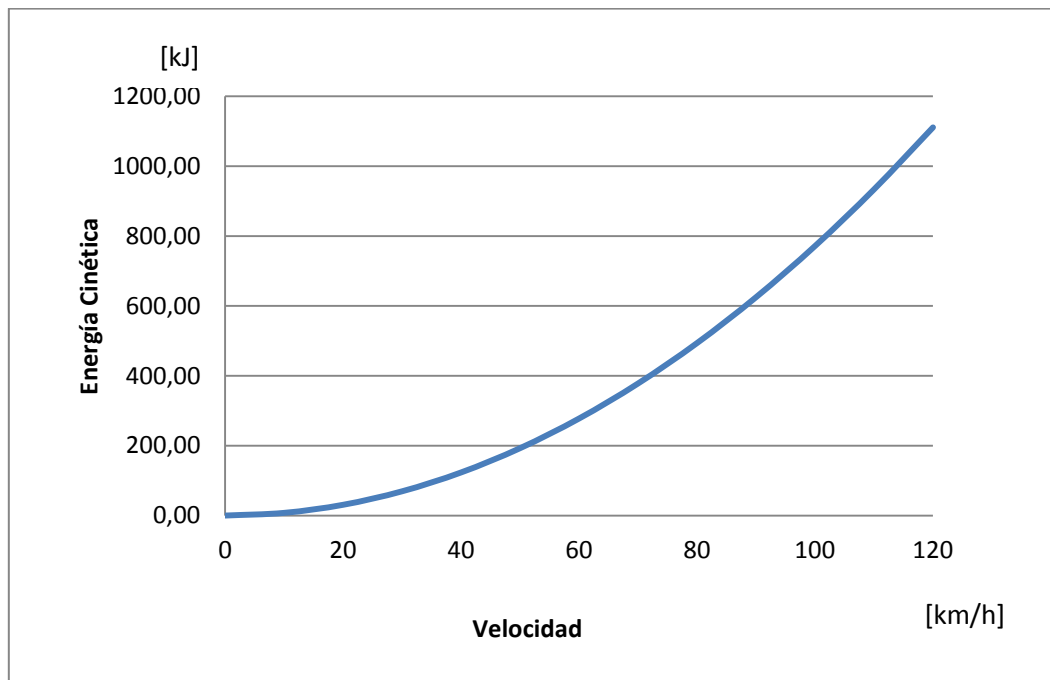
Esta ecuación es de utilidad para calcular la energía cinética de los sistemas mecánicos de recuperación de energía que utilizan un volante de inercia como medio de almacenamiento, en donde a medida que al vehículo pierde energía cinética esta es transferida al volante de inercia que gana energía cinética rotacional (cada vez gira más rápido).

En forma general, la energía cinética total de un cuerpo es la suma de la energía cinética lineal o de traslación más la energía cinética rotacional

$$K_t = K + K_r = \frac{1}{2}(m \cdot v^2 + J \cdot \omega^2)$$

Ec. 2. 3

En el caso de un vehículo mediano de alrededor de 1 tonelada de peso (similar al que se utilizará en este proyecto), la energía cinética aumenta según la línea de tendencia que se muestra en la figura 2.1 a medida que aumenta su velocidad.



Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 2. 1 Energía cinética de un vehículo liviano según su velocidad

Energía potencial es aquella que posee un sistema en virtud de su posición o condición.

El trabajo que realiza una fuerza conservativa específica sobre un sistema o partícula implica un cambio en su energía potencial, es decir que la energía potencial depende del trabajo que realice una fuerza conservativa. Por ejemplo la fuerza gravitatoria y la fuerza relacionada con la ley de Hook, ambas producen cambios dentro de la energía potencial gravitatoria y potencial elástica respectivamente.

Energía mecánica es la suma de la energía cinética y potencial y en general se denomina a aquella que realiza un trabajo útil dentro de un sistema que generalmente se traduce en movimiento lineal o circular

Energía Interna “Es la energía asociada con los componentes microscópicos de un sistema: átomos y moléculas. Comprende la energía cinética y potencial asociada con el movimiento aleatorio de rotación, vibración y traslación de los átomos o moléculas que conforman el sistema así como la energía potencial intermolecular” según Raymond Serway en su libro Fundamentos de Física. Esto nos da un panorama mucho más claro de lo que implica la energía interna.

Energía química es aquella que se encuentra dentro de sustancias o cuerpos que son capaces de reaccionar químicamente con liberación de energía en forma de calor con la capacidad de generar trabajo (expansión térmica). El mejor ejemplo de este tipo de energía se encuentra en los combustibles.

El calor es el tipo de energía más común y básicamente es la energía cinética de las moléculas de un cuerpo generadas por la oscilación de las mismas. La manifestación física del calor es el aumento de temperatura y la expansión volumétrica.

Conservación de la energía.

La ley de la conservación de la energía constituye el primer principio de la termodinámica y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía

Es necesario también definir las fuerzas conservativas y no conservativas. Decimos que una fuerza es conservativa si el trabajo efectuado por ella para mover un objeto es independiente de la trayectoria del objeto. Caso contrario, fuerzas no conservativas, son aquellas cuyo trabajo si depende de la trayectoria del objeto.

Ley de la conservación de la energía mecánica. En un sistema conservativo, la suma de todos los tipos de energía cinética y potencial es constante, y equivale a la energía mecánica total del sistema.

$$\mathbf{E = K + U} \qquad \mathbf{Ec. 2. 4}$$

Donde E es la energía mecánica total, K la energía cinética y U energía potencial

Sin embargo, todo sistema tiene pérdidas de energía mecánica debido a la acción de fuerzas no conservativas, generalmente la fricción. En este caso se deben considerar las pérdidas de energía que se disipan en forma de calor.

$$\mathbf{W_{nc} = E - E_0 = \Delta E} \qquad \mathbf{Ec. 2. 5}$$

En donde W_{nc} es el trabajo realizado por las fuerzas no conservativas, E energía final del sistema, E_0 es la energía inicial y ΔE es la variación de energía mecánica del sistema.

Teorema del trabajo y de la energía. El trabajo efectuado por una fuerza constante sobre un cuerpo para moverlo, sin considerar la fricción, es igual a la variación de la energía cinética del cuerpo.

Se define a la energía cinética según la ecuación 2.1:

$$K = \frac{1}{2}mv^2$$

Por lo tanto;

$$W = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = K - K_0 = \Delta K$$

$$W = \Delta K$$

Ec. 2. 6

2.1.2 ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.

La energía se almacena de las siguientes formas, mediante la energía química y el uso de energía potencial de cualquier tipo.

Energía química. Los ejemplos más comunes son los combustibles y acumuladores electroquímicos.

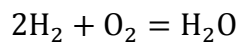
La energía química contenida en los combustibles es liberada generalmente mediante un proceso de combustión en forma de calor y expansión volumétrica que puede realizar trabajo. En este caso los combustibles son almacenados en recipientes cerrados y pueden ser transportados si existe

la necesidad de hacerlo. Es el típico caso de los automóviles con motor de combustión interna cuya fuente de energía, combustible generalmente derivado del petróleo la gasolina o el diesel, se encuentra almacenado en la parte inferior del vehículo en un tanque contenedor de donde es enviado al motor dependiendo de los requerimientos del mismo.

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de reacción directamente en energía eléctrica mientras se suministre combustible y oxidante a sus electrodos.

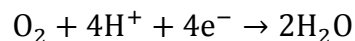
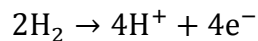
En la actualidad se desarrolla esta tecnología para perfeccionarla con la intención de utilizarlos en automóviles impulsados por motor eléctrico y mejorar su desempeño y autonomía.

La reacción global que tiene lugar en una pila de combustible generalmente es la combinación de hidrógeno y oxígeno para la formación de agua, de ésta reacción surge una corriente eléctrica que pasa a un circuito externo para su utilización.

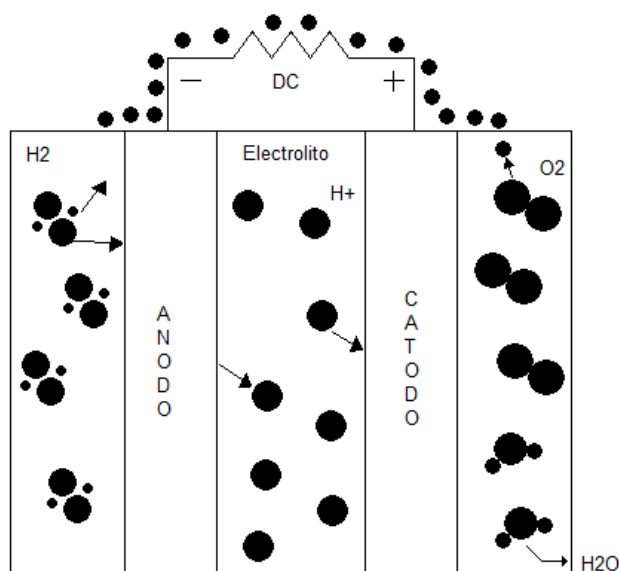


Ec. 2. 7

En ánodo el combustible se oxida, mientras en el cátodo se consumen iones positivos del electrolito y los electrones generados en el ánodo



Es elquema de funcionamiento de una pila de combustible se muestra en la siguiente página



Fuente: Internet

Figura 2. 2 Esquema general de funcionamiento de una pila de combustible (Tecnologías energéticas e Impacto ambiental, CIEMAT)³

Las baterías de plomo son otro tipo de acumulador electroquímico y es el más utilizado en la industria automotriz y en otras áreas también.

En este tipo de acumuladores se produce una reacción de oxidación-reducción. La placa positiva de una batería es de plomo (Pb) con cierta cantidad de antimonio (Sb), el plomo metálico se oxida durante la descarga. La placa negativa es una amalgama de dióxido de plomo (PbO₂), el plomo componente del óxido se reduce durante la descarga.

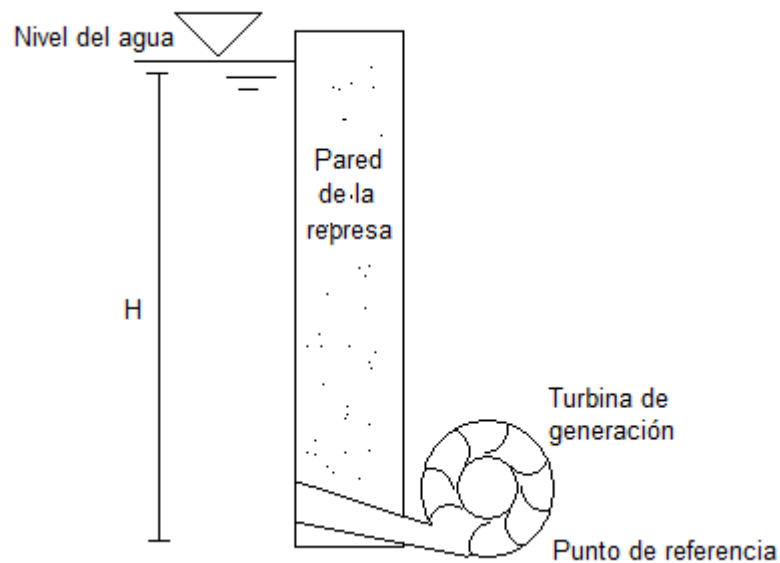
Energía potencial. La energía también puede ser almacenada mediante los distintos tipos existentes en el medio, como es el caso de la energía

³ Página de internet BIODISOL <http://www.biodisol.com/biocombustibles/factibilidad-del-hidrogeno-como-energia-que-es-el-hidrogeno-energias-renovables-fuentes-de-energia-energias-alternativas/>

gravitatoria o la energía potencial elástica entre otros medios menos convencionales para almacenamiento de la misma

Energía potencial gravitatoria. Esta depende de la altura de un cuerpo respecto a un punto de referencia, es decir mientras más alto se encuentre, mayor será su energía potencial.

Este tipo de almacenamiento de energía se utiliza generalmente en la generación de energía hidroeléctrica en donde se construyen represas que permiten la acumulación de agua, y por ende el aumento de la energía potencial en relación con la turbina que se encuentra por debajo del nivel del agua.



Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 2. 3 Esquema de una represa de agua como almacenadora de energía potencial gravitatoria

Debido a que el agua es un fluido, es más fácil calcular la cantidad de energía disponible en función del caudal volumétrico, en cuyo caso el resultado obtenido sería la potencia disponible (energía a través del tiempo).

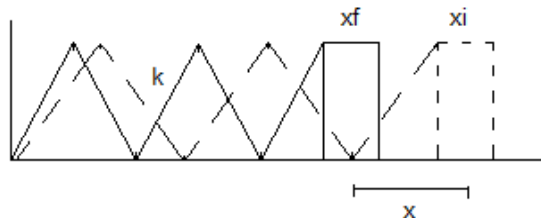
$$P = gQH \quad \text{Ec. 2. 8}$$

En donde P es la potencia, Q es el caudal volumétrico (m^3/s) que tiene el flujo de agua al entrar a la turbina, H es la altura del nivel de agua (m) y g la gravedad (m/s^2).

Energía potencial elástica. En este caso la energía se almacena mediante la deformación de un elemento elástico (generalmente un resorte metálico), y depende de la posición que se encuentre el mismo en relación a su posición original. La energía potencial de un resorte viene dada por:

$$U = \frac{1}{2}kx^2 \quad \text{Ec. 2. 9}$$

Donde k es la constante del resorte [N/m] y x [m] la posición del mismo en relación a la posición en estado natural en reposo sin deformación.



Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 2. 4 Esquema de un resorte con deformación x

Energía neumática. Se la almacena en forma de aire comprimido y es energía potencial debido a que la comprimir el aire (reducir su volumen), aumenta la presión en relación a la presión exterior. Esta diferencia de presiones es la que nos permite tener energía potencial almacenada. Al momento que abrimos la válvula de paso del aire comprimido almacenado, este fluirá de tal forma que se llegue al equilibrio de presión. Es en este momento donde la energía potencial se transforma en energía cinética debido al flujo de aire.

En el caso del almacenamiento de energía mediante aire comprimido se puede dar de dos formas; almacenamiento adiabático (almacenamiento isentrópico) en donde no existe transferencia de calor entre el fluido de trabajo y almacenamiento isotérmico en donde la temperatura se mantiene constante gracias a la transferencia de calor entre el medio y el aire.

Para nuestro caso es relevante el almacenamiento de energía isotérmico debido a las condiciones y la aplicación del uso de la energía almacenada.

El trabajo realizado por el compresor viene dado por:

$$W_{A \rightarrow B} = \int_{V_A}^{V_B} p dv \quad \text{Ec. 2. 10}$$

En donde V_B es el volumen final y V_A el volumen inicial.

Al tener un sistema de compresión y expansión isotérmico, se puede asumir que $p dv$ es constante y que $pV = nRT = p_A V_A = p_B V_B$

$$W_{A \rightarrow B} = nRT \cdot \int_{V_A}^{V_B} \frac{1}{V} dv = nRT (\ln V_B - \ln V_A)$$

$$W_{A \rightarrow B} = p_B V_B \ln \frac{V_A}{V_B} \quad \text{Ec. 2. 11}$$

La energía almacenada en un recipiente o contenedor en forma de aire comprimido viene dado por:

$$U = pV \quad \text{Ec. 2. 12}$$

Es decir en función de p , la presión de almacenamiento y V el volumen del contenedor.

El almacenamiento de aire comprimido se lo hace generalmente con grandes volúmenes aprovechando minas subterráneas de piedra dura a una presión mínima de 1200 [psi]. Ahora en la actualidad se estudia y se están probando sistemas de almacenamiento de aire comprimido en recipientes colocados en las profundidades marinas debido a la ventaja de la contrapresión del agua siendo factible utilizar recipientes más livianos y con mayor seguridad.

Volantes de inercia. El volante de inercia es básicamente una rueda de masa considerablemente grande con una velocidad angular variable y de esta forma el volante gana o pierde energía cinética rotacional. Debido a su gran masa, el elemento posee una alta inercia y demora en detenerse por lo que se puede decir que casi tiene una velocidad constante (se tiene un mínimo de pérdidas), de esta forma la energía es almacenada en forma de energía cinética rotacional. La aplicación más común es en la industria automotriz, en donde el volante de inercia del motor, brinda un flujo de energía estable y continuo.

Una reciente aplicación la encontramos en los sistemas KERS (Kinetic Energy Recovery System), en donde la energía cinética del vehículo es recuperada al momento del frenado mediante un sistema mecánico acoplado al eje o propulsor del vehículo que lo conecta a un volante de inercia que gana velocidad a medida que el vehículo se detiene.

La energía almacenada por un volante de inercia viene dada por la ecuación 2.2:

$$K = \frac{1}{2}J\omega^2$$

2.1.3 EFICIENCIA DE LA CONVERSIÓN

Cuando la energía se transforma existen pérdidas debido principalmente por la fricción entre los elementos de los sistemas de conversión y el medio (resistencia al aire, agua, etc.). La energía perdida se transforma generalmente en calor u ondas sonoras.

La imposibilidad de que no existan pérdidas en toda transformación energética implica que la cantidad de energía que se obtiene en una transformación energética sea siempre menor que la energía suministrada.

Eficiencia de la conversión = (Energía útil / Energía total) x 100

2.2 SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA AUTOMOTRICES.

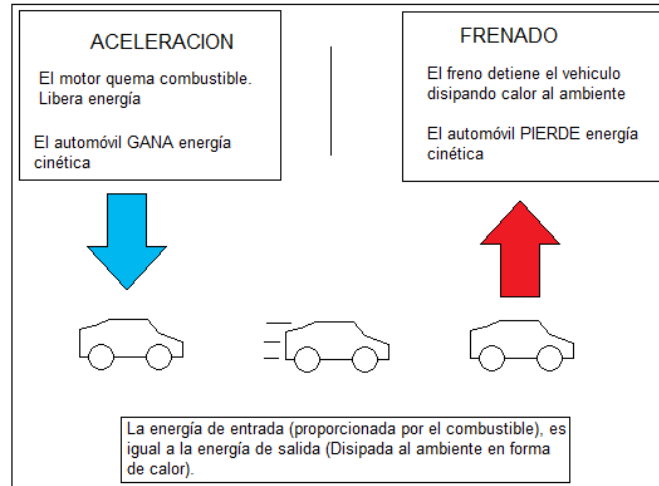
La tecnología de los sistemas de recuperación de energía aplicada a la industria automotriz es prácticamente nueva, sin embargo los conceptos básicos en el campo de la Ingeniería Mecánica son viejos conocidos. Conceptos como eficiencia energética, exergía, cogeneración y fundamentalmente la primera ley de la termodinámica forman el sustento teórico para la aplicación de dichos sistemas.

El automóvil en movimiento es un cuerpo que ha ganado energía cinética por el trabajo realizado por el motor de combustión interna, sin embargo en algún momento se tiene la necesidad de reducir la velocidad o detenerse, en otras palabras, reducir la energía cinética del automóvil. Dicha energía debe ser desechada de alguna manera y esto se logra mediante el sistema de frenos que transforma en calor la energía que no se necesita ese momento y así se la disipa al ambiente sin la posibilidad de poder reutilizarla.

El objetivo de los sistemas de recuperación de energía cinética automotrices es almacenar la energía que normalmente se disipa al ambiente para volver a usarla cuando sea necesaria.

Si consideramos al automóvil como un sistema; al momento de empezar su movimiento, la energía de entrada es la que proporciona el combustible al ser quemado en el motor, dicha energía es transformada en energía cinética (energía de salida) para provocar el movimiento del vehículo. Una vez que el vehículo tiene movimiento este deberá detenerse en algún momento; esto lo hace disipando su energía. En esta nueva situación la energía de entrada es energía cinética (movimiento del vehículo) que mediante el sistema de frenado es transformada en calor (energía de salida), disipada al ambiente provocando que el vehículo se detenga.

En todo momento se cumple la ley de la conservación y la fuente primaria de energía es el combustible.



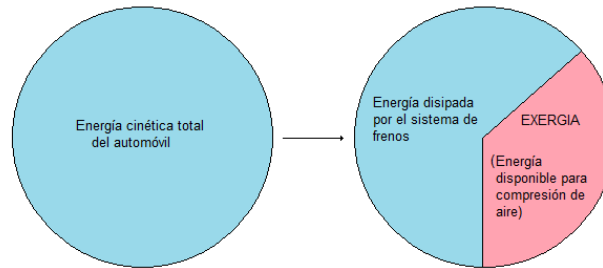
Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 2. 5 Conservación de energía en el automóvil

Exergía. Representa el potencial de un sistema para realizar trabajo útil en un estado específico en comparación del ambiente que lo rodea.

Si se aplica este principio a los automóviles y a los sistemas de recuperación de energía cinética se puede afirmar que el potencial de realizar trabajo (exergía), viene dado por la cantidad de energía cinética del automóvil que puede ser almacenada para su reutilización.

Para el caso del sistema planteado en esta tesis, la energía a recuperarse dependerá de la capacidad del tanque, de la presión máxima de almacenamiento y la cantidad de energía que utilice para comprimir aire.



Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 2. 6 Concepto de exergía aplicado al sistema de recuperación de energía

Cogeneración. La cogeneración es *“La producción de más de una forma útil de energía (como calor de proceso y energía eléctrica), a partir de una misma fuente de energía”*⁴.

En un automóvil el combustible es la fuente primaria de energía que es utilizada para moverlo y trasladarlo de un punto a otro. La cogeneración se presenta cuando el sistema de recuperación almacena energía cinética que no es requerida en ese momento para volver a generar trabajo útil posteriormente, en todo momento la energía total del automóvil tiene origen en la misma fuente.

Eficiencia energética. En todo proceso de transformación energética existen pérdidas por diversas circunstancias. Anteriormente se mencionó la primera ley de la termodinámica que indica que en un sistema la energía de entrada es igual a la de salida porque se debe cumplir con la ley de conservación. Sin embargo no toda la energía de salida realiza trabajo útil; una parte es energía disipada generalmente en forma de calor debido a pérdidas por fricción. La eficiencia de energía viene dada por la relación de la energía de entrada y el trabajo útil.

⁴ Cengel, Yunus. Termodinámica, cuarta edición. P. 579

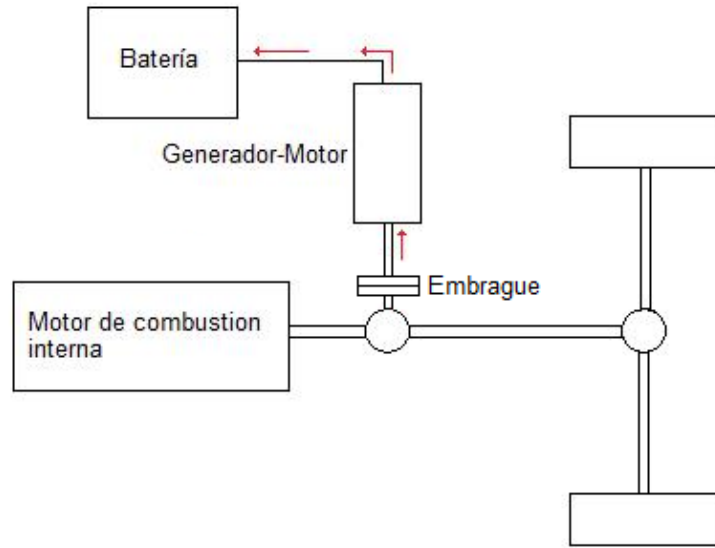
2.2.1 TIPOS DE SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA AUTOMOTRICES

La tecnología de recuperación de energía cinética aplicada a los automóviles es prácticamente nueva y se encuentra todavía en desarrollo en búsqueda de nuevas alternativas.

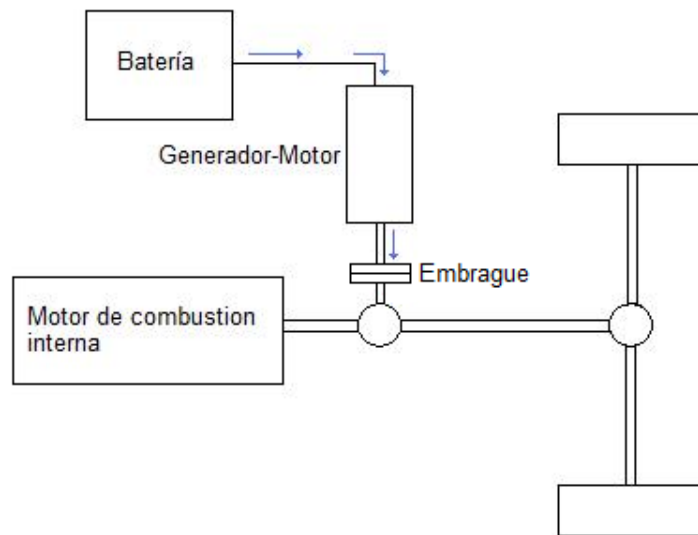
En la actualidad existen dos sistemas de recuperación de energía que se utilizan en la industria automotriz; el sistema eléctrico que almacena energía en una batería y un sistema mecánico que utiliza un volante de inercia como acumulador.

Sistema de recuperación eléctrico. Es utilizado en los automóviles híbridos que utilizan un motor eléctrico de apoyo para el motor de combustión interna, con el objetivo de minimizar el consumo de combustible mediante el uso de regeneración y reutilización de energía cinética.

El momento que se activa el sistema de freno del automóvil un generador-motor se acopla al eje produciendo energía eléctrica que es almacenada en baterías. Cuando se requiere que la energía almacenada sea utilizada nuevamente para, el generador-motor se acopla nuevamente al eje pero esta vez funciona como motor eléctrico y alimentado por la batería provoca impulso al automóvil.



Flujo de energía durante el frenado. (Carga de la batería)



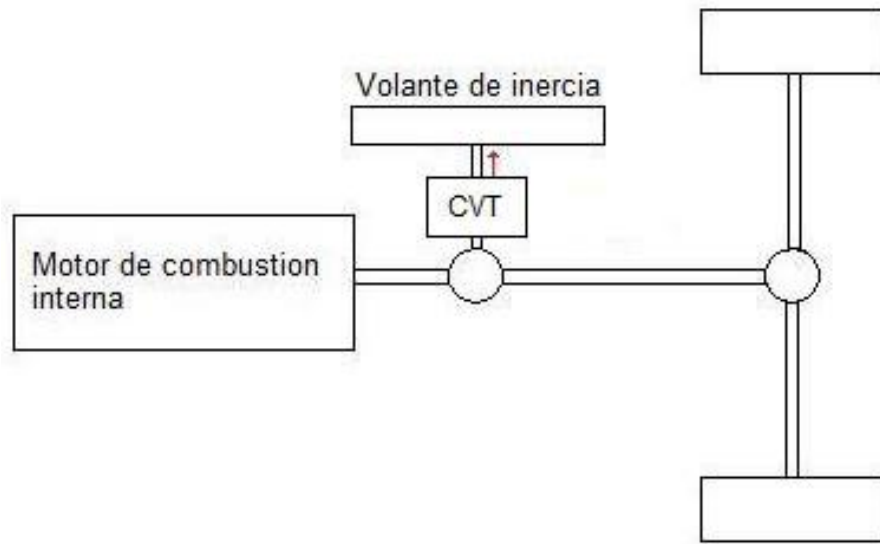
Elaborado por: Solano-Zurita

Flujo de energía durante impulso al automóvil. (Descarga de la batería)

Figura 2. 7 Comportamiento básico del sistema eléctrico de recuperación de energía cinética.

Sistema de recuperación mecánico. Este sistema utiliza un volante de inercia como acumulador el cual es una rueda que almacena energía cinética rotacional. Mientras mayor sea la masa y la velocidad del volante, mayor será la energía almacenada.

Se utiliza más en los automóviles de alto rendimiento de competencia (fórmula uno) en donde la economía de combustible no es tan importante y la finalidad de la recuperación de energía es la de brindar potencia extra al momento de realizar adelantamientos en carrera.



Elaborado por: Solano-Zurita

Flujo de energía durante el frenado. (Carga de la batería)

Aplicaciones de los sistemas de recuperación de energía cinética. La aplicación más común de estos sistemas es en los automóviles híbridos como ya se comentó anteriormente para alimentar el motor eléctrico auxiliar.

En la fórmula uno, se estableció también el uso del KERS (Kinetic energy recovering System) como un elemento para disponer de cierta cantidad de energía para los adelantamientos. Se utilizan sistemas eléctricos y de volante de inercia.

La empresa Vossloh, fabricante de todo tipo de trenes, aplica un sistema de recuperación eléctrico para sus buses articulados híbridos con el fin de reducir el consumo de combustible y las emisiones.

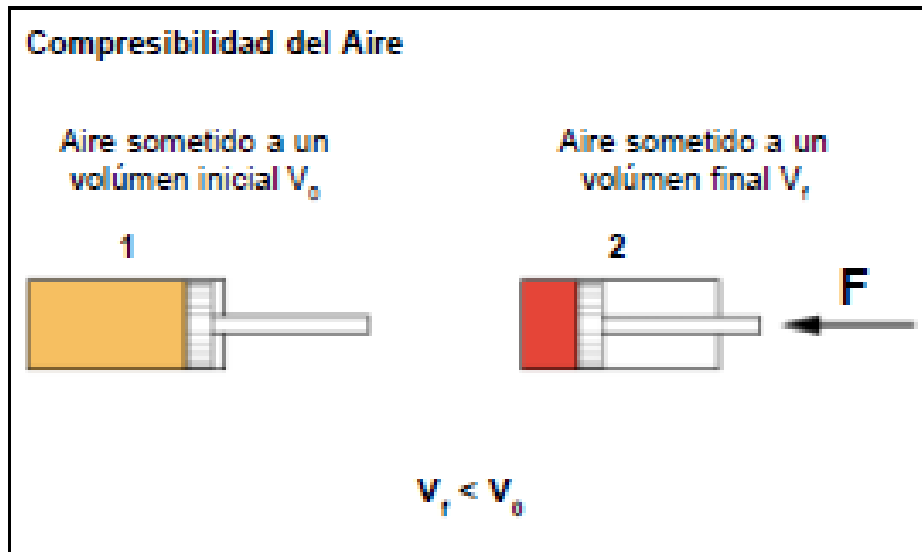
Otra aplicación se puede ver en maquinaria pesada y sobre todo en montacargas que utilizan sistemas de transmisión hidráulicos aplicado por Bosch con su HBR (Hydrostatic Regenerative Breaking), que aprovechan la presión hidrostática para almacenar energía.

2.3AIRE COMPRIMIDO

El globo terrestre está rodeado de una envoltura de un gas llamado AIRE. La composición volumétrica de dicho aire es de: 78% Nitrógeno, 20% Oxígeno, 1.3% Argón, 0.05% Helio, Hidrógeno y Neón, y cantidades variables de vapor y agua. El aire pesa 1,2928 gramos por litro a 273°K y a presión atmosférica.

En este proceso el aire ha penetrado en el compresor a una presión (presión atmosférica media al nivel del mar: 1.033kg/cm²), y por efecto de la compresión, lo entrega para realizar un trabajo en específico.

El aire que sale del compresor es lo que conocemos con el nombre de “aire comprimido” y constituye en realidad una forma de transporte de energía.



Fuente: Internet

Figura 2. 9 Compresibilidad del aire⁵

2.3.1 DEFINICIONES Y PROPIEDADES GENERALES

Propiedades generales

- La presión de un gas en equilibrio es la misma en todos los puntos de la masa.
- La densidad de un gas depende de su presión y temperatura.
- Cuando un gas se calienta aumenta su volumen si la presión se mantiene constante o aumenta.

⁵ <http://www.fullquimica.com/2011/10/propiedades-generales-de-los-gases.html> Página de internet blog de química, Español.

Definiciones

El comportamiento de los gases en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería se puede describir con la ley de los gases perfectos.

El aire comprimido cumple en gran parte la ley mencionada anteriormente o llamada también de los gases ideales. Esta es quizás una de las propiedades más importantes pues permitirá manejar los cambios termodinámicos del aire en situaciones reales y nos servirá para realizar nuestro estudio.

La ley de los gases ideales está dada por:

$$p = \rho RT \quad \text{Ec. 2. 13}$$

Donde p es la presión absoluta (Pa), ρ es la densidad (kg/m^3), T es la temperatura absoluta (K) y R es la constante de los gases. La constante de los gases se relaciona con la constante universal de los gases R_u mediante la relación:

$$R = \frac{R_u}{M}$$

Donde M es la masa molar.

El valor de R_u es:

$$R_u = 8.314 \frac{\text{kJ}}{\text{kg mol}} \text{K}$$

Para el aire, $M=28.97 \text{ kg/kg-mol}$, de modo que para el aire $R=0.287 \text{ kJ/kg.K}$, valor que se utiliza ampliamente en los cálculos que interviene el aire.

Otra forma que adopta la ley de los gases ideales es

$$pV = mRT$$

y

$$pV = nR_u T \quad \text{Ec. 2. 14}$$

Donde n es el número de moles ⁶

De la ley de los gases ideales podemos deducir que si el volumen del gas se mantiene invariable, la presión es directamente proporcional a la temperatura absoluta, o lo que es igual, que la relación presión/temperatura constante.

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} = \text{cte}$$

Se hace referencia a lo anterior ya que en este proyecto el proceso se realizara a volumen constante.

Teorema de Bernouilli

Velocidad de salida de un gas de un recipiente que se halla sometido a una presión ⁷

$$V = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_0 \cdot P_1}} \quad \text{Ec. 2. 15}$$

Donde:

V: velocidad (m/s)

P1: presión del recipiente (Pa)

⁶ POTTER Merle C, MECANICA DE FLUIDOS. SEGUNDA EDICION. Pág. 23

⁷ ROLDAN José ,NEUMATICA, HIDRAULICA Y ELECTRICIDAD APLICADA, DECIMA EDICIÓN, Pág. 20

P2: presión del exterior (Pa)

P0: masa específica del gas en condiciones normales (kg)

2.3.2 COMPRESORES DE AIRE

Existen una gran variedad de compresores de aire, los cuales se muestran a manera de una tabla comparativa con campos como el tipo, el funcionamiento, características y aplicaciones de los mismos, en el ANEXO A.

2.3.3 SISTEMAS DE AIRE COMPRIMIDO

Un sistema de aire comprimido puede definirse como un grupo de equipos y accesorios con una disposición específica, con el fin de proporcionar un caudal de aire determinado, a unas condiciones de presión y calidad de acuerdo con los requerimientos de la aplicación.

El aire comprimido debe ser filtrado, lubricado, y a veces deshumidificado antes de su empleo en cilindros, válvulas, motores y dispositivos de precisión similar.

Partes principales y accesorios

Compresor En un sistema neumático la energía del sistema se obtiene vía el compresor que aspira aire atmosférico y lo comprime hasta alcanzar una presión superior.

Acumulador Almacena el aire comprimido que proporciona el compresor, sirve para afrontar los picos de consumo, además de cumplir con la función de enfriamiento y reducción de velocidad actuando como separador de condensado y aceites provenientes del compresor. Su fin principal consiste en adaptar el caudal del compresor al consumo de la red.

Debe cumplir varios requisitos; entre ellos: una puerta para inspección interior, un grifo de purga, un manómetro, válvula de seguridad, válvula de cierre, e indicador de temperatura.

Puede colocarse horizontal o verticalmente, pero a ser posible alejado de toda fuente calorífica, para facilitar la condensación del vapor de agua procedente del compresor.

El tamaño de un acumulador de aire comprimido depende de:

Caudal de suministro del compresor

Presión máxima alcanzada por el compresor

Consumo de aire

- La red de tuberías (volumen suplementario)
- Tipo de regulación
- La diferencia de presión admisible en el interior de la red.

Tuberías o líneas de distribución. El aire es transportado desde el compresor hasta los sistemas de consumo por medio de una línea o tubería principal.

Filtro de aire. Los filtros de aire en la admisión del compresor se usan para limitar la entrada de contaminantes sólidos al sistema y extraer una parte del vapor de agua presente en el aire causantes de erosión y corrosión de los componentes principales del compresor. Aunque todo el polvo y la humedad no son eliminados en esta etapa de filtrado, es un buen comienzo para la conservación de los equipos instalados luego de la unidad de compresión.

Unidad de mantenimiento La unidad de mantenimiento tiene la función de acondicionar el aire a presión. Dicha unidad es antepuesta al mando neumático.

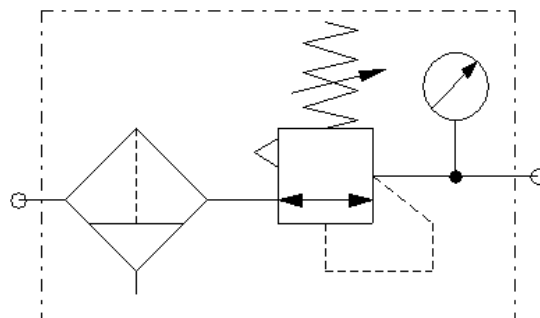
Está formada por tres o cuatro elementos:

Filtro de aire. A pesar de que el aire suministrado por el compresor haya sido filtrado inicialmente por el filtro de aire a la entrada, presenta aún trazas de humedad, polvo y aceite. Es necesario aplicar otra etapa de filtrado, preferiblemente a la entrada del consumo de cada uno de los actuadores y herramientas.

Regulador de presión. La presión del aire no permanece de manera constante durante largos periodos de tiempo y por lo tanto es necesario regularla para asegurar el rendimiento y exactitud del sistema. Se utiliza una válvula o unidad reguladora de presión, que permite mantener la presión constante.

Manómetro o indicador de presión. Permite observar la presión para control en un punto específico dentro del sistema.

Lubricador. Proporciona al aire una película lubricante de aceite, que es transportada a las aplicaciones posteriores a dicha unidad



Fuente: Software FESTO FluidSIM

Figura 2. 10 Simbología de la unidad de mantenimiento

Separador de aceite El aire comprimido arrastra parte del aceite del compresor cuando este debe ser lubricado. Este aceite puede ser retirado y luego recirculado hacia el sistema de lubricación del compresor. Esta tarea es llevada a cabo por elementos conocidos como separadores de aceite que son instalados a la descarga del compresor.

Sistema de condensación y secado La humedad presente en el aire comprimido puede ser retirada por diferentes elementos de deshidratación. Estos sistemas se clasifican según su método en mecánicos y químicos. En los primeros se usan dispositivos que mecánicamente disminuyen la temperatura o presión del aire, como equipos de refrigeración, intercambiadores de calor, o mecanismos de reducción de presión.

Por otro lado, los métodos químicos, utilizan productos higroscópicos para secar el aire comprimido.

Parámetros de control e instrumentación

Presión. La elección de la “presión máxima necesaria de utilización” es uno de los parámetros principales que permitirá la acertada elección del compresor.

La “presión máxima de utilización” la determina el equipo más exigente al que habrá de entregar aire.

Caudal volumétrico. Es la cantidad de aire en volumen en un tiempo determinado

No debe confundirse el caudal suministrado por el compresor debido a su desplazamiento (compresores de pistón), con el caudal requerido y suministrado por el sistema neumático para su funcionamiento.

Instrumentación: Existe un sinnúmero de elementos a utilizarse en sistemas de aire comprimido, los que nos concierne nombrar para la aplicación de este proyecto son:

- Presostato
- Manómetro
- Termómetro
- Válvulas de anti retorno
- Purgadores manuales
- Válvulas de seguridad, limitador de presión

Usos comunes de los sistemas de aire comprimido

El empleo de aire comprimido para diferentes actividades industriales está fundamentado en las ventajas que lo preceden.

- Abundante: Está disponible para su compresión prácticamente en todo el mundo en cantidades ilimitadas.
- Transporte: El aire comprimido puede ser fácilmente transportado por tuberías incluso a grandes distancias. No es necesario disponer tuberías de retorno.
- Almacenable: No es preciso que un compresor permanezca continuamente en servicio. El aire comprimido puede almacenarse en depósitos y tomarse de éstos. Además, se puede transportar en recipientes.
- Temperatura: El aire comprimido es insensible a las variaciones de temperatura, garantiza un trabajo seguro incluso a temperaturas extremas.

- Antideflagrante: No existe ningún riesgo de explosión ni incendio; por lo tanto, no es necesario disponer instalaciones antideflagrantes de alto costo.

Aplicaciones

- Elevadores neumáticos.
- Herramientas neumáticas: destornilladores, tornos de dentista, etc.
- Armas de aire comprimido
- Equipos de minería: taladros, martillos, picadores, lámparas, ventiladores, etc.
- Arranque de motores de avión.
- Automóviles de aire comprimido y motores de aire comprimido, entre otras

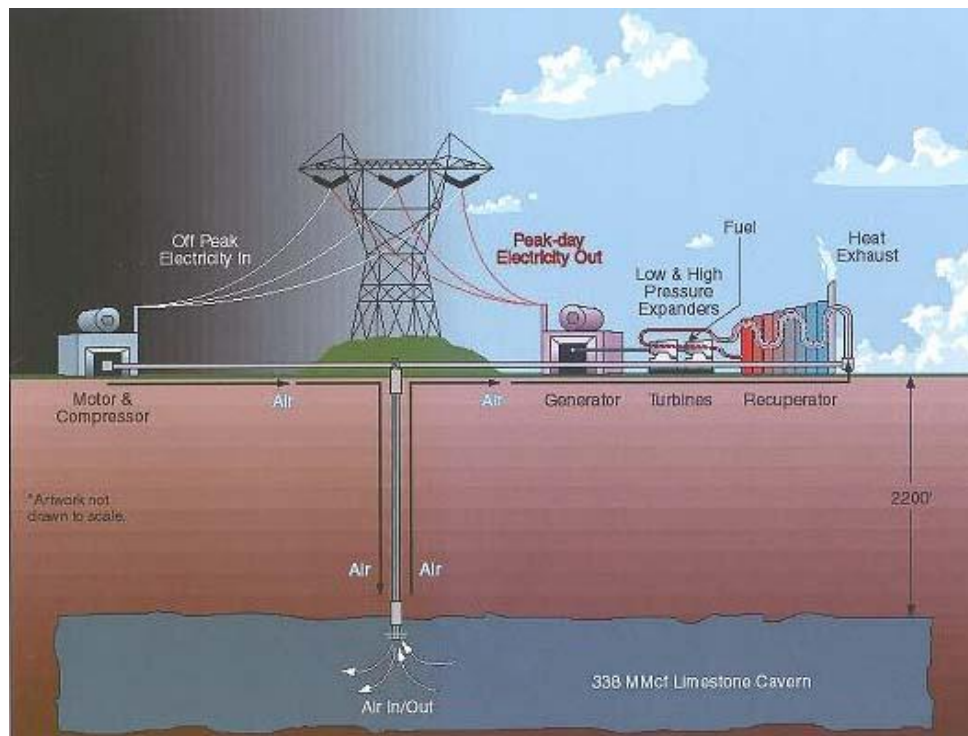
2.3.4 EL AIRE COMPRIMIDO COMO MEDIO DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Hasta ahora el uso del aire comprimido se basa en aprovechar el excedente de energía, comprimiendo aire, y éste se utiliza cuando es requerido nuevamente.

El almacenamiento energético por aire comprimido (CAES, por sus siglas en inglés). Se enfoca al desarrollo de sistemas de almacenamiento de energía basados en la compresión del aire y almacenarlo en recipientes hechos por el hombre o bajo tierra en embalses naturales. Por ejemplo, minas abandonadas, cavidades rellenas con soluciones minerales o acuíferos. Se guarda el aire a una presión elevada (80 atmósferas).

Durante las horas de baja demanda el aire se comprime adiabáticamente en compresores centrífugos y axiales y se almacena en la cavidad y durante las horas pico el aire se expande y mueve un turbogenerador.

Bajo tierra el aire se calienta un poco (por efecto de la energía solar) y es lanzado para impulsar las turbinas que generan electricidad o también puede ser liberado directamente a los sistemas mecánicos sin que se convierta en electricidad.



Fuente: Internet

Figura 2. 11 Sistema de almacenamiento de aire comprimido bajo tierra⁸

⁸ <http://blog.espol.edu.ec/alexmer/> Página de internet blog estudiantil ESPOL, Español

Pero otro uso del aire comprimido es la fabricación de motores para vehículos. En el año 2001 ya se anunciaba la inminente comercialización del primer coche movido por aire comprimido.

Todo indica que el motor MDI de origen español, de aire comprimido puede convertirse en uno de los mayores descubrimientos de este próximo siglo XXI. Su inventor Guy Négre ha conseguido desarrollar un motor capaz de propulsar un coche a más de 110 km/h, con una autonomía de hasta 300 kilómetros y con un coste reducido, todo con contaminación cero.

2.4 SOBREALIMENTACIÓN DE MOTORES AUTOMOTRICES

La sobrealimentación de motores de combustión interna automotrices ha resultado ser un método muy efectivo para aumentar el rendimiento y eficiencia térmica de los mismos introduciendo aire a presión para mejorar la eficiencia volumétrica.

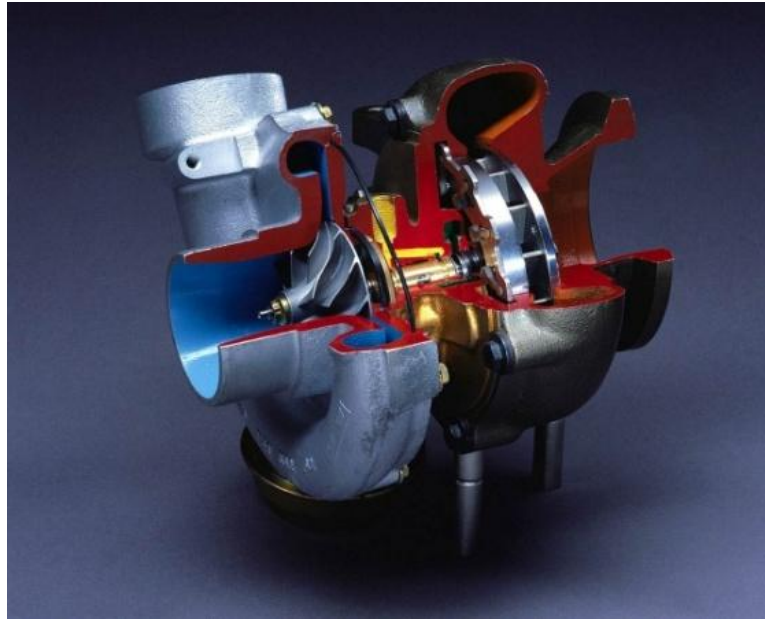
Esto se logra mediante el aumento de la presión de aire en la admisión logrando llenar el cilindro de mejor forma produciendo mayor fuerza en la explosión traduciéndose en mayor torque y potencia del mismo motor.

Existen dos métodos convencionales para sobrealimentar un motor de combustión interna:

- Turbocompresor
- Supercargador

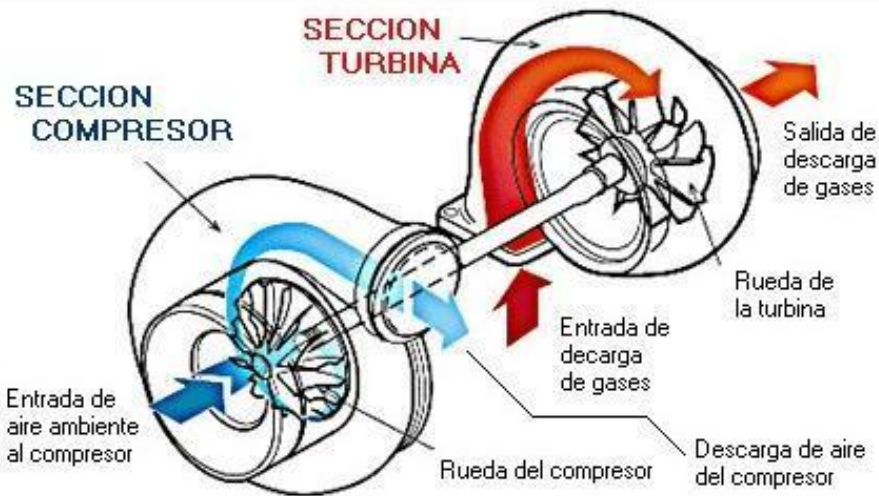
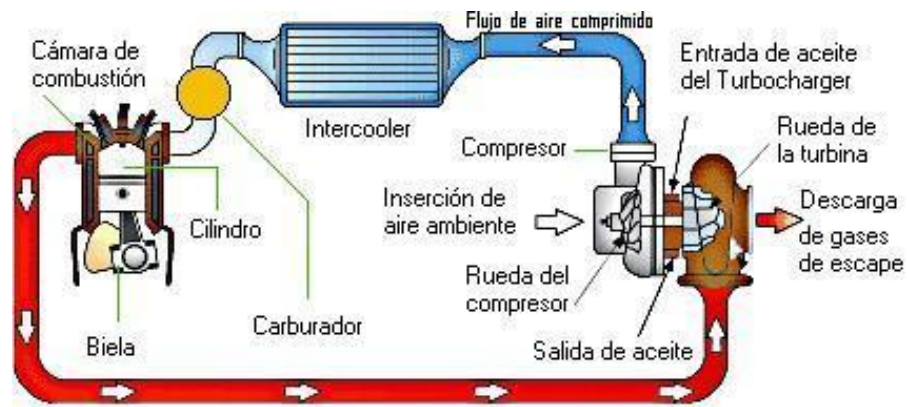
En los dos casos su principal objetivo es la de comprimir el aire de entrada para aumentar su presión. La principal diferencia radica en el tipo de compresor y la forma en que éste toma energía para su funcionamiento.

En el caso de los turbocompresores, el compresor es de álabes de una sola etapa y la energía se la obtiene aprovechando la velocidad de los gases de escape que mueven una turbina conectada directamente por una flecha común al compresor.



Fuente: Internet

Figura 2. 12 Turbocompresor⁹



Fuente: Internet

Figura 2. 13 Funcionamiento del turbocompresor⁹

Este tipo de compresor es el más utilizado debido a que recupera energía liberada al exterior, por lo que el aumento en el rendimiento global es mucho mayor.

Sin embargo, su efectividad depende de la velocidad de funcionamiento del vehículo siendo muy deficiente a bajas revoluciones debido a que la turbina en

⁹ <http://www.granadaracingclub.com/showthread.php?t=1567> Sobrealimentación de motores, Espanol,04/11/2009

el sistema de escape es un obstáculo para la correcta evacuación de los gases.

El supercargador utiliza un compresor axial o de álabes pero su fuente de energía es el mismo motor al que realizará la sobrealimentación, ya que se encuentra conectado a este mediante una polea y la banda de accesorios.



Fuente: Internet

Figura 2. 14 Supercargador con compresor axial¹⁰

¹⁰ <http://www.aa1car.com/library/supercharge.htm>, teoría de supercargadores, Inglés

CAPITULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA PARA SOBREALIMENTACIÓN

3.1 DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se analizan las bases y factores para el diseño que son de suma importancia para el éxito del proyecto y cumplir con los objetivos propuestos

El diseño y construcción de un sistema de recuperación de energía cinética mediante la compresión de aire para sobrealimentación de un automóvil, debe ser realizado en función de los siguientes factores: los recursos económicos asignados al proyecto, los materiales y elementos disponibles en el mercado y el espacio disponible para la instalación del sistema.

En este capítulo se citan: los requerimientos de diseño, las restricciones de diseño y una matriz de selección de componentes

3.1.1 REQUERIMIENTOS Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

Teóricamente la energía disponible para utilizarse en el sistema de recuperación es la energía cinética que tiene el vehículo a determinada velocidad, por lo tanto se desprecian las pérdidas por resistencia del viento y por fricción de los neumáticos del vehículo con el piso.

| Velocidad (km/h) | Energía disponible (kJ) | Velocidad en el eje (rpm) |
|------------------|-------------------------|---------------------------|
| 0 | 0 | 0 |
| 25 | 3798,61 | 236,84 |
| 50 | 7597,22 | 473,68 |
| 75 | 11395,83 | 710,51 |
| 100 | 15194,44 | 947,35 |

Tabla 3. 1 Energía disponible a diferentes velocidades

La energía cinética será recuperada mediante un sistema de frenado auxiliar ubicado en el eje trasero, que debe tomar energía cinética del vehículo al momento que se active el sistema principal de frenos. El sistema toma parte de la energía disipada, ésta energía se debe almacenar en forma de aire comprimido (con un volumen reducido y a alta presión). Una vez que el aire comprimido esté almacenado al momento de acelerar, el aire se utilizará para inyectarlo en el múltiple de admisión.

Requerimientos de diseño

- **Control.** Debe ser controlado para cumplir con los objetivos de recuperar energía y sobrealimentar al motor cuando se lo requiera.
- **Seguridad.** El sistema debe ser seguro para los ocupantes del vehículo, para el personal que realice el mantenimiento, para los demás elementos del vehículo y de las partes mismas del sistema de recuperación en caso de fallo en algún componente, prestando atención sobre todo al tanque de almacenamiento de aire comprimido.
- **Eficaz.** Debe cumplir con el objetivo de recuperación de energía y sobrealimentación.
- **Eficiente.** Se debe procurar tener el mínimo de pérdidas de energía observando siempre las restricciones de diseño.

- **Accesibilidad para mantenimiento.** La construcción y montaje del sistema debe ser de tal forma que sea posible dar un correcto mantenimiento del mismo.

Restricciones de diseño

- **Espacio físico.** El tamaño de los elementos, piezas y partes del sistema es de suma importancia, están condicionados a no tener un tamaño excesivo ya que el espacio físico para alojar dichos elementos en el automóvil es limitado.
- **Energía disponible para recuperación.** Cuantificación de la energía cinética del automóvil y la cantidad de energía que se podrá recuperar con el sistema propuesto.
- **Disponibilidad comercial.** Los elementos a seleccionar, disponibles para su compra en el mercado ecuatoriano.
- **Costo.** Referido a tanto a la compra, como a la fabricación de las partes del sistema.

3.1.2 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Matriz de selección

En la elaboración de este proyecto es importante definir la alternativa más acertada, para escoger los elementos que no se diseñan y no se construyen. La selección se realiza en términos de economía, de espacio disponible y de energía disponible por lo tanto es necesario crear una matriz la cual permita seleccionar la alternativa correcta que se ajuste a los requerimientos.

Selección de elementos

Se identifica los tipos de elementos que van a formar parte del sistema y las alternativas que se califican por medio de una matriz de selección, para así garantizar eficiencia y eficacia del sistema.

Los tipos de elementos y las alternativas a seleccionar son:

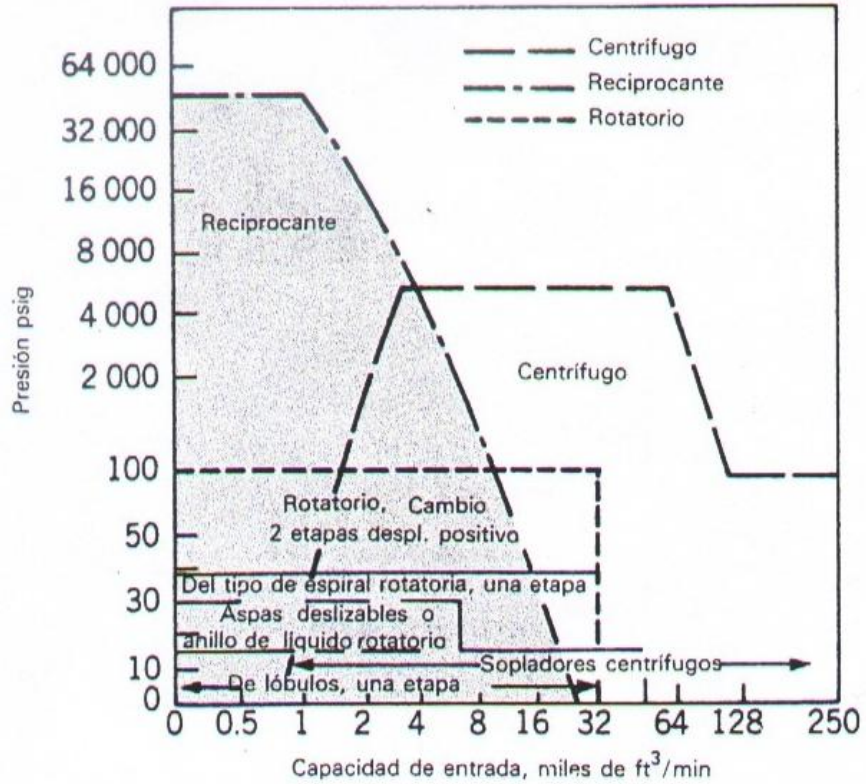
Tipo de acoplamiento o embrague

Alternativas

- Embrague de disco
- Embrague electromagnético
- Embrague de tambor

Tipo de compresor

Estas alternativas han sido pre-seleccionadas tomando como referencia el gráfico siguiente, teniendo en cuenta que se tendrá volumen reducido y a alta presión



Fuente: Greene R.¹¹

Figura 3. 1 Cuadro de selección de compresor

Capacidad de entrada vs Presión

Alternativas

- Compresor de aletas
- Alternativo (o de pistón)
- De membrana

¹¹ Libro: GREENE, R. compresores, selección uso y mantenimiento

Tipo de sistema de transmisión de potencia

Alternativas

- Bandas
- Engranajes
- Cadenas

Tipo de control

Alternativas

- Neumático
- Eléctrico

3.1.3 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Matriz de selección.

Criterios de evaluación para selección de alternativas a utilizarse en el sistema

Seleccionar la alternativa más adecuada es de vital importancia, se deben tomar en cuenta los parámetros involucrados y la prioridad que estos tienen dentro del diseño. Se definen los puntajes máximos y el factor de peso de cada uno de los factores.

La escala de prioridad varía en un rango de valores desde 1 al 4, siendo el valor de **1 el de mayor prioridad** y el valor de **5 el de menor prioridad**.

| Ord | Parametro de diseño | Prioridad | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Puntaje | % | W.F. | Puntaje Máx. |
|-----|---------------------------|-----------|---|---|---|---|---|-----------|------------|-------------|--------------|
| 1 | Tamaño | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 4 | 7 | 31,8 | 0,32 | 318 |
| 2 | Costo o inversión inicial | 2 | | 0 | 1 | 1 | 4 | 6 | 27,3 | 0,27 | 273 |
| 3 | Parámetro 1 | 3 | | | 0 | 1 | 4 | 5 | 22,7 | 0,23 | 227 |
| 4 | Parámetro 2 | 4 | | | | 0 | 4 | 4 | 18,2 | 0,18 | 182 |
| | TOTAL | 10 | | | | | | 22 | 100 | 1,00 | 1000 |

Tabla 3. 2 Matriz de puntajes y parámetros

Los parámetros serán calificados con los siguientes puntajes:

1 Sobresaliente

0.8 Satisfactorio

0.5 Regular

0.3 Insatisfactorio

Matrices

Para el tipo de acoplamiento el parámetro 1 es **velocidad de accionamiento** y el parámetro 2 es **torque a transmitir**

| Parametro de diseño | Embrague Electromagnético | | Embrague de disco | | Embrague de Tambor | | Puntaje Máx. |
|----------------------------|---------------------------|--------------|-------------------|-------|--------------------|-------|--------------|
| Tamaño | 0,5 | 159 | 0,5 | 159 | 0,5 | 159 | 318 |
| Costo o inversión inicial | 1 | 273 | 0,8 | 218,4 | 0,8 | 218,4 | 273 |
| Velocidad de accionamiento | 1 | 227 | 1 | 227 | 0,8 | 181,6 | 227 |
| Torque a transmitir | 0,8 | 145,6 | 0,8 | 145,6 | 0,8 | 145,6 | 182 |
| Puntaje total | | 804,6 | | 750 | | 704,6 | 1000 |

Tabla 3. 3 Matriz de selección del tipo de acoplamiento o embrague

Se ha seleccionado el tipo de acoplamiento o embrague “electromagnético” ya es la mejor alternativa considerando el torque a transmitir y la velocidad de accionamiento (eléctrico)

Para el tipo de compresor el parámetro 1 es **Presión Máxima** y el parámetro 2 es **Caudal Máximo**

| Parametro de diseño | Compresor de aletas | | Compresor de pistón | | Compresor de Membrana | | Puntaje Máx. |
|---------------------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|-----------------------|------------|--------------|
| Tamaño | 0,5 | 159 | 0,8 | 254,4 | 1 | 318 | 318 |
| Costo o inversión inicial | 0,5 | 136,5 | 0,8 | 218,4 | 0,5 | 136,5 | 273 |
| Presión Máxima | 0,8 | 181,6 | 0,8 | 181,6 | 0,5 | 113,5 | 227 |
| Caudal Máximo | 0,5 | 91 | 0,5 | 91 | 0,5 | 91 | 182 |
| Puntaje total | | 568,1 | | 745,4 | | 659 | 1000 |

Tabla 3. 4 Matriz de selección del tipo de compresor

Se ha seleccionado el tipo de compresor “de pistón” ya que es la opción que puede alcanzar presiones alta presión en el almacenamiento y a un costo reducido.

Para el tipo de transmisión de potencia el parámetro 1 es **Distancia entre ejes** y el parámetro 2 es **Potencia a transmitir**

| Parametro de diseño | Bandas | | Engranajes | | Cadenas | | Puntaje Máx. |
|---------------------------|--------|--------------|------------|------------|---------|--------------|--------------|
| Tamaño | 0,5 | 159 | 0,8 | 254,4 | 0,5 | 159 | 318 |
| Costo o inversión inicial | 0,8 | 218,4 | 0,5 | 136,5 | 0,5 | 136,5 | 273 |
| Distancia entre ejes | 1 | 227 | 0,3 | 68,1 | 1 | 227 | 227 |
| Potencia a transmitir | 0,5 | 91 | 1 | 182 | 0,5 | 91 | 182 |
| Puntaje total | | 695,4 | | 641 | | 613,5 | 1000 |

Tabla 3. 5 Matriz de selección del tipo de transmisión de potencia

Se ha seleccionado el tipo de transmisión de potencia de “bandas” por su facilidad de mantenimiento, bajo costo y se ajusta a las necesidades del sistema a diseñar

Para el tipo control el parámetro 1 es **Velocidad de respuesta** el parámetro 2 es **Fuente de energía**

| Parametro de diseño | Neumático | | Eléctrico | | Puntaje Máx. |
|----------------------------|------------------|--------------|------------------|--------------|---------------------|
| Tamaño | 0,8 | 254,4 | 1 | 318 | 318 |
| Costo o inversión inicial | 0,5 | 136,5 | 0,8 | 218,4 | 273 |
| Velocidad de respuesta | 0,8 | 181,6 | 1 | 227 | 227 |
| Fuente de energía | 0,8 | 145,6 | 1 | 182 | 182 |
| Puntaje total | | 718,1 | | 945,4 | 1000 |

Tabla 3. 6 Matriz de selección del tipo de control

Se ha seleccionado el tipo de control “eléctrico” por velocidad de respuesta, efectividad y debido a que utiliza la batería como fuente de energía manteniendo así su independencia.

3.1.4 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA E IDENTIFICACIÓN DE LOS SUBSISTEMAS.

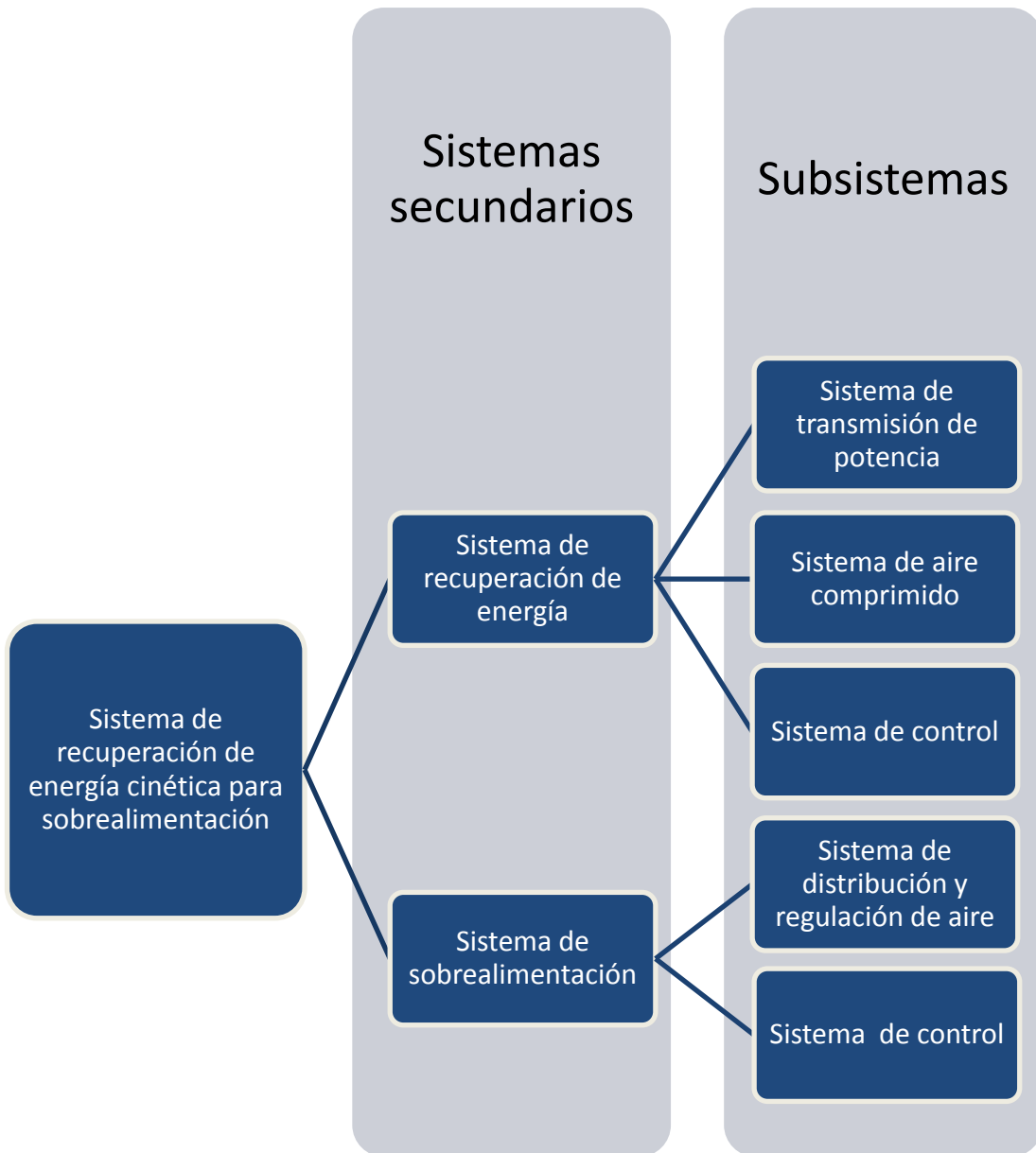
El diseño conceptual consiste en la síntesis de las actividades a realizar por el sistema, que durante el proceso de la recuperación de energía cinética del automóvil cumplirá con una serie de pasos ordenados y sistemáticos.

La solución del sistema de recuperación de energía cinética, al problema planteado, consiste de las siguientes tareas:

- Mediante el accionamiento del pedal de freno, transmitir el movimiento de la rueda del automóvil a un sistema de transmisión.

- Transformar la energía cinética del automóvil en energía potencial (aire comprimido).
- Mediante un compresor almacenar el aire en un tanque hasta una presión determinada.
- Direccionar el aire almacenado al motor del automóvil.
- El usuario controla el encendido y apagado del equipo.

El sistema de recuperación de energía para sobrealimentación se divide en dos secundarios: el sistema de recuperación de energía, el sistema de sobrealimentación y estos a su vez se dividen en subsistemas como indica el gráfico siguiente:



Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 3. 2 Sistema principal, sistemas secundarios y subsistemas

Sistema de transmisión de potencia. Transfiere la energía del eje del vehículo al compresor cuando es requerido.

Sistema de aire comprimido. Se encarga de comprimir, transportar y almacenar el aire que utiliza el sistema de recuperación.

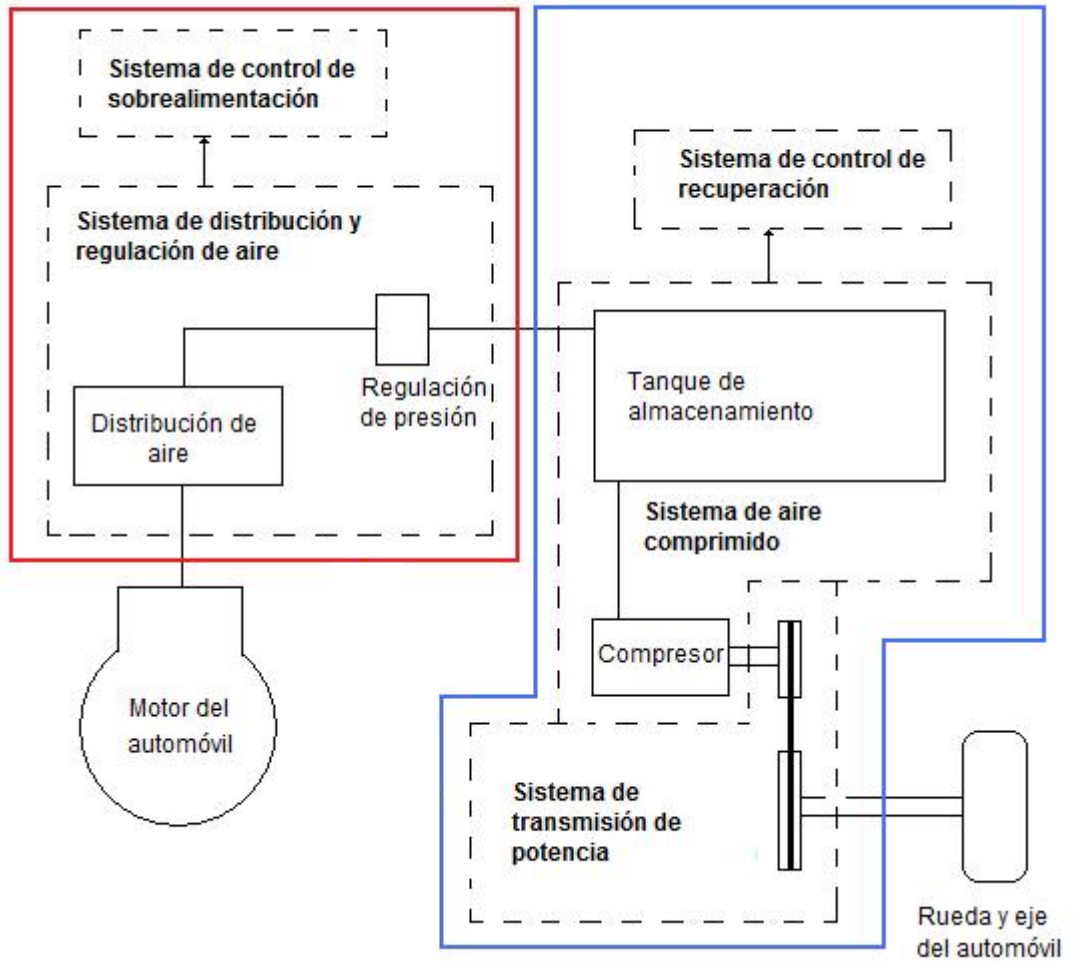
Sistema de distribución y regulación de aire. Se encarga del manejo de aire comprimido; tanto de su regulación (presión y caudal de sobrealimentación) y de la distribución al motor del automóvil.

En el capítulo de diseño se tratará por separado el diseño del sistema de control de los dos sistemas

Sistema de control (sistema de recuperación). Controla el momento de activación del sistema de recuperación.

Sistema de control (sistema de sobrealimentación). Controla el momento de activación del sistema de sobrealimentación.

Sistema de sobrealimentación Sistema de recuperación de energía



Elaborado por: Solano-Zurita

Figura 3. 3 Esquema del sistema a construir

3.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

El sistema de recuperación de energía se divide en los subsistemas: el sistema de aire comprimido y el sistema de transmisión

3.2.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.

Requerimientos:

El sistema debe transmitir la potencia desde el eje posterior del automóvil hacia el compresor.

Se debe utilizar dos relaciones de transmisión para aumentar la velocidad desde el eje posterior hasta la polea del compresor; debido a que el eje del mismo debe girar a 2800 rpm, para asegurar una rápida compresión y almacenamiento del aire

Se debe utilizar un sistema de transmisión de bandas.

Un embrague electromagnético debe ser utilizado para transmitir el movimiento de la rueda hacia el sistema de transmisión de potencia.

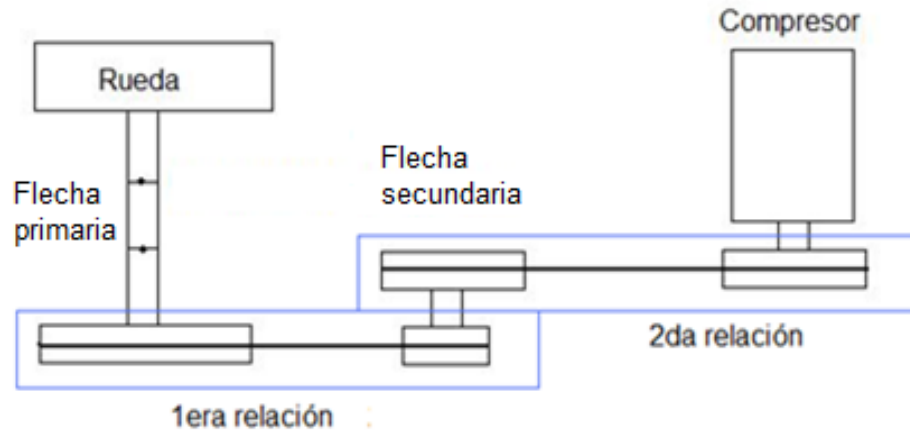
Un tensor debe ser instalado para permitir que la banda mantenga su tensión cuando la distancia entre poleas cambie debido al movimiento que se produce por la amortiguación y suspensión del vehículo.

Parámetros de diseño

- La potencia nominal 2 HP (1.57 kW)
- Tipo de máquina conducida. Compresor recíprocante de una etapa.
- Horas de servicio. 2 hora/día de forma intermitente

- Velocidad de entrada. 1516 rpm (velocidad del eje trasero con el vehículo a 160 km/h)¹²
- Velocidad de salida. 2800 rpm \pm 50

En la figura siguiente se ilustra las dos relaciones de poleas y bandas.



Elaborado por: Solano- Zurita

Figura 3. 4 Esquema del sistema de transmisión de potencia

3.2.1.1 Diseño de flechas

Se realiza el análisis de fuerzas, cálculo de momentos para tanto la flecha primaria como para la flecha secundaria. La memoria de cálculo se encuentra en el ANEXO E realizado con el software MATHCAD.

¹² Se realizara el diseño para que a 160 km/h se alcance la velocidad máxima de giro del compresor.

A continuación se presenta el resumen del cálculo.

Cargas en la flecha primaria

Cargas en la flecha primaria (eje donde está localizado el neumático del auto)

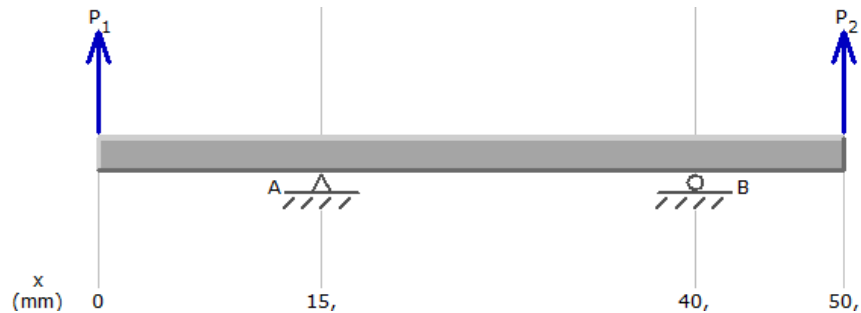


Figura 3. 5 Análisis de cargas

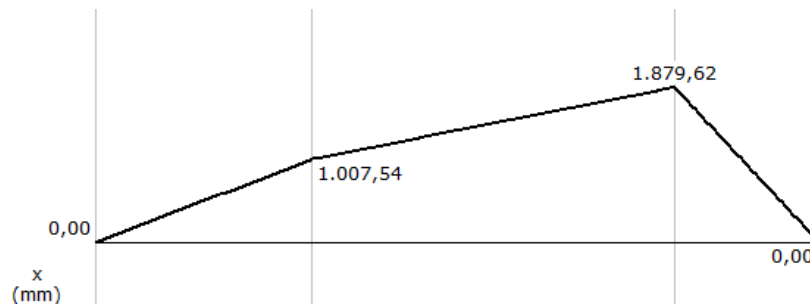


Figura 3. 6 Diagrama de Momento (N mm) Flecha principal

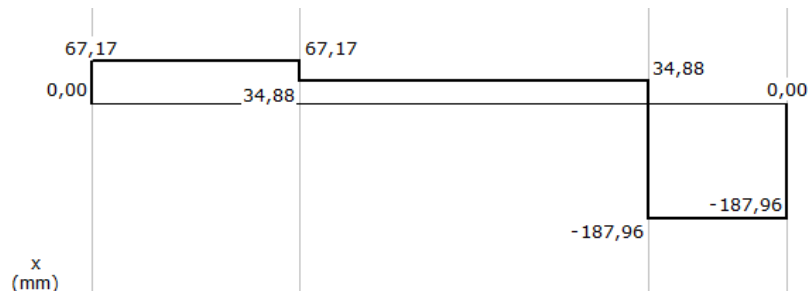


Figura 3. 7 Diagrama de Cortante (N) Flecha principal

Cálculo de flecha primaria.

Para este cálculo se considera los siguientes parámetros:

MC_1 : Momento cortante máximo flecha principal

T_1 : Torque máximo flecha principal

FS_1 : Factor de seguridad flecha principal

FS'_1 : Factor de seguridad real flecha principal

$$MC_1 = 1879.62 \text{ Nmm}$$

$$T_1 = 18792 \text{ Nmm}$$

$$FS_1 = 2$$

D_1 : Diámetro flecha principal

S_y : Resistencia a la tracción del material

S_u : Resistencia última del material

S'_e : Resistencia a la fatiga del material

S_e : Resistencia a la fatiga del elemento

D_m : Diámetro mínimo por fatiga flecha principal

K_t : Factor de tamaño

K_s : Factor de superficie

K_c : Factor de carga

K_d : Factor de temperatura

$K_{\text{flexión}}$: Concentrador de esfuerzos por flexión

$K_{\text{torsión}}$: Concentrador de esfuerzos por torsión

Cálculo del diámetro de la flecha principal;

$$D_1 = \left(\frac{32.FS_1 \cdot \sqrt{MC_1^2 + T_1^2}}{\pi.S_y} \right)^{1/3}$$

En la siguiente tabla se encuentran los diámetros según el S_y de los materiales disponibles;

| Nombre Comercial | AISI | S_y (MPa) | S_u (MPa) | % elongación | D1(mm) |
|------------------|------|-------------|-------------|--------------|--------|
| BOHLER E 920 | 1020 | 235 | 420 | 20 | 11,79 |
| E 760 | 1045 | 313 | 637 | 10 | 10,71 |
| E 7210 | 3115 | 441 | 980 | 8 | 9,56 |
| AISI 1018 | 1018 | 303 | 686 | 20 | 10,83 |

Escogemos el acero E920 ($S_y = 235$ MPa);

$$S_y = 235 \text{ MPa}$$

$$S_u = 420 \text{ MPa}$$

$$D_1 = 11.79 \text{ mm}$$

Cálculo de diámetro mínimo para resistir fatiga (se realiza el procedimiento de cálculos según el libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Joseph Shigley, página 380, sexta edición)

$$S'_e = 0.5 \cdot S_u$$

$$S'_e = 210 \text{ MPa}$$

$$K_t = 0.952$$

$$K_s = 0.91$$

$$K_c = 0.577$$

$$K_d = 1.02$$

$$S_e = K_t \cdot K_s \cdot K_c \cdot K_d \cdot S'_e$$

$$S_e = (0.952)(0.91)(0.577)(1.02)(210) \text{ MPa}$$

$$S_e = 107.098 \text{ MPa}$$

Se debe aplicar un concentrador de esfuerzos debido al alojamiento de la chaveta y se aplica el criterio de Goodman para fatiga;

$$K_{\text{flexión}} = 2.14$$

$$K_{\text{torsión}} = 2.64$$

$$D_m = \left(\frac{32 \cdot FS_1}{\pi \cdot S_u} \sqrt{(K_{\text{torsión}} \cdot T_1)^2 + (K_{\text{flexión}} \cdot MC_1)^2} \right)^{1/3}$$

$$D_m = 13.457 \text{ mm}$$

$$D_1 \geq D_m$$

Por lo tanto;

$$D_1 = 14 \text{ mm}$$

Debido a que se realiza una adaptación con elementos ya fabricados (elementos constituyentes del tren trasero del vehículo), debemos adaptar el diseño considerando las características de dichos elementos. El agujero donde se ajusta la flecha primaria tiene un diámetro mucho mayor al calculado por lo tanto y considerando también los rodamientos disponibles, utilizaremos una flecha de diámetro 20 mm. Tomando en cuenta que la influencia de este cambio en el sistema es mínimo.

$$D_1 = 20 \text{ mm}$$

$$FS'_1 = \frac{\pi \cdot S_y \cdot D_1^3}{32 \cdot \sqrt{MC_1^2 + T_1^2}}$$

$$FS'_1 = 9.773$$

Cálculo de la chaveta para la flecha primaria

w : Ancho de la chaveta

h : Altura de la chaveta

p : Profundidad de la chaveta

FS_{c1} : Ancho de la chaveta

F_1 : Fuerza aplicada a la chaveta

$$w = 1/8 \text{ "}$$

$$h = 1/8 \text{ "}$$

$$T_1 = 166.309 \text{ lb-plg}$$

$$D_1 = 0.787 \text{ "}$$

$$F_1 = \frac{T_1}{\frac{D_1}{2}}$$

$$F_1 = 422.425 \text{ lbf}$$

Se utiliza acero de transmisión E 920 (El mismo material de la flecha para garantizar que la chaveta cumple con la función de fusible mecánico)

$$S_y = 35.25 \text{ Kpsi (235 Mpa)}$$

La chaveta tiene un factor de seguridad menor al de la flecha de tal manera que actúe como fusible mecánico en caso de sobrecarga.

$$FS_{c1} = 1.5$$

$$FS'_1 = 9.773$$

$$p = \frac{2 \cdot F_1 \cdot FS_1}{w \cdot S_y \cdot 1000}$$

$$p = 0.288''$$

Cargas en la flecha secundaria (ubicación del embrague)

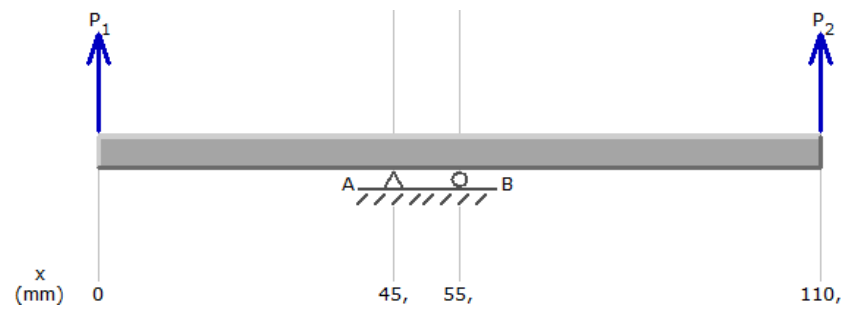


Figura 3. 8 Análisis de cargas

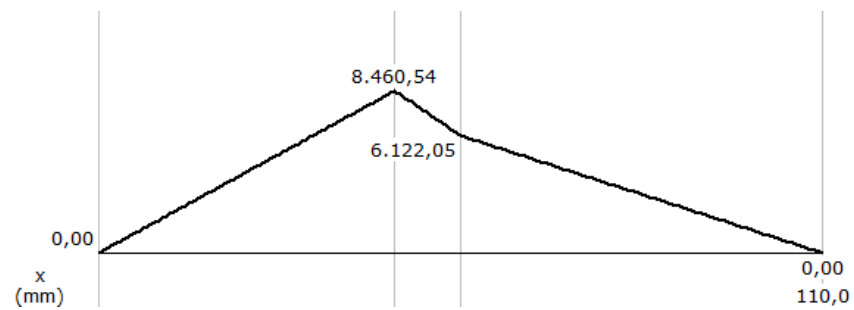


Figura 3. 9 Diagrama de Momento (N mm) Flecha secundaria

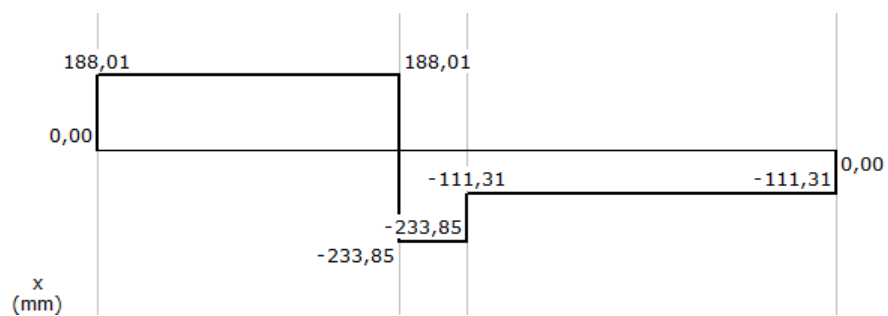


Figura 3. 10 Diagrama de Cortante (N) Flecha Secundaria

Cálculo de flecha secundaria

Para este cálculo se considera los siguientes parámetros.

MC_2 : Momento cortante máximo flecha principal

T_2 : Torque máximo flecha principal

FS_2 : Factor de seguridad flecha principal

FS'_2 : Factor de seguridad real flecha principal

$$MC_2 = 8460.54 \text{ Nmm}$$

$$T_2 = 8460.54 \text{ Nmm}$$

$$FS_2 = 2$$

D_2 : Diámetro flecha principal

S_y : Resistencia a la tracción del material

S_u : Resistencia última del material

S'_e : Resistencia a la fatiga del material

S_e : Resistencia a la fatiga del elemento

D_m : Diámetro mínimo por fatiga flecha principal

K_t : Factor de tamaño

K_s : Factor de superficie

K_c : Factor de carga

K_d : Factor de temperatura

$K_{\text{flexión}}$: Concentrador de esfuerzos por flexión

$K_{\text{torsión}}$: Concentrador de esfuerzos por torsión

Cálculo del diámetro de la flecha principal;

$$D_2 = \left(\frac{32.FS_2.\sqrt{MC_2^2 + T_2^2}}{\pi.S_y} \right)^{1/3}$$

En la siguiente tabla se encuentran los diámetros según el S_y de los materiales disponibles;

| Nombre Comercial | AISI | S_y (MPa) | S_u (MPa) | % elongación | D1(mm) |
|------------------|------|-------------|-------------|--------------|--------|
| BOHLER E 920 | 1020 | 235 | 420 | 20 | 10,12 |
| E 760 | 1045 | 313 | 637 | 10 | 9,20 |
| E 7210 | 3115 | 441 | 980 | 8 | 8,21 |
| AISI 1018 | 1018 | 303 | 686 | 20 | 9,30 |

Escogemos el acero E920 ($S_y = 235$ MPa);

$$S_y = 235 \text{ MPa}$$

$$S_u = 420 \text{ MPa}$$

$$D_1 = 10,12 \text{ mm}$$

Cálculo de diámetro mínimo para resistir fatiga (se realiza el procedimiento de cálculos según el libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Joseph Shigley, página 380, sexta edición)

$$S'_e = 0.5 \cdot S_u$$

$$S'_e = 210 \text{ MPa}$$

$$K_t = 0.968$$

$$K_s = 0.91$$

$$K_c = 0.577$$

$$K_d = 1.02$$

$$S_e = K_t \cdot K_s \cdot K_c \cdot K_d \cdot S'_e$$

$$S_e = (0.968)(0.91)(0.577)(1.02)(210) \text{ MPa}$$

$$S_e = 108,862 \text{ MPa}$$

Se debe aplicar un concentrador de esfuerzos debido al alojamiento de la chaveta y se aplica el criterio de Goodman para fatiga;

$$K_{\text{flexión}} = 2.14$$

$$K_{\text{torsión}} = 2.64$$

$$D_m = \left(\frac{32 \cdot FS_2}{\pi \cdot S_u} \sqrt{(K_{\text{torsión}} \cdot T_2)^2 + (K_{\text{flexión}} \cdot MC_2)^2} \right)^{1/3}$$

$$D_m = 12,676 \text{ mm}$$

$$D_1 \geq D_m$$

Por lo tanto;

$$D_1 = 13 \text{ mm}$$

Debido a que se realiza una adaptación con elementos ya fabricados (elementos constituyentes del tren trasero del vehículo), debemos adaptar el diseño considerando las características de dichos elementos.

$$D_1 = 14 \text{ mm}$$

$$FS'_2 = \frac{\pi \cdot S_y \cdot D_2^3}{32 \cdot \sqrt{MC_2^2 + T_2^2}}$$

$$FS'_2 = 5,291$$

Cálculo de la chaveta para la flecha secundaria

w : Ancho de la chaveta

h : Altura de la chaveta

p : Profundidad de la chaveta

FS_{c2} : Ancho de la chaveta

F_2 : Fuerza aplicada a la chaveta

$$w = 1/8 \text{ "}$$

$$h = 1/8 \text{ "}$$

$$T_2 = 74,876 \text{ lb-plg}$$

$$D_2 = 0.551 \text{ "}$$

$$F_2 = \frac{T_2}{\frac{D_2}{2}}$$

$$F_2 = 271,692 \text{ lbf}$$

Se utiliza acero de transmisión E 920 (El mismo material de la flecha para garantizar que la chaveta cumple con la función de fusible mecánico)

$$S_y = 35.25 \text{ Kpsi (235 Mpa)}$$

La chaveta tiene un factor de seguridad menor al de la flecha de tal manera que actúe como fusible mecánico en caso de sobrecarga.

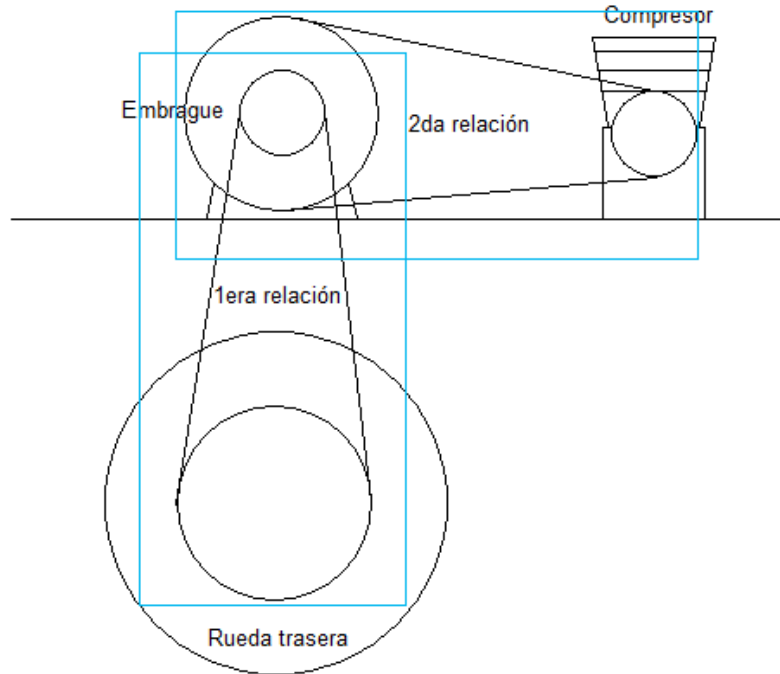
$$FS_{c1} = 1.5$$

$$FS'_1 = 5,291$$

$$p = \frac{2 \cdot F_1 \cdot FS_1}{w \cdot S_y \cdot 1000} \quad p = 0.185 \text{ "}$$

3.2.1.2 Selección de bandas y poleas

El esquema de la ubicación de las 2 relaciones será el siguiente:



Elaborado por: Solano- Zurita

Figura 3. 11 Disposición de ubicación de Poleas

Parámetros de diseño

Potencia nominal: 2 HP (1.55 KW)

Tipo de máquina conducida: Compresor recíprocante de una etapa

Horas de servicio: 2 horas/día intermitente

Velocidad de entrada: 758 RPM

Velocidad de salida: 2800 +/- 50

Para datos de catálogo de bandas véase ANEXO B

Selección de bandas

Se utiliza la Guía para ingeniería de bandas en V Dayco, facilitada por el proveedor

Se sigue el procedimiento para transmisión de aumento de velocidad

(Pag. 201 Guía Dayco)

| | |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Potencia nominal | Potnom := 2 hp |
| Velocidad de entrada | nentrada := 758 rpm |
| Velocidad de salida | nsalida := 2800 rpm |
| Torque de entrada | Torqentrada := $7123.78 \cdot \frac{\text{Potnom}}{\text{nentrada}}$ |
| | Torqentrada = 18.796 Nm |

Factor de servicio

Aplicación: E (Pag. 7 Tabla 2. Guía Dayco)

Fuente de potencia: 5 (Pag. 8 Tabla 3. Guía Dayco)

Sf := 2 (Pag. 6 Matriz de factor de servicio. Guía Dayco)

Potencia de diseño

$$\text{Pot} := \text{Potnom} \cdot \text{Sf} \quad \text{Pot} = 4 \quad \text{HP}$$

Relación de transmisión

$$i := \frac{\text{nsalida}}{\text{nentrada}} = 3.694$$

PRIMERA SOLUCIÓN

Banda Power-Wedge (Dayco)

Tipo: 3VX

(Pag. 9 Figura 1 Guía Dayco)

1era relación

Dimensiones de las poleas

(Pag. 17 Guía Dayco)

Diámetro polea mayor
primera relación

$$D1 := 200 \quad \text{mm}$$

Diámetro polea menor
primera relación

$$d1 := 120 \quad \text{mm}$$

Relación de transmisión
primera relación

$$i1 := \frac{D1}{d1} = 1.667$$

Velocidad de entrada
primera relación

$$n_{entrada1} := n_{entrada} = 758$$

Velocidad de salida
primera relación

$$n_{salida1} := n_{entrada1} \cdot i1 = 1.263 \times 10^3$$

Tolerancia de distancia entre
centros:
Instalación: - 0.8"
Tensado: +1.0"

(Pag. 131 Guía Dayco)

Selección de banda: 3VX670

Número de bandas

Potencia que resiste una banda (Pag. 112 Guía Dayco)

$$\text{Potxbanda1} := 3.93$$

Factor de potencia adicional (Pag.113 Guía Dayco)

$$\text{hpadicional1} := 0.13$$

Distancia entre centros nominal $C1 := 24.25$ pulg (594.36 mm)

$$\text{C1} := 24.25 \cdot 25.4$$

$$C1 = 615.95 \text{ mm}$$

$$\frac{D1 - d1}{C1} = 0.13$$

(Pag. 109 Tabla 4. Guía Dayco)

Factor de corrección de arco de contacto

$$\text{ACCF1} := 0.99$$

(Pag. 132 Guía Dayco)

Factor de corrección de longitud

$$\text{LCF1} := 1.02$$

$$\text{Potxbanda1} := (\text{Potxbanda1} + \text{hpadicional1}) \cdot \text{ACCF1} \cdot \text{LCF1}$$

$$\text{Potxbanda1} = 4.1 \quad \text{HP}$$

$$\text{Número de bandas} \quad \text{nbandas1} := \frac{\text{Pot}}{\text{Potxbanda1}} = 0.976$$

Número de bandas: 1

2da relación

Dimensiones de las poleas

(Pag. 18 Guía Dayco)

Relación de transmisión
segunda relación

$$i_2 := \frac{i}{i_1} = 2.216$$

Diámetro menor
segunda relación

$$d_2 := 3.5 \quad \text{pulg. (88.9 mm)}$$

Diámetro mayor
segunda relación

$$D_2 := 8 \quad \text{pulg (203.2 mm)}$$

$$i_2 := \frac{D_2}{d_2} \quad i_2 = 2.286$$

Velocidad de entrada
segunda relación

$$n_{\text{entrada}2} := n_{\text{salida}1} = 1.263 \times 10^3$$

Velocidad de salida
segunda relación

$$n_{\text{salida}2} := n_{\text{entrada}2} i_2 = 2.888 \times 10^3$$

Distancia entre centros
nominal

$$C_2 := 8.125 \quad \text{pulg (206.38 mm)}$$

Tolerancia de distancia
entre centros:

Instalación: - 0.5"

Tensado: +1.0"

Pag. 131 Guía Dayco

Selección de banda: 3VX355

Número de bandas

Pag. 111 Guía Dayco

Potencia que resiste una banda

$$\text{Potxbanda2} := 5.73$$

Pag.111 Guía Dayco

Factor de potencia adicional

$$\text{hpadicional2} := 0.32$$

Pag. 109 Tabla 4. Guía Dayco

$$\frac{D2 - d2}{C2} = 0.554$$

Factor de correccion de arco de contacto

$$\text{ACCF2} := 0.93$$

Pag. 132 Guía Dayco

Factor de corrección de longitud

$$\text{LCF2} := 0.89$$

$$\text{Potxbanda2} := (\text{Potxbanda2} + \text{hpadicional2}) \cdot \text{ACCF2} \cdot \text{LCF2}$$

Número de bandas

$$\text{Potxbanda2} = 5.008 \quad \text{HP}$$
$$\text{nbandas2} := \frac{\text{Pot}}{\text{Potxbanda2}} = 0.799$$

Por lo tanto, el numero de bandas es igual a 1

3.2.1.3 Selección de rodamientos en el eje primario

Se utiliza el catálogo “en línea” SKF, marca de rodamientos que puede encontrarse en el comercio ecuatoriano y se escoge rodamientos rígidos de bolas (baja fricción y trabajo silencioso)

Para hacer el cálculo:

Se define a $Fr1$ como la suma de las componentes x y y de la fuerza cortante, para este caso la fuerza obtenida de los diagramas es la componente en el eje x, definida como Fr_x , mientras que $Fr_y = 0$ debido a que no hay componentes de la fuerza en el eje y.

$$Fr1 = \sqrt{Fr_x^2 + Fr_y^2}$$

$$Fr1 = \sqrt{222.84^2 + 0^2}$$

El $Fr1$ es la única carga en el eje, entonces:

$$Fr1 = P$$

Por lo tanto:

$$P = 222.84 \text{ kN}$$

$$P = XF_r + YF_a \quad ^{13}$$

Donde

P = carga dinámica equivalente del rodamiento, kN

F_r =carga radial real del rodamiento, kN

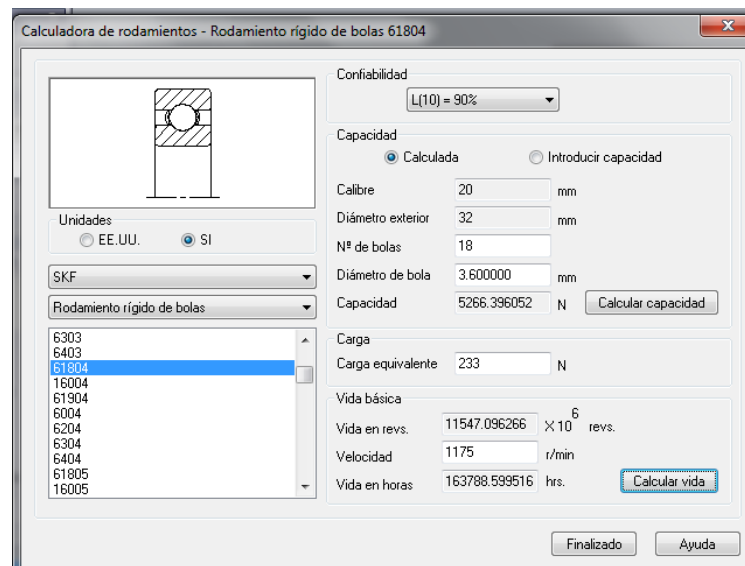
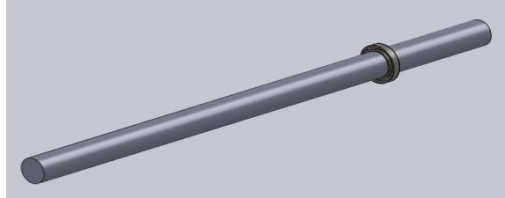
F_a =carga radial real del rodamiento, kN

¹³ Criterio del catálogo http://www.skf.com/portal/skf/home/products?lang=es&maincatalogue=1&newlink=1_0_25

X = factor de carga radial del rodamiento

Y =factor de carga axial del rodamiento

De acuerdo al cálculo de rodamientos de Solidworks:



Elaborado con: Software Solidworks

Figura 3. 12 Selección de rodamiento en flecha primaria

Resultado:

Rodamiento: 61804 SKF

d := 20 mm

D := 32 mm

No := 18 (Número de bolas)

C := 5.266 KN

conf := 90 %

vida := 163788 horas

Selección de rodamientos en el Eje Secundario

Se usa el catálogo SKF para la selección de los rodamientos y de sus respectivos soportes. Ya que el rodamiento va a girar a 1263 r.p.m. se selecciona el rodamiento utilizando la capacidad de carga dinámica.

Se selecciona soportes de piso con rodamientos Y con carga dinámica equivalente:

$$P = XFr + YFa$$

Donde:

P: carga equivalente [N].

Fr: carga radial real [N].

Fa: Carga axial real [N].

X: factor radial.

Y: factor axial.

Como la carga axial es casi despreciable ($F_a=0$) se tiene:

$$P = XFr$$

Donde:

$$X=1 \text{ (} F_a/F_r \leq e \text{)}$$

$$Fr = 233 \text{ [N]}$$

$$P = 1 \times 233 \text{ N}$$

$$P = 233 \text{ [N]}$$

Fórmula de duración:

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde:

L_{10h} : duración nominal en horas de servicio.

n : velocidad constante de rotación en rev/min = 1000 r.p.m.

C : capacidad de carga dinámica.

P : carga dinámica equivalente sobre el rodamiento.

p : exponente de la fórmula de la duración; siendo $p= 3$ para los rodamientos de bolas.

Se toma un valor de L_{10h} en base a las recomendaciones del catálogo para el caso de máquinas de 8 horas de trabajo, no totalmente utilizadas.

$$L_{10h}=15000.$$

$$C = P \times \sqrt[3]{\frac{60 \times n \times L_{10h}}{1000000}}$$

Sustituyen valores

$$C = 233 \times \sqrt[3]{\frac{60 \times 1263 \times 15000}{1000000}}$$

$$C = 1128$$

Del CATÁLOGO SKF (ver ANEXO C) para soportes de pie con rodamiento Y, fundición, se selecciona el siguiente:

Denominación: SYH 3/4 TF

Soporte: SYH 504 U

Rodamiento Y: YAR 204-012-2F

d= 19.0mm

C= 12700 N

Debido al tipo de chumacera seleccionada, también se escoge una canastilla o rodamiento de agujas que ira alojado en el soporte del embrague para dar estabilidad al eje durante su rotación.

Del CATÁLOGO SKF (ver ANEXO C) para rodamientos de agujas, casquillos de agujas.

Denominación: HK 2016.2RS

· d= 20.0mm

· $C = 8420 \text{ N}$

Resumen de componentes seleccionados

Bandas

1era relación.

Tipo de banda: 3VX710 cantidad: 1

Diámetro de polea mayor: 7.87" (199.8 mm)

Diámetro de polea menor: 4.7" (119.3 mm)

Distancia entre centros nominal: 23.4"-0.8+1

2da relación.

Tipo de banda: 3VX425 cantidad: 1

Diámetro de polea mayor: 8" (203.2 mm)

Diámetro de polea menor: 3.5" (88.9 mm)

Distancia entre centros nominal: 11.02"-0.5+1

RODAMIENTOS

Rodamiento No 1

Rodamiento: 61804 SKF

d:=20 mm

D:=32 mm

No:=18 (Número de bolas)

C:=5.266 kN

conf:=90 %

vida := 163788 horas

Rodamiento No 2

Denominación: SYH 3/4 TF

Soporte: SYH 504 U

Rodamiento Y: YAR 204-012-2F

d= 19.0mm

C= 12700 N

Canastilla

Denominación: HK 2016.2RS

d= 20.0mm

C= 8420 N

3.2.2 DISEÑO DEL SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

Requerimientos:

El sistema debe transformar la energía que provee el sistema de transmisión de poleas en energía neumática (aire comprimido).

El aire debe contenerse en un tanque de almacenamiento.

Se debe utilizar mangueras flexibles desde el tanque ubicado en la parte trasera del auto, en el baúl, hacia el motor en la parte delantera debido a la disposición de los elementos del vehículo y el espacio disponible; para el transporte del aire.

El vehículo no debe comprimir aire cuando este en reversa.

Parámetros del sistema de aire comprimido

Presión.

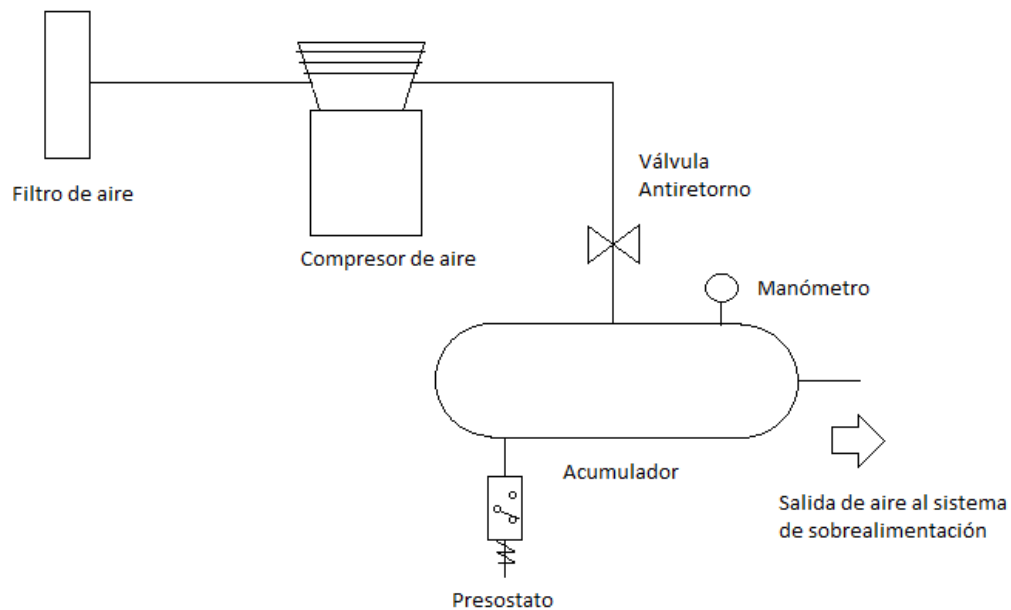
Se busca llegar a una presión de 120 psi (0.827 MPa) de almacenamiento en el tanque.

Caudal.

El desplazamiento teórico del cilindro del compresor es de 5,4 CFM o 153 l/min.¹⁴

¹⁴ Datos técnicos del compresor, ANEXO D

En el siguiente esquema se muestra la distribución de las diferentes partes del sistema de aire comprimido



Elaborado por: Solano- Zurita

Figura 3. 13 Esquema del sistema de aire comprimido

Selección de componentes

En la selección previa del tipo de compresor se optó por un compresor de tipo alternativo. Entre las diferentes opciones del mercado debido a las prestaciones, precio y tamaño del mismo; se seleccionó un compresor portátil el cual va a ser desarmado para adaptarlo al espacio disponible en el vehículo.

Se utiliza las partes del mismo compresor con el fin de la reducción de costos, principalmente el tanque y el cabezal compresor, mas no el motor eléctrico.

Compresor

Las especificaciones del compresor se encuentran en la hoja técnica del mismo. (Véase ANEXO D)

Las características del compresor se encuentran a continuación.

| CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS | | |
|--------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| MARCA | Schulz | |
| MODELO | CSI 7,4/25 | |
| DESPLAZAMIENTO DE AIRE | CFM | 5.5 |
| | l/min | 153 |
| PRESION DE TRABAJO MAXIMA | lbf/plg² | 140 |
| | bar | 9,7 |
| UNIDAD COMPRESORA | No Etapas | 1 |
| | No Pistones | 1 |
| POTENCIA DEL MOTOR | kW | 1.5 |
| | Hp | 1.12 |
| VOLUMEN DEL RESERVORIO | L | 26 |
| PESO NETO | kg | 42 |
| ANCHO x ALTURA x LARGO | mm | 320 x 620 x 600 |

Tabla 3. 7 Características técnicas del compresor Schulz

Válvula anti retorno y válvula de desfogue

El grupo compresor cuenta ya con una válvula anti retorno y una válvula de desfogue localizadas en el tanque

3.3DISEÑO DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN

El sistema de sobrealimentación consta de dos subsistemas: el sistema de distribución y regulación de aire y el sistema de control de sobrealimentación

3.3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN Y REGULACIÓN DE AIRE

Requerimientos:

La presión del aire que ingresa al motor, debe ser controlable manualmente.

Debe utilizarse una unidad de mantenimiento para el aire comprimido.

Se debe utilizar mangueras flexibles para el transporte del aire

Se debe contar con un distribuidor de aire que permita la apertura y el cierre del paso del aire proveniente del tanque.

Parámetros del sistema de aire distribución y regulación de aire

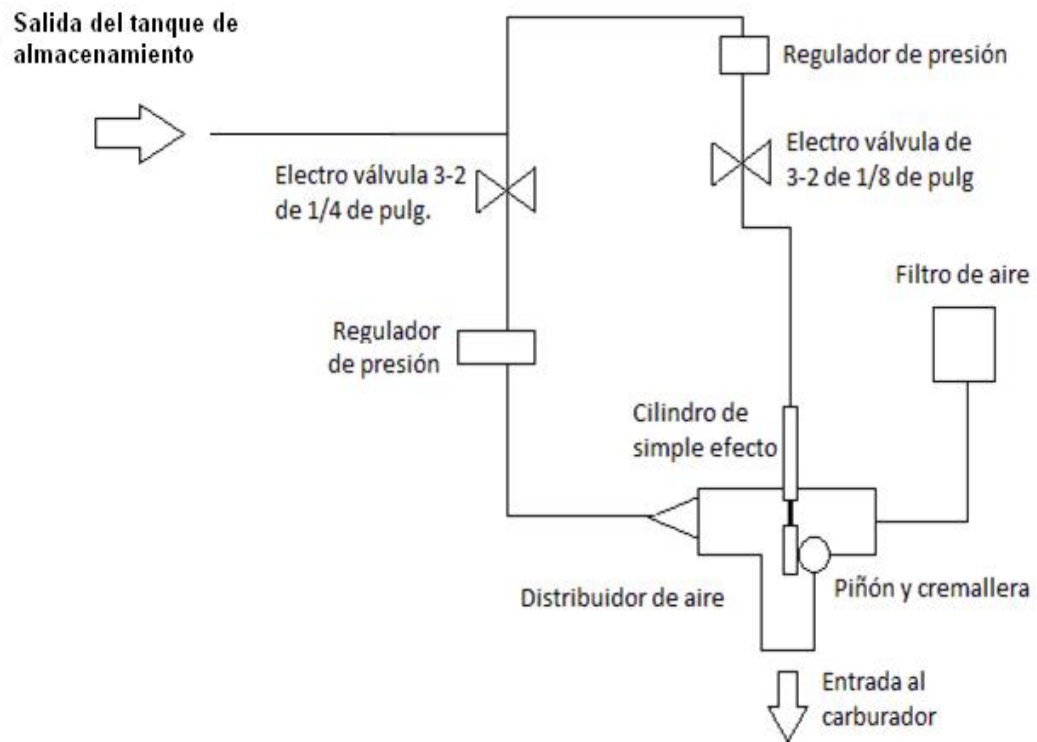
Presión.

El sistema de sobrealimentación debe compensar la pérdida de presión atmosférica debido a la altura (m.s.n.m), por lo que la presión será controlada para que no supere la presión de 1 at. (14.7 psi).

Caudal.

Caudal máximo a utilizarse por el motor a 4500 rpm será de 121.09 cfm (57.15 l/s)¹⁵

El sistema es una red de distribución abierta con una sola salida. En el siguiente esquema se pueden observar las diferentes partes del mismo.



Elaborado por: Solano- Zurita

Figura 3. 14 Esquema del sistema distribución y regulación de aire

¹⁵ Véase ANEXO E

Determinación del caudal de aire que utilizaría al motor y volumen del tanque de almacenamiento

La memoria de cálculo se encuentra en el ANEXO E realizado con el software MATHCAD.

A continuación se presenta el resumen del cálculo y se consideran los siguientes parámetros:

η_V : Eficiencia volumétrica

ρ_1 : Densidad del aire a la presión de 14.7 psi (1 at.).

ρ_2 : Densidad del aire a la presión de 120 psi. (presión de almacenamiento del tanque)

t : Tiempo de sobrealimentación.

V_C : Volumen del cilindro.

w : Velocidad de giro del motor.

$$\eta_V = 0.8$$

$$\rho_1 = 0.001204 \text{ kg/l (1.204 kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_2 = 0.009957 \text{ kg/l (9,957 kg/m}^3\text{)}$$

$$t = 6 \text{ s}^{16}$$

$$V_C = 0.476 \text{ l (476.25 cm}^3\text{)}$$

$$w = 4500 \text{ rpm}$$

¹⁶ A criterio de los investigadores: en condiciones de carretera asfaltada, terreno plano, a una velocidad promedio de 80 km/h, el adelantamiento a un auto tipo sedan, de dimensiones similares al vehículo de prueba

\dot{Q}_V : Flujo volumétrico requerido por el motor.

\dot{m}_{ideal} : Flujo másico ideal requerido por el motor.

\dot{m}_{real} : Flujo másico real requerido por el motor.

m : Masa de aire requerida en el tanque de almacenamiento

V_t : Volumen requerido del tanque de almacenamiento

Dado que en un motor de 4 cilindros (como el del vehículo de prueba), por cada vuelta del cigüeñal del motor, dos cilindros se encuentran en etapa de admisión (aspiran la mezcla aire-combustible). Por lo tanto el flujo volumétrico de aire requerido viene dado por:

$$\dot{Q}_V = 2 \cdot w \cdot V_c$$

$$\dot{Q}_V = 2 \cdot \left(\frac{4500}{60}\right) \cdot (0.476) \text{ l/s}$$

$$\dot{Q}_V = 71.44 \text{ l/s}$$

Cálculo del flujo másico ideal

$$\dot{m}_{ideal} = \dot{Q}_V \cdot \rho_1$$

$$\dot{m}_{ideal} = (71.44) \cdot (0.001204) \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{ideal} = 0.086 \text{ kg/s}$$

Cálculo del flujo másico real

$$\dot{m}_{real} = \eta_v \cdot \dot{m}_{ideal}$$

$$\dot{m}_{real} = (0.8) \cdot (0.001204) \text{ kg/s}$$

$$\dot{m}_{real} = 0.069 \text{ kg/s}$$

Cálculo de la masa de aire requerida

$$m = \dot{m}_{real} \cdot t$$

$$m = (0.069) \cdot (6) \text{ kg}$$

$$m = 0.413 \text{ kg}$$

Cálculo del volumen del tanque de almacenamiento

$$V_t = \frac{m}{\rho_2}$$

$$V_t = \frac{0.413}{0.009957} \text{ l}$$

$$V_t = 41.46 \text{ l}$$

Para la ubicación y montaje de los elementos del sistema se cuenta con un espacio reducido; un tanque de 42 litros es demasiado grande para el espacio asignado para su instalación y adicionalmente se cuenta ya con un tanque de 25 litros listo para su montaje por lo que se escoge este para el sistema.

Determinación del diámetro y caída de presión en la tubería.

Para este cálculo se debe tener en cuenta que no existen elevaciones considerables entre las diferentes partes de la ubicación de la tubería.

Debido a que el aire es compresible, se presenta un cambio significativo en el peso específico, sin embargo el objetivo de este diseño es el de tener un pequeño cambio de presión. Por lo que se asume un promedio

La velocidad en los dos puntos será igual, debido a que la tubería no cambia su diámetro a lo largo de todo el proceso.

Presión inicial p_1

Presión final $p_2 := 120 \text{ psi}$

Se escoje un tubería de 3 1/2 pulgadas donde:

Del Apéndice F (Mott Pag. 549)

Mecánica de Fluidos

Díametro de la tubería $D := 0.2957 \text{ pies} \quad (90.19 \text{ mm})$

Area de la tubería $A := 0.06968 \text{ pies}^2 \quad (6473.48 \text{ mm}^2)$

Longitud de la tubería $L := 13.12 \text{ pies} \quad (4 \text{ m})$

Caudal a 4500 rpm $Q := 2.016 \frac{\text{pies}^3}{\text{s}}$

Se utiliza la ecuación de la energía entre la salida del tanque hacia el ingreso al motor

$$\frac{p_1}{\gamma_1} + z_1 + \frac{v^2}{2g} - h_L := \frac{p_2}{\gamma_2} + z_2 + \frac{v^2}{2g}$$

Las velocidades, alturas y el peso específico se considera los mismos entre 1 y 2 (la entrada y la salida), la formula se simplifica a:

$$p_1 := p_2 + \gamma \cdot h_L$$

Velocidad del aire

$$v := \frac{Q}{A}$$

$$v = 28.932 \frac{\text{pies}}{\text{s}}$$

Gravedad

$$g := 32.2 \frac{\text{pies}}{\text{s}^2}$$

Peso específico del
aire a 120 psi

$$\gamma := 0.671$$

Densidad

$$\rho := \frac{\gamma}{g}$$

Viscosidad

$$\rho = 0.021$$

dinámica

del aire a 20 °C

$$\mu := 3.78 \cdot 10^{-7} \text{lb} \cdot \frac{\text{s}}{\text{pie}^2}$$

Número de Reynolds

$$\text{NR} := \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu}$$

$$\text{NR} = 4.716 \times 10^5$$

Ecuación de Colebrook

$$\frac{1}{\sqrt{f}} := -2 \cdot \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{\text{NR} \cdot \sqrt{f}} \right)$$

Se igualan los dos miembros de la ecuación y se da valores a f (factor de fricción),
al ser iguales los dos miembros de la ecuación, se encuentra el valor de correcto
de f

Rugosidad de una tubería lisa $\varepsilon := 0.000005$

si $f := 0.01353$ entonces :

$$a := -2 \cdot \log \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{\text{NR} \cdot \sqrt{f}} \right)$$

$$a = 8.596$$

$$b := \frac{1}{\sqrt{f}}$$

$$b = 8.597$$

| | lado izquierdo | lado derecho |
|----------------|----------------|--------------|
| f | a | a |
| 0.011 | 8.51 | 9.53 |
| 0.012 | 8.54 | 9.12 |
| 0.01353 | 8.596 | 8.597 |
| 0.014 | 8.61 | 8.45 |
| 0.015 | 8.63 | 8.16 |

Por lo tanto se toma a f con el valor de $f = 0.01353$

$Le := 30$ Longitud equivalente en diametros de conductos para un codo estandar de 90 grados. (Mott pag 283)

Pérdida de energía debido a la fricción

$$hL := f \cdot \left(\frac{L}{D} \right) \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right) + f \cdot (Le) \cdot \left(\frac{v^2}{2 \cdot g} \right)$$

$$hL = 13.079$$

$$p1 := p2 + \gamma \cdot hL$$

$$p1 = 128.776$$

Debido a que el cambio de presión es menor al 10%, la suposición de que el peso específico del aire es constante es correcta y la tubería se tomará con un diámetro de 3 1/2 pulgadas

| Diámetro de tubería (pulg) | Caída de presión (psi) |
|----------------------------|------------------------|
| 3.5 | 8.7 |
| 2.5 | 45 |

A medida que el diámetro disminuye la caída de presión aumenta.

El diámetro recomendado es el de 3.5 pulgadas, pero debido a las restricciones del espacio en el automóvil y la ubicación de las mangueras; se escoge un diámetro de $\frac{3}{4}$ de pulgada para el montaje en el automóvil y posteriores pruebas.

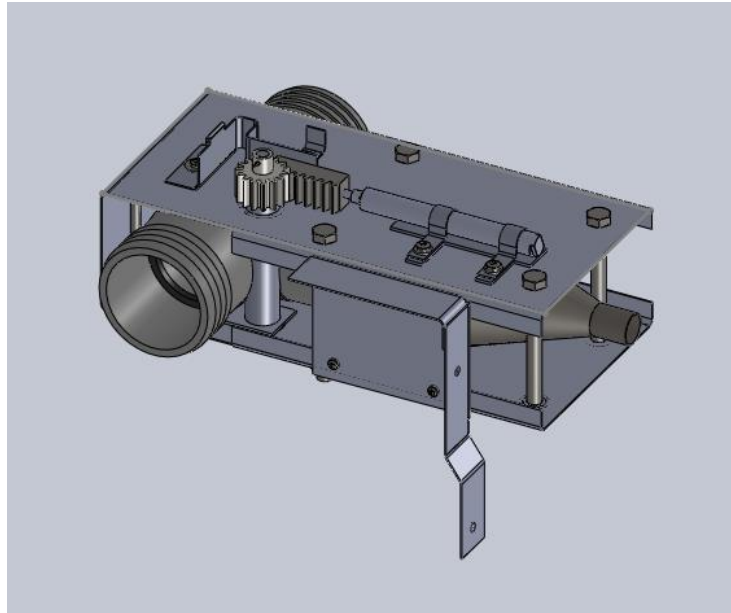
El cálculo por la formula anterior no es válido si sobrepasa el 10% del cambio de presiones, la caída de presión medida con una tubería de $\frac{3}{4}$ de pulgada es de 34 psi ¹⁷

Diseño del distribuidor de aire

El distribuidor de aire cuenta con una aleta accionada por un mecanismo piñón - cremallera que selecciona el ingreso de aire al motor entre aspiración atmosférica y sobrealimentación.

En la página se muestra la imagen del modelo del distribuidor de aire

¹⁷ Refiérase a la prueba de caudal en el capítulo 5



Elaborado con: Software Solidworks

Figura 3. 15 Representación del distribuidor de aire

Consumo de aire del actuador lineal.

Se tiene como referencia el alto caudal de aire a ingresar al motor y se considera despreciable la cantidad de aire usada por el actuador teniendo en cuenta que este funcionará uno o dos ciclos como máximo cada vez que se realice la sobrealimentación.

Selección del piñón y la cremallera.

El esfuerzo realizado por la cremallera para mover el piñón es considerado despreciable, debido a que la masa de la aleta es relativamente pequeña en relación al distribuidor de aire.

El material que se utilizó para fabricar, tanto el piñón como la cremallera es un polímero con excelentes propiedades de mecanizado. Debido al

espacio reducido se escoge un piñón y una cremallera de las siguientes dimensiones

Piñón

| | |
|-------------------|----|
| Número de dientes | 15 |
| Módulo | 2 |

Tabla 3. 8 Datos para la fabricación del piñón

Cremallera

| | |
|----------|-------|
| Longitud | 30 mm |
| Módulo | 2 |

Tabla 3. 9 Datos para la fabricación de la cremallera

Selección de componentes

Cilindro de simple efecto

| | |
|------------------------|-------|
| Longitud de la carrera | 25 mm |
| Diámetro | 8 mm |

Tabla 3. 10 Datos significativos del cilindro de simple efecto.

Válvula para la línea principal

Es una válvula solenoide de 3 vías, 2 posiciones, monoestable, normalmente cerrada, de 1/4 de pulgada de la marca Mindman.

Válvula para línea de alimentación del actuador de la aleta

Es una válvula solenoide de 3 vías, 2 posiciones, monoestable, normalmente cerrada, de 1/8 de pulgada de la marca Camozzi.

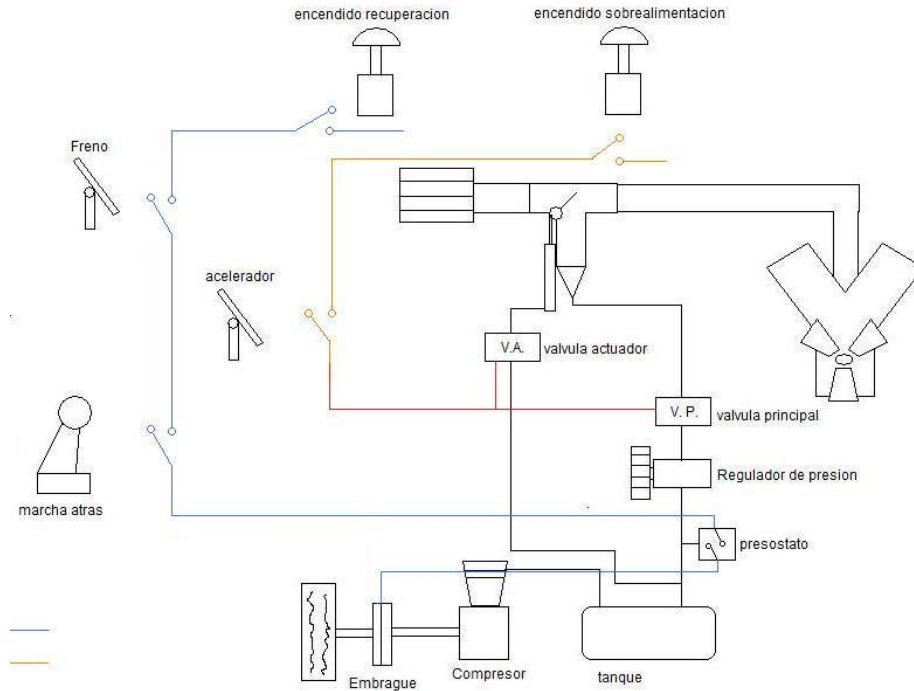
Los datos técnicos de las respectivas válvulas se encuentran en el

ANEXO FANEXO F .

3.4 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Este sistema se constituye de los diferentes componentes y elementos que controlan tanto el sistema de compresión de aire, como el sistema de sobrealimentación del motor; para brindar así seguridad y control al usuario del vehículo

Para tener una idea más clara se puede observar en el esquema de la página siguiente:



Elaborado por: Solano- Zurita

Figura 3. 16 Esquema del sistema control

3.4.1 CONTROL DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN

Requerimientos

El sistema eléctrico debe funcionar con corriente continua y 12V.

Cuando la presión llegue a 140 psi en el tanque de almacenamiento, el sistema debe desactivarse automáticamente

El sistema debe tener dos modos de encendido; normal y permanente cada uno con un interruptor independiente y deben funcionar de la siguiente forma:

En el modo normal: al encender el interruptor, el embrague electromagnético debe recibir energía al momento de activar el pedal del freno permitiendo que el sistema comprima aire únicamente cuando el vehículo se encuentra en fase de frenado.

En el modo permanente: al encender el interruptor, el embrague electromagnético debe recibir energía eléctrica permanentemente manteniendo al compresor trabajando de manera continua independientemente del estado del vehículo (en aceleración o frenado).

Parámetros

Voltaje

Se utiliza 12 V.

Selección de componentes

Se utilizan relés de 12 V y fusibles 5 A y 10 A de acuerdo a la carga de los diferentes componentes.

3.4.2 CONTROL DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN

Requerimientos

El sistema eléctrico debe funcionar con corriente continua y 24V.

El mecanismo piñón-cremallera debe ser accionado por un actuador neumático.

El sistema de sobrealimentación debe tener un interruptor manual.

El paso de aire del distribuidor debe ser controlado mediante el accionamiento del acelerador.

El sistema debe tener la capacidad de ser fácilmente configurado para que inyecte aire adicional al sistema de aspiración normal en caso de ser necesario.

Parámetros

Voltaje

Se conectan 2 baterías en paralelo para obtener los 24 V que se utilizan en las electroválvulas y los 12 v de la batería de dotación del vehículo para los relés

Selección de componentes

Para la selección de los componentes tanto de cables y relés, se toma en cuenta la resistencia de las válvulas.

3.5 ELABORACIÓN DE PLANOS

Una vez finalizado el diseño se realizan los correspondientes planos de taller. Estos planos se muestran en el ANEXO G

Los planos para la construcción se presentan cumpliendo con las normas de dibujo con todas las indicaciones necesarias para la construcción de los diferentes elementos que conforman el sistema.

CAPITULO 4

CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

La construcción del sistema de recuperación de energía cinética para sobrealimentación del motor de un automóvil, se debe realizar en un taller mecánico industrial en donde existan todos los equipos necesarios para la construcción de cada uno de los elementos que lo conforman. Estos elementos se los construye de acuerdo a los planos de taller.

Es importante considerar la disponibilidad de la materia prima y demás elementos en el comercio ecuatoriano.

4.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO

En la construcción del sistema de recuperación de energía cinética para sobrealimentación; es necesario disponer de los procedimientos de fabricación de los diferentes elementos a construirse. Además previo a la construcción se debe contar con máquinas, equipos, herramientas, materiales, instrumentos, etc. Se detallan a continuación.

Máquinas y equipos.

- Dobladora.
- Cizalla.
- Fresadora.
- Esmeril.
- Torno.

- Soldadora eléctrica.
- Amoladora.
- Taladro.
- Sierra alternativa.

Herramientas.

- Limas.
- Martillo.
- Tijera de tol.
- Playa de presión.
- Playo manual.
- Pinzas.
- Llaves.
- Rayador
- Granete.
- Brocas.
- Útiles para tornear.
- Sierra de Arco.
- Juego de destornilladores.
- Entenalla

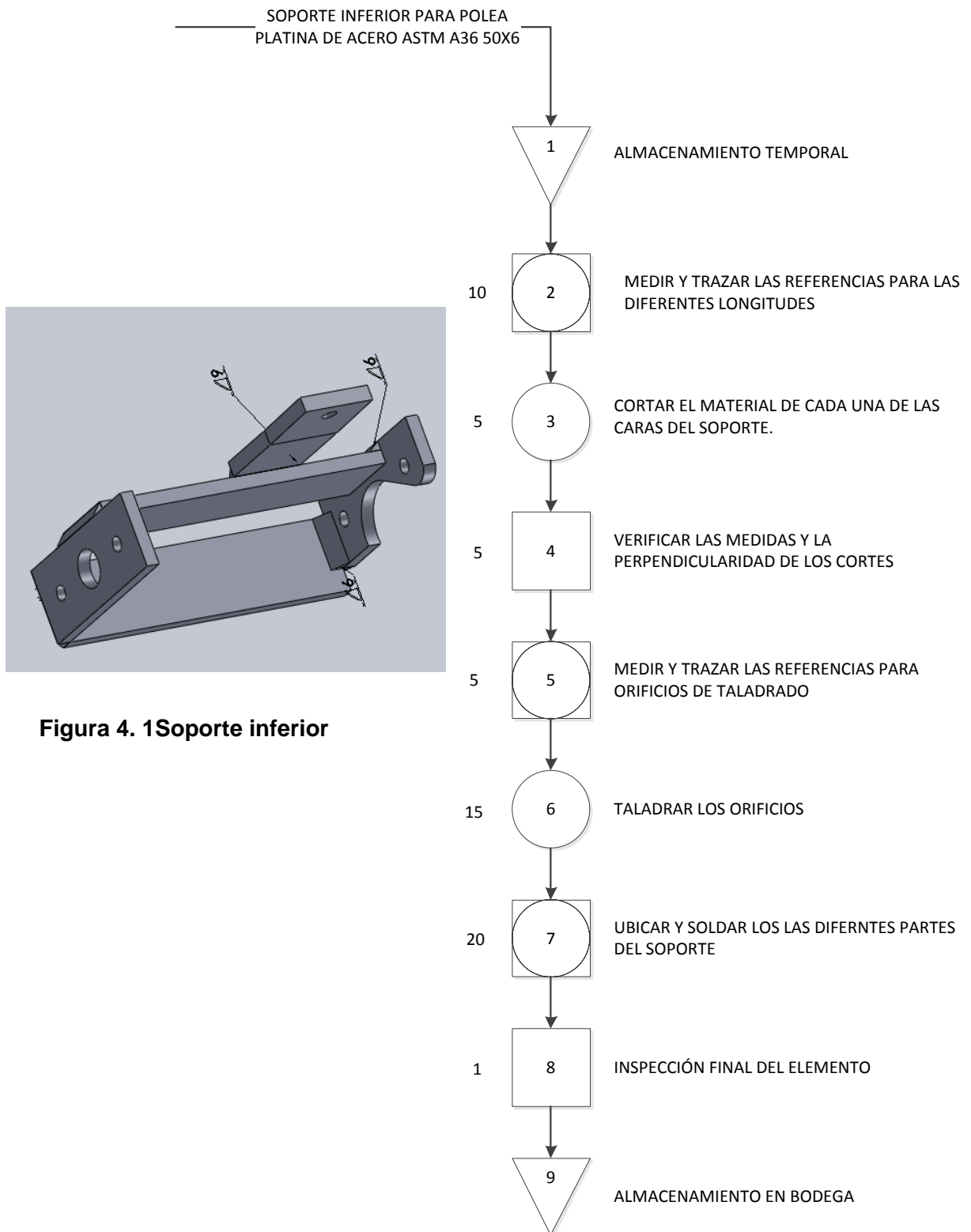
Instrumentos de medición.

- Calibrador pie de rey.
- Compás.
- Nivel.
- Flexómetro.
- Escuadra.

Materia Prima.

- Plancha de acero ASTM A 36 PL 1220x1440x1 mm.
- Eje Acero AISI-1018 – 1 pulg.*1000mm.
- Eje Acero AISI-1018 – 4 pulg.*1000mm.
- Eje Acero AISI-1018 – 8 pulg.*1 1/2. pulg.
- Barra Poliamida 6 (GRILON) Color negro Ø 25 x 400 mm.
- Barra Poliamida 6 (GRILON) Color negro Ø 50 x 80 mm.
- Platina de acero ASTM A 36 PLT 50mm x 6m e: 6 mm.
- Barra de POLYAMIDA 6 EXTRUIDA (LAMIGAMID 100) Color blanco – Ø 2 x 8pulg.
- Barra perforada de Bronce fosfórico 1 1/2x 3/4 L: 2 pulg.
- Electrodo E 6011 x 1/8

4.1.1 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE INFERIOR PARA POLEA



4.1.2 PASOS DE FABRICACIÓN DEL DISCO SOPORTE

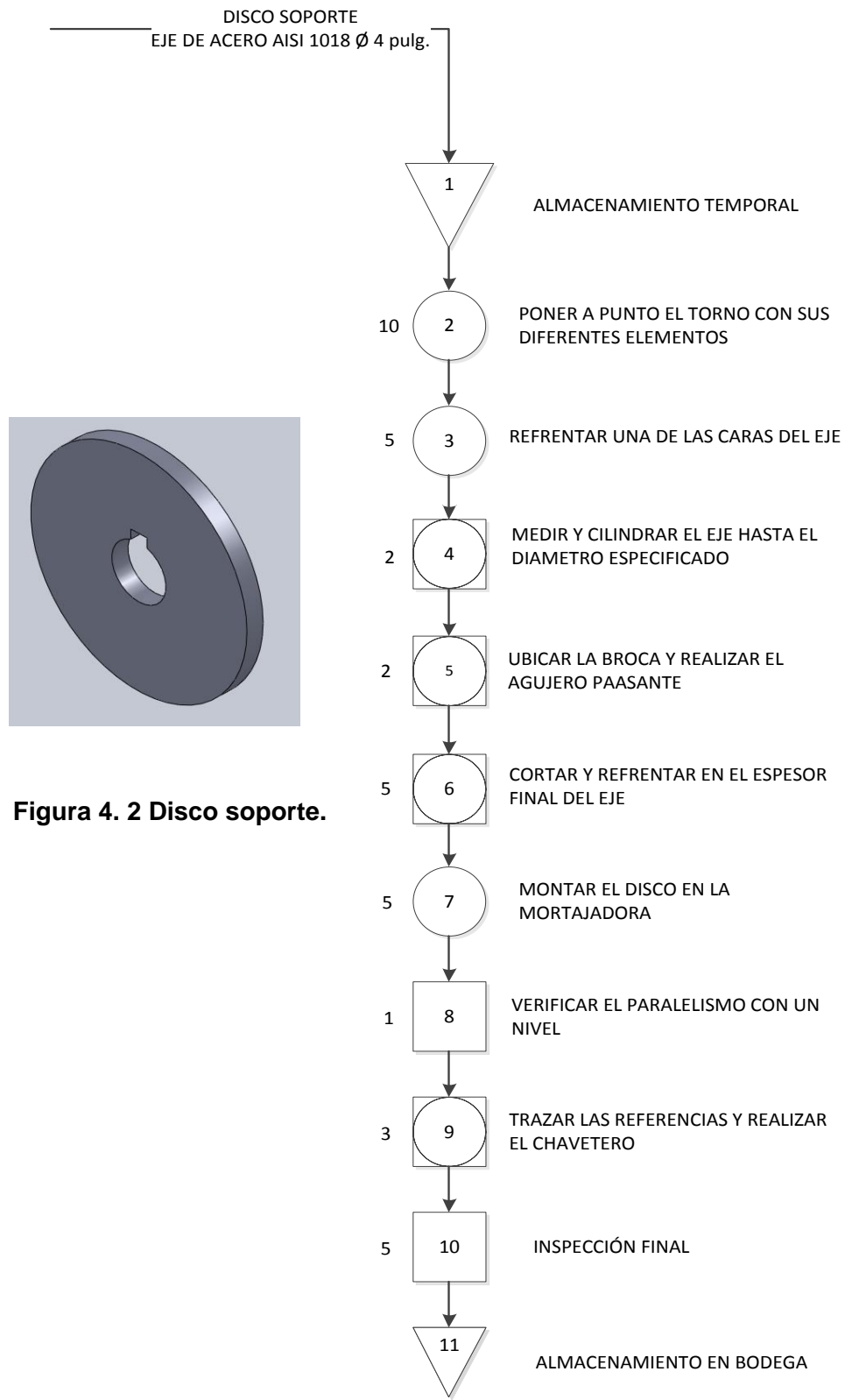


Figura 4. 2 Disco soporte.

4.1.3 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA FLECHA PRINCIPAL

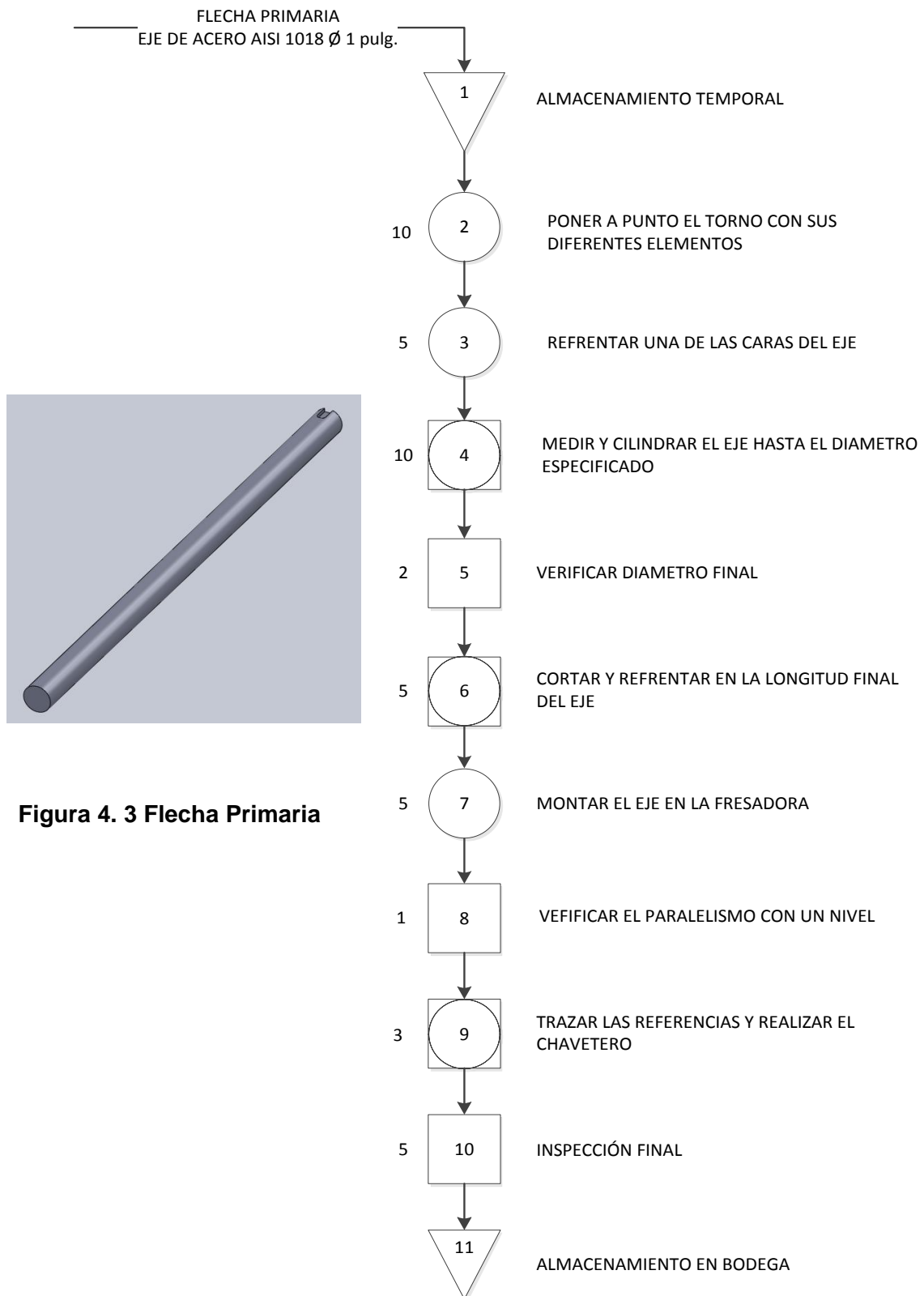


Figura 4. 3 Flecha Primaria

4.1.4 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA POLEA INFERIOR

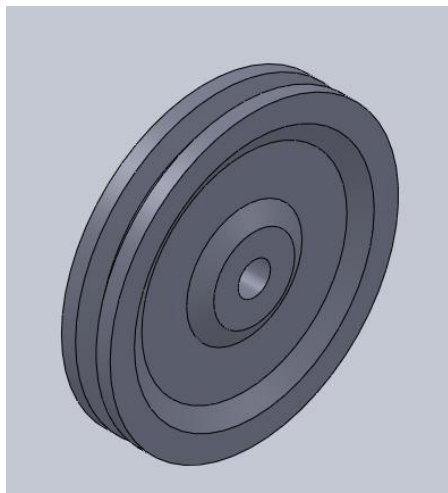
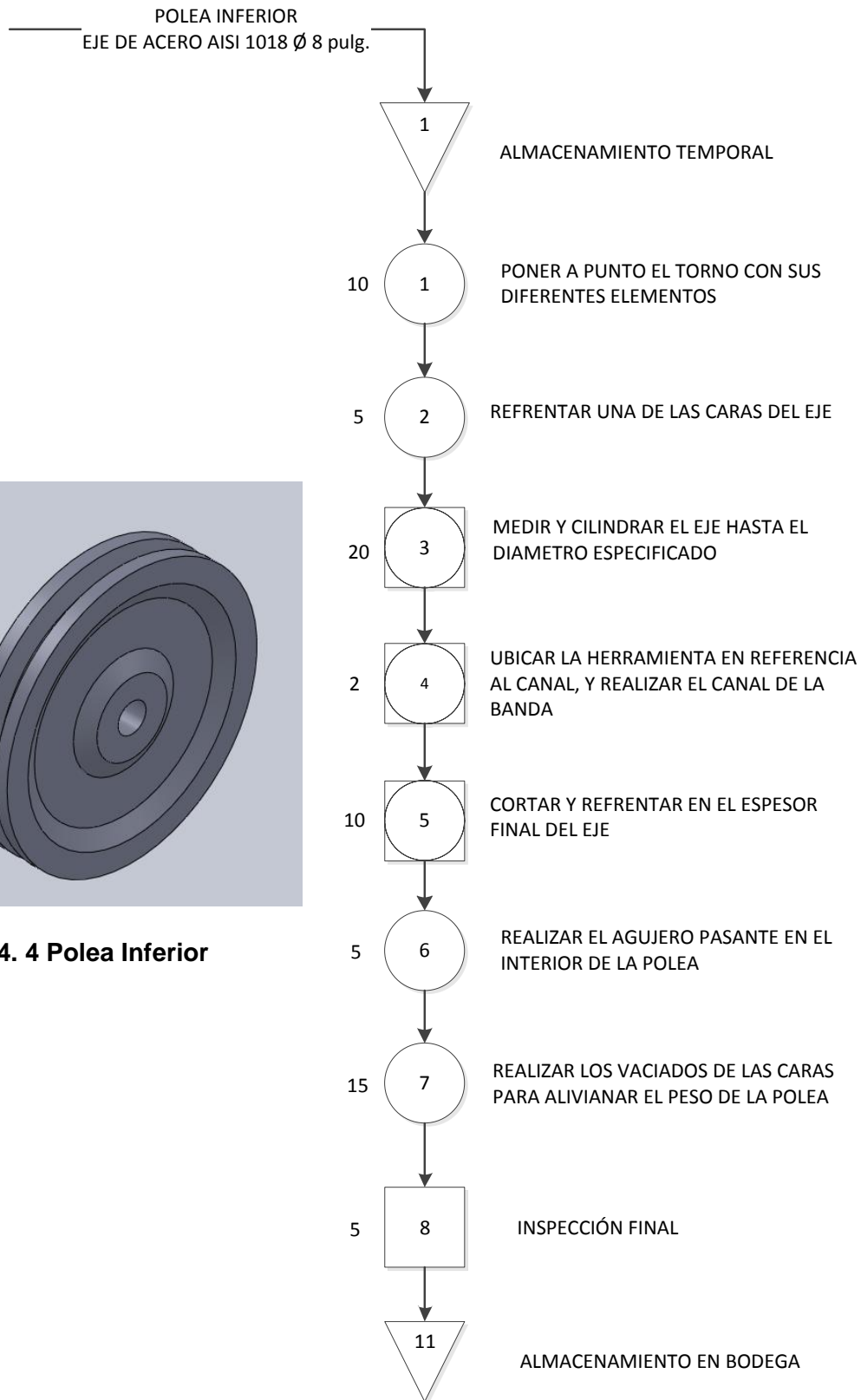
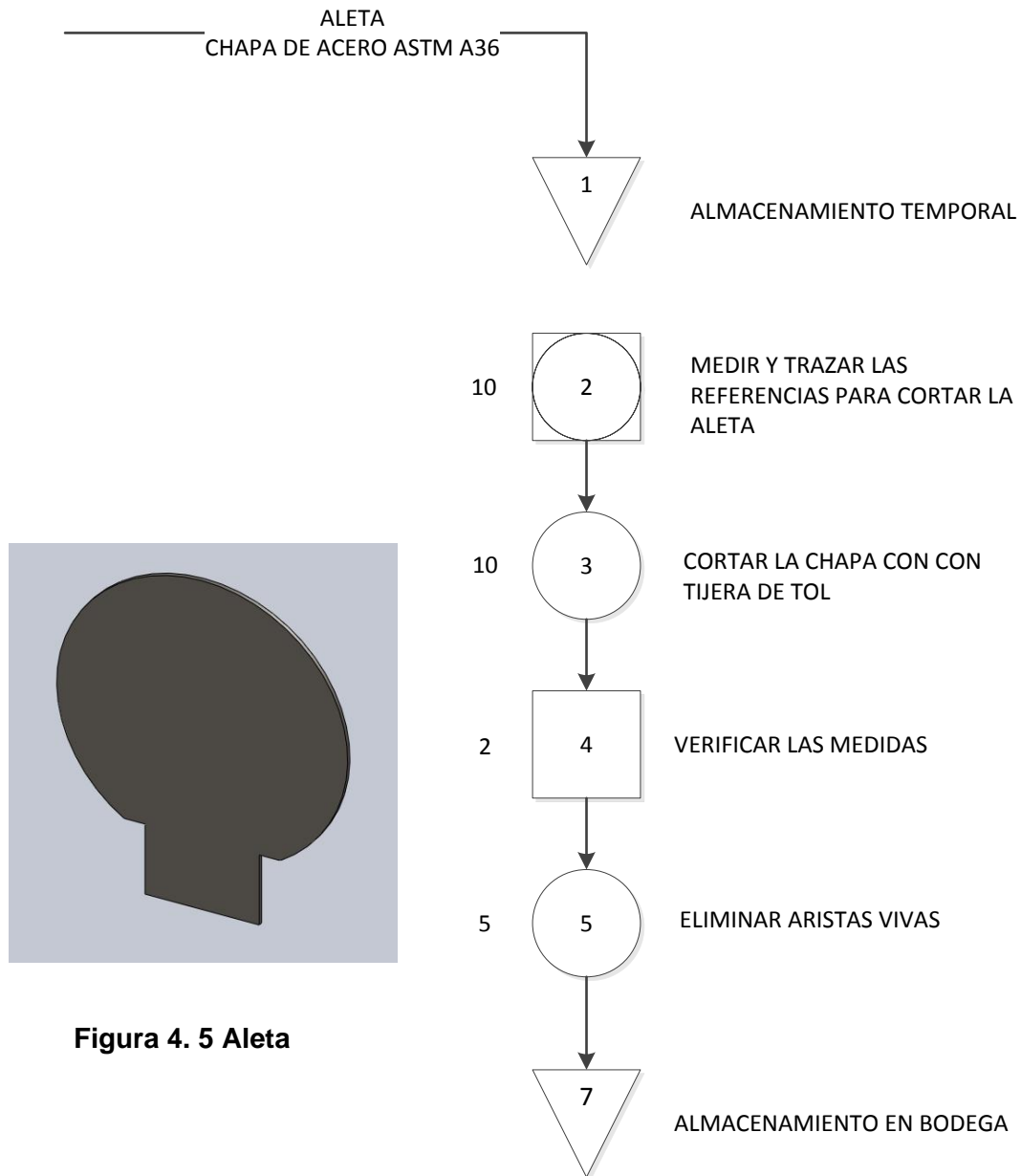


Figura 4. 4 Polea Inferior

4.1.5 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA ALETA



4.1.6 PASOS DE FABRICACIÓN DEL CILINDRO PARA ALETA

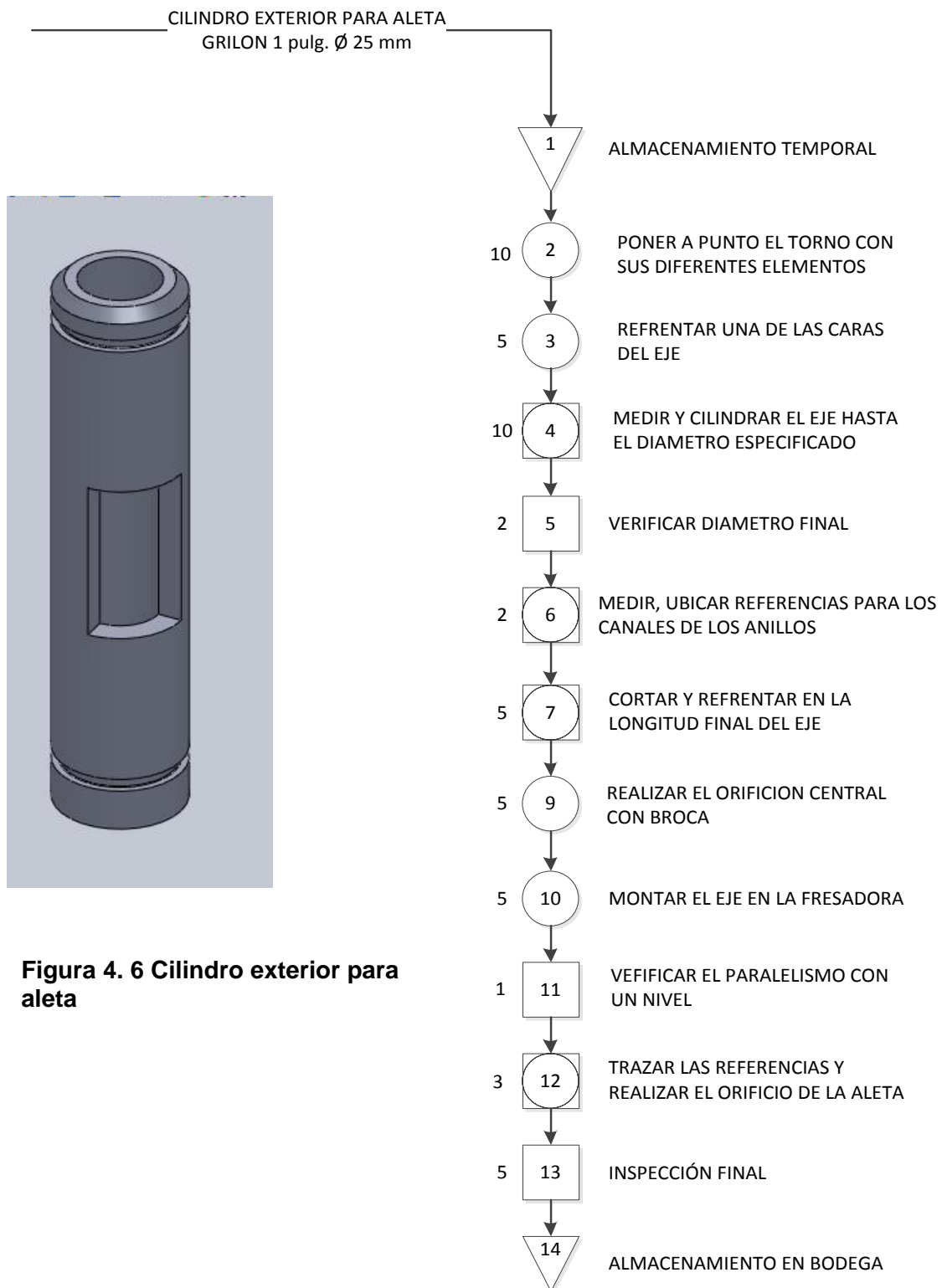


Figura 4. 6 Cilindro exterior para aleta

4.1.7 PASOS DE FABRICACIÓN DE CILINDRO SOPORTE

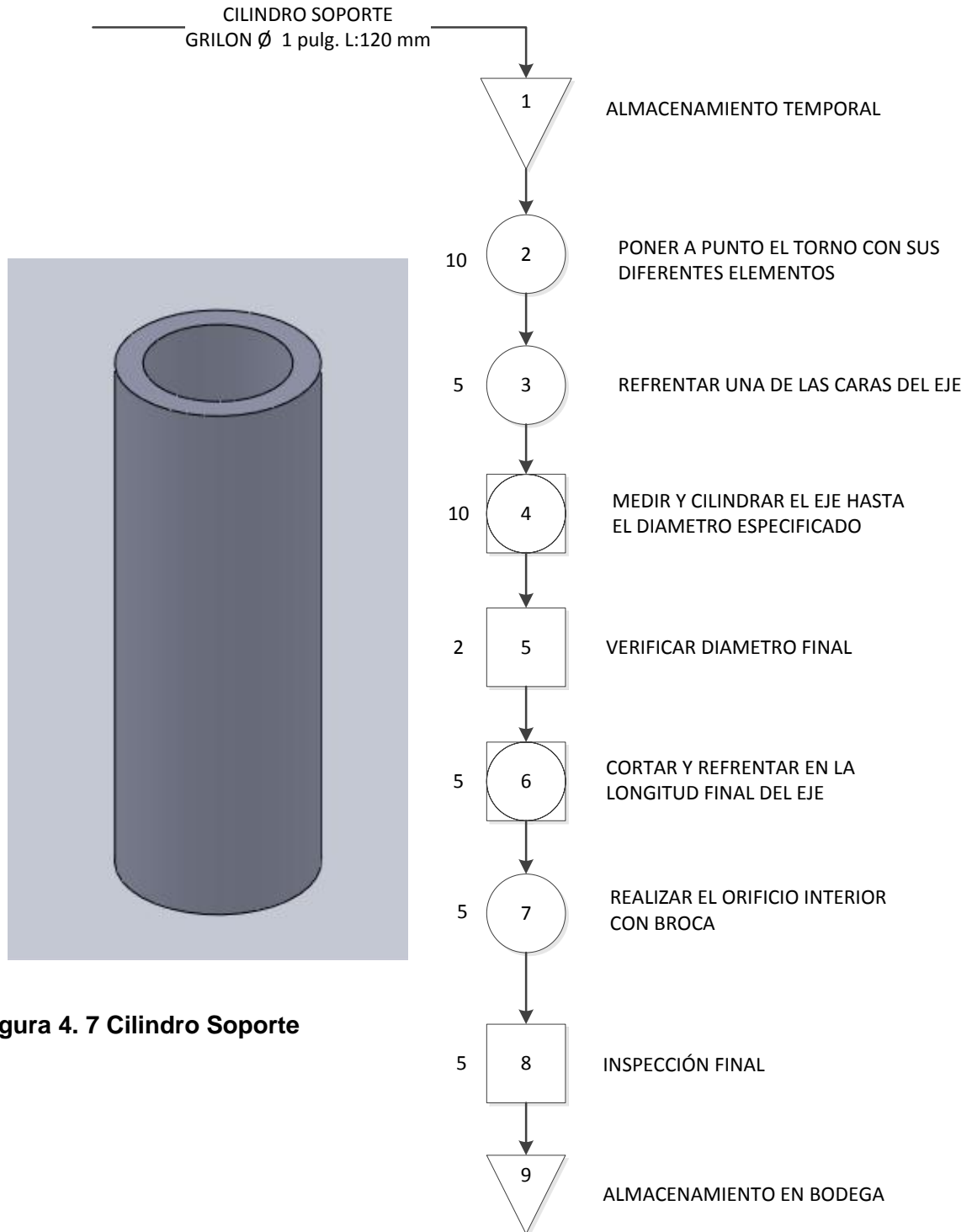


Figura 4. 7 Cilindro Soporte

4.1.8 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA CREMALLERA

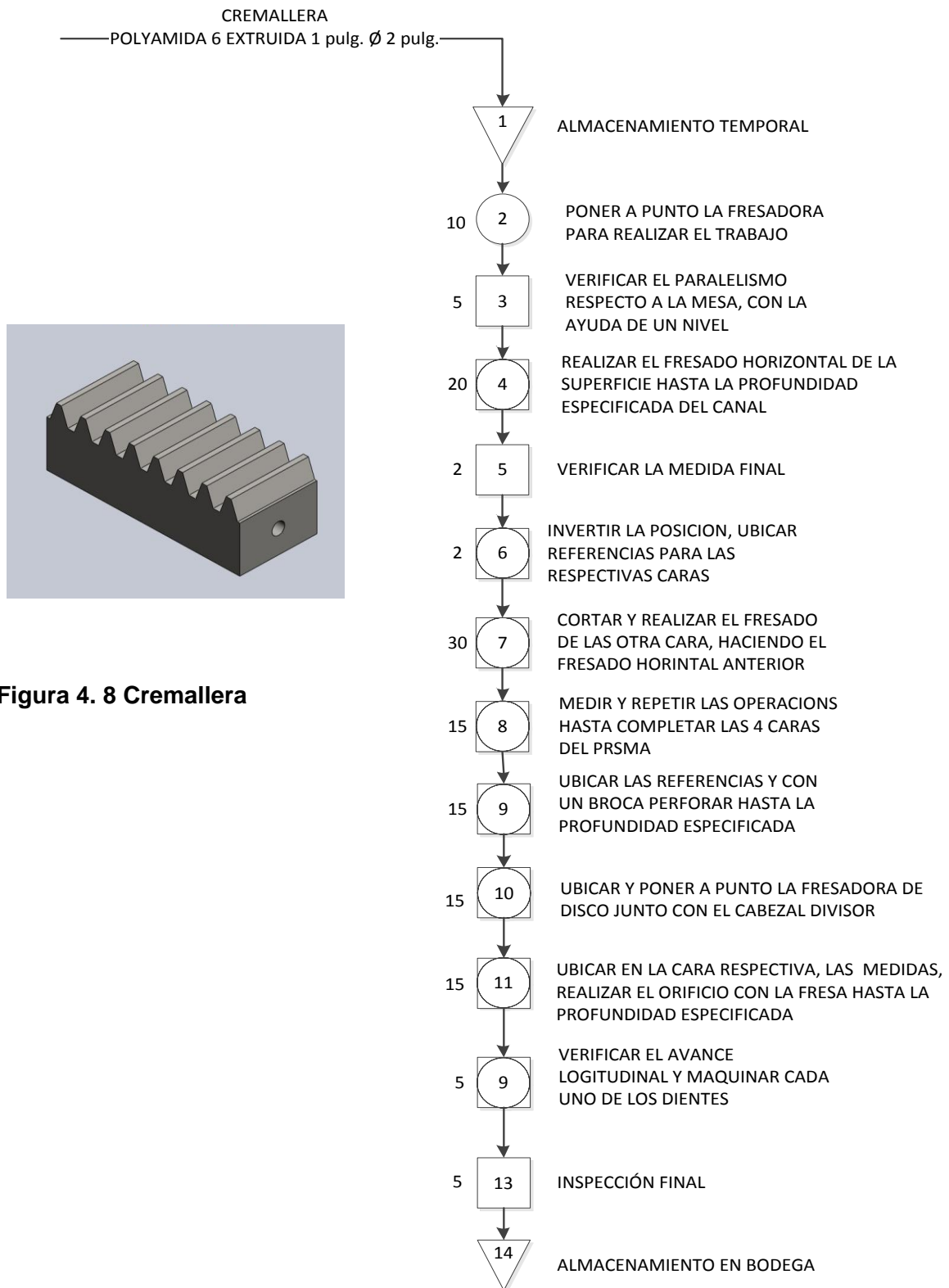


Figura 4. 8 Cremallera

4.1.9 PASOS DE FABRICACIÓN DEL CILINDRO GUÍA DE LA ALETA

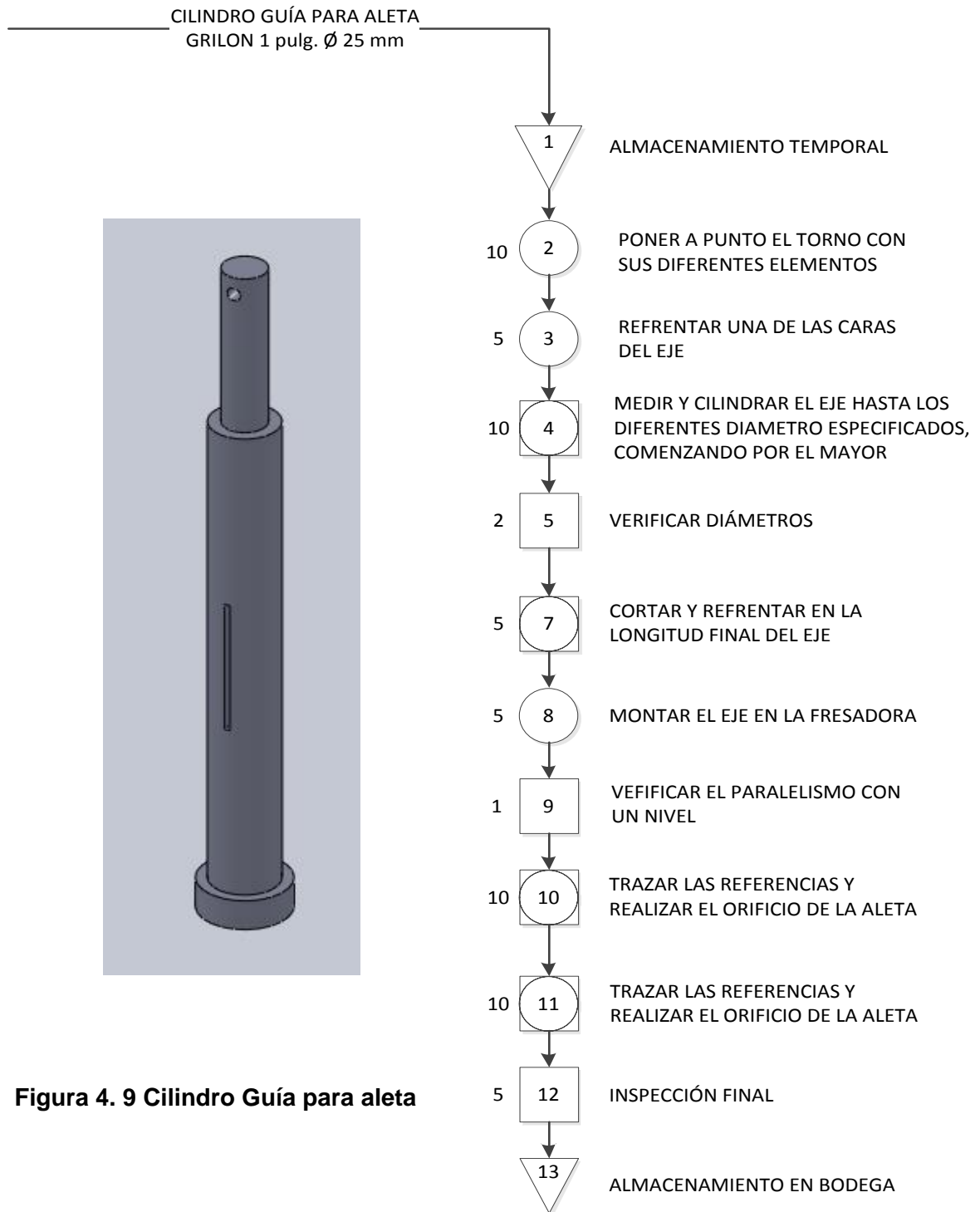


Figura 4. 9 Cilindro Guía para aleta

4.1.10 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA GUÍA PARA CREMALLERA

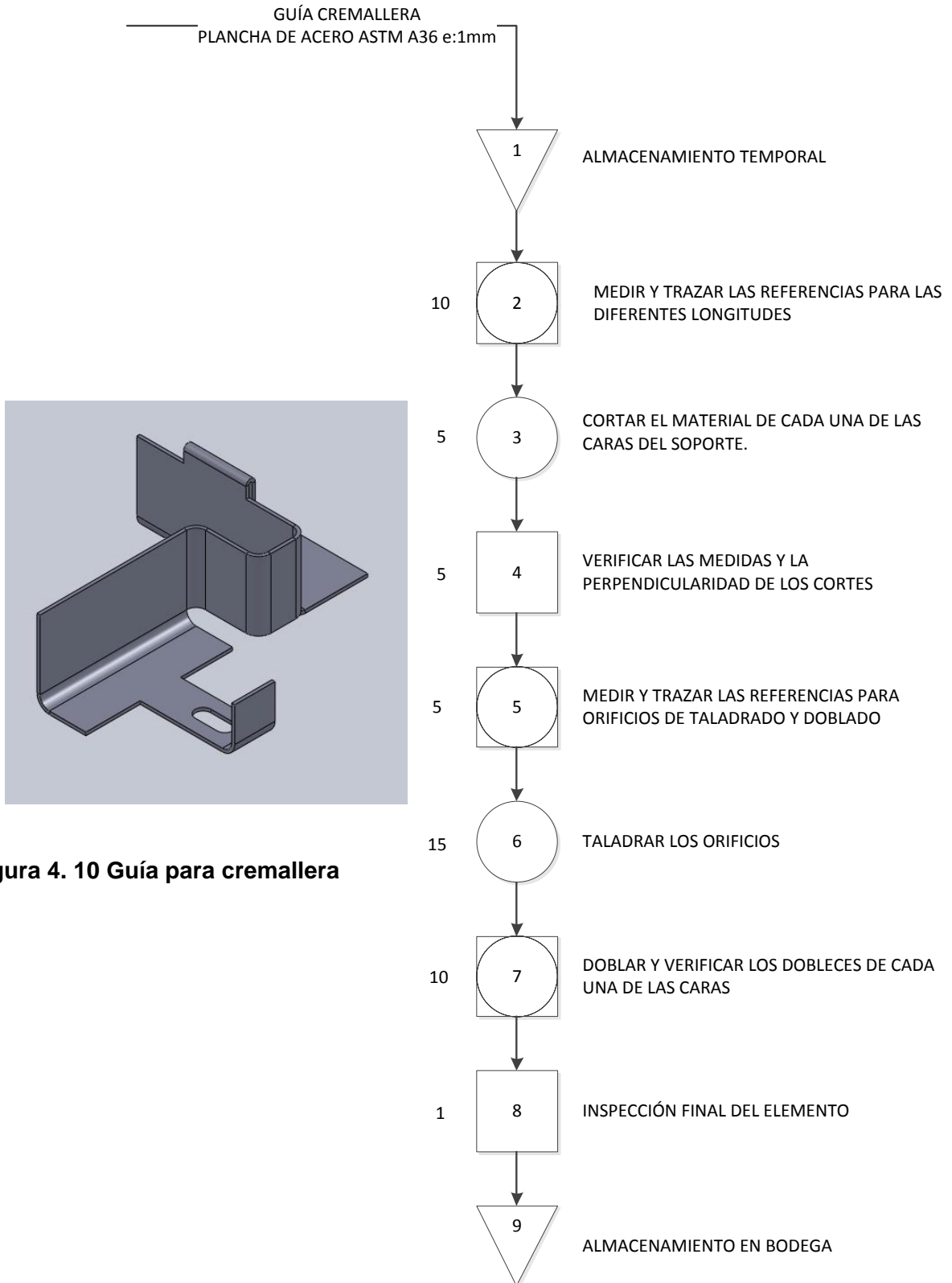


Figura 4. 10 Guía para cremallera

4.1.11 PASOS DE FABRICACIÓN DEL PIÑÓN

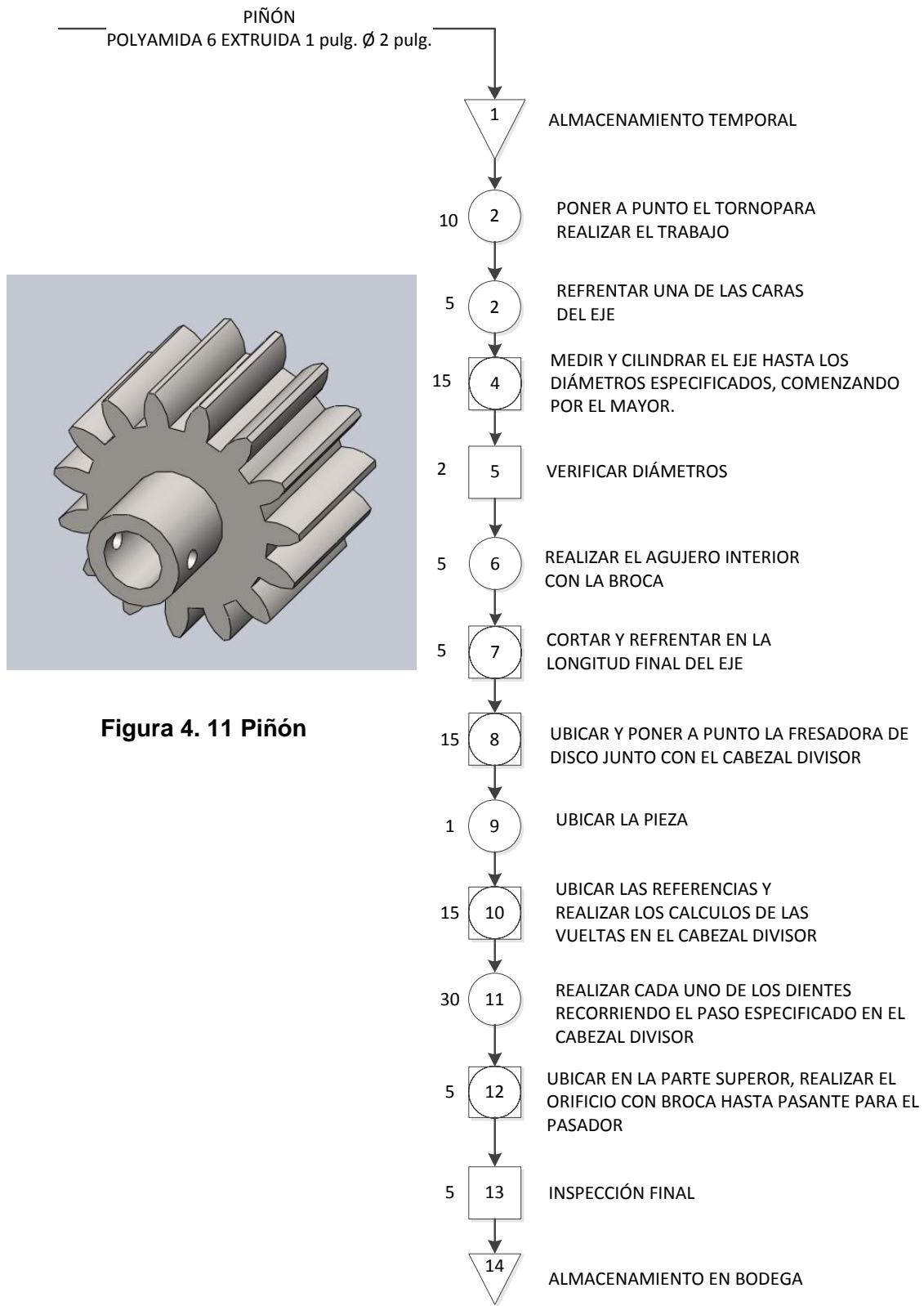


Figura 4. 11 Piñón

4.1.12 PASOS DE FABRICACIÓN DE REDUCCIÓN PARA MANGUERA

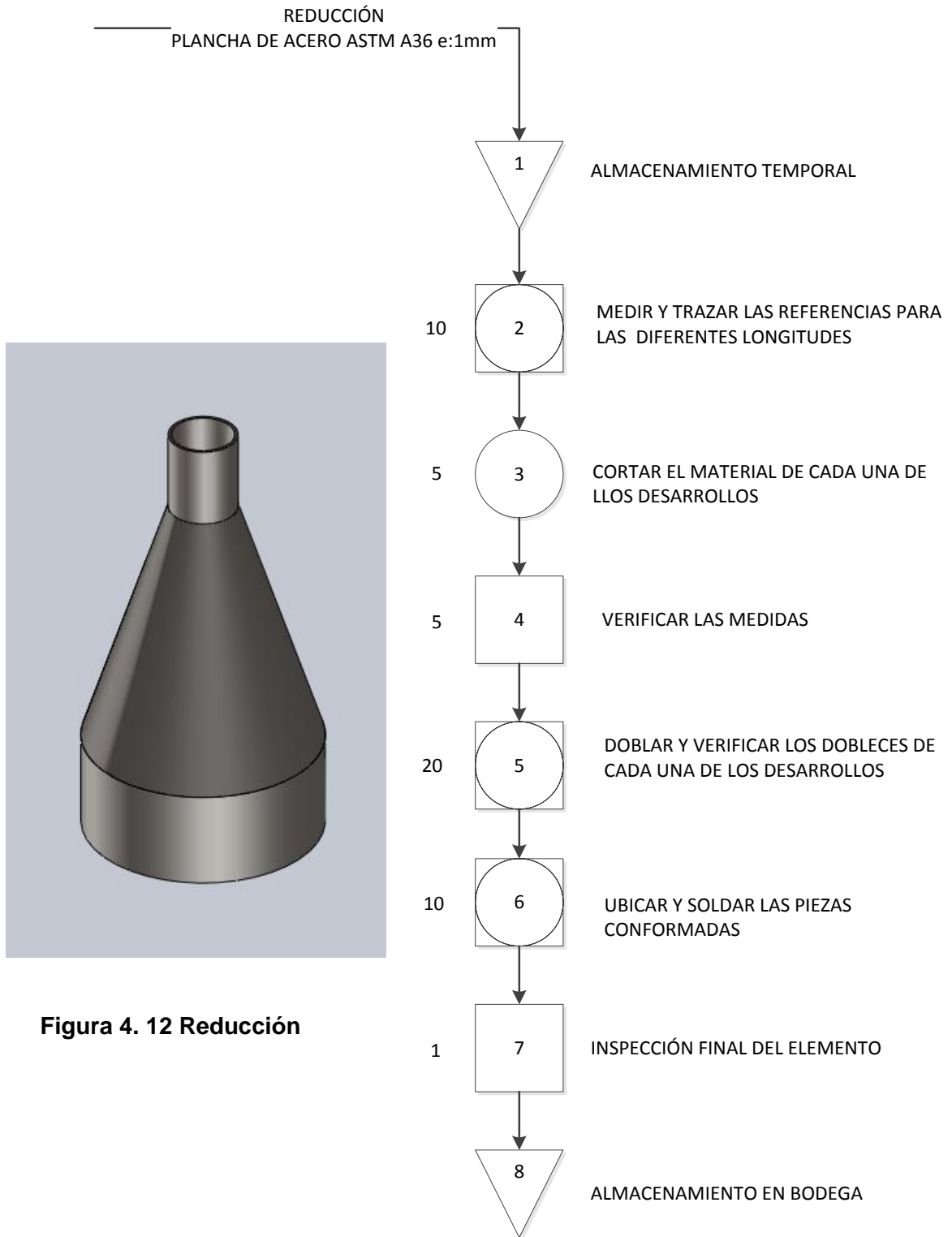


Figura 4. 12 Reducción

4.1.13 PASOS DE FABRICACIÓN DE BASE PARA ACTUADOR

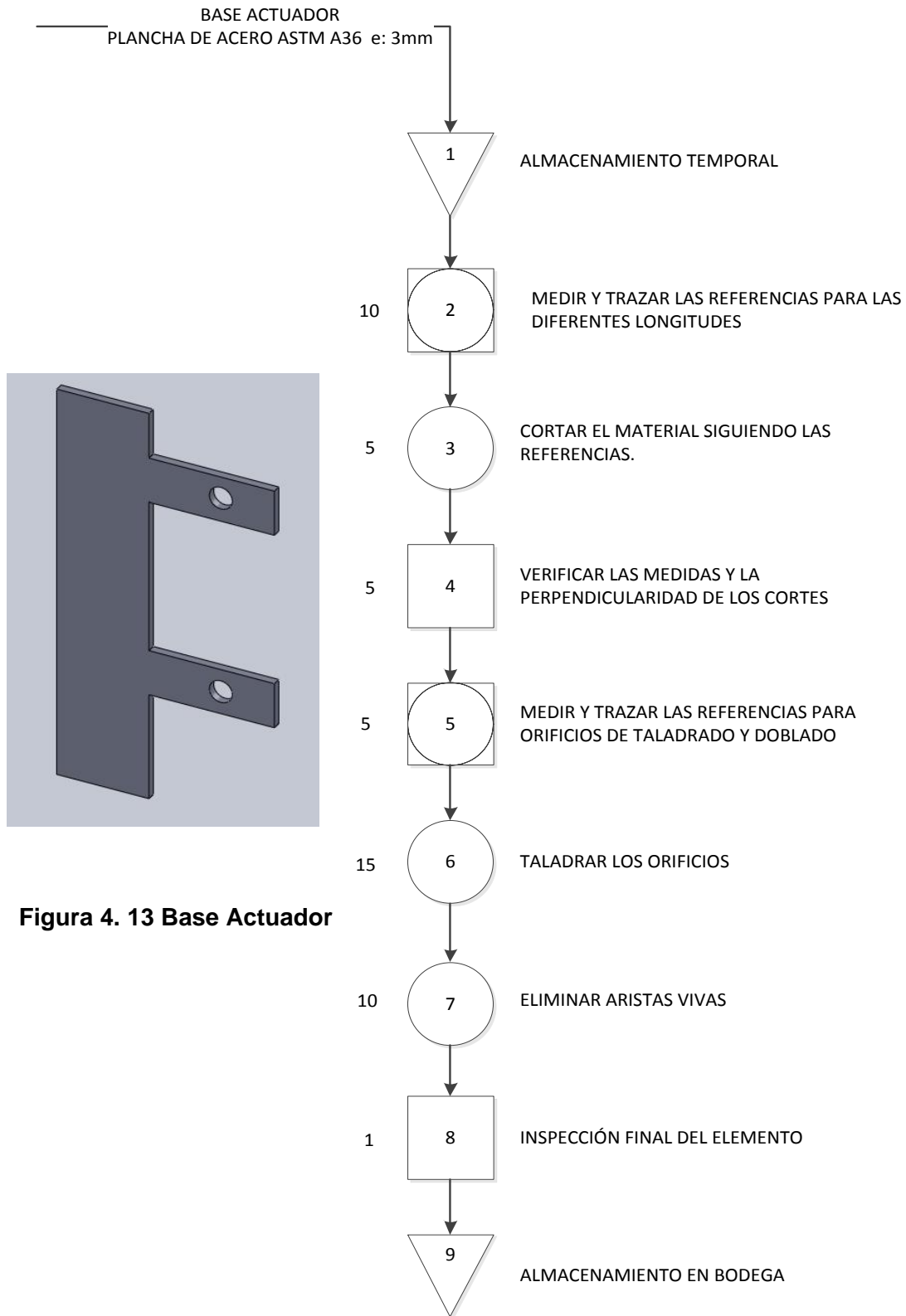


Figura 4. 13 Base Actuator

4.1.14 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE DEL DISTRIBUIDOR DE AIRE

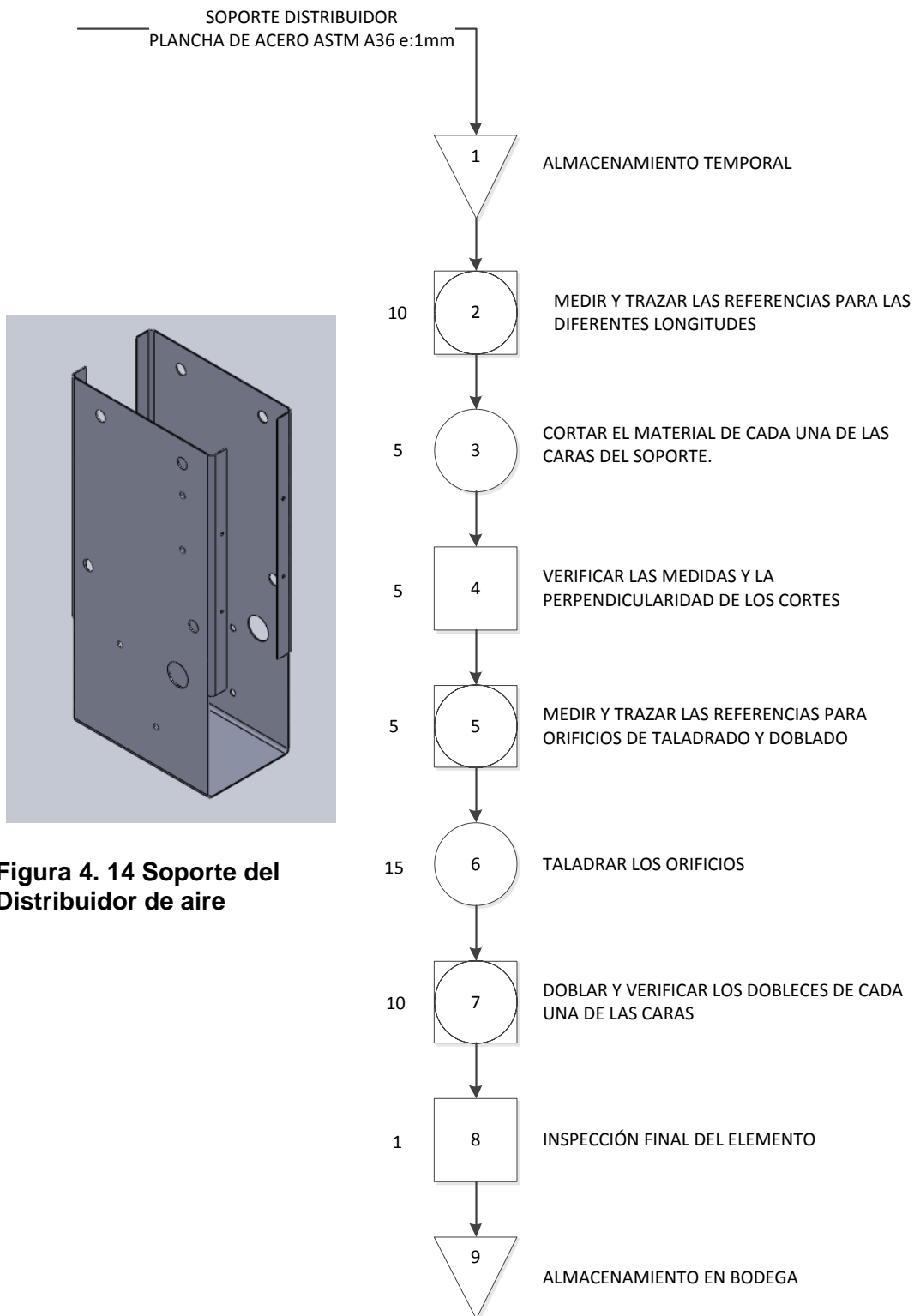


Figura 4. 14 Soporte del Distribuidor de aire

4.1.15 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE VERTICAL DEL DISTRIBUIDOR

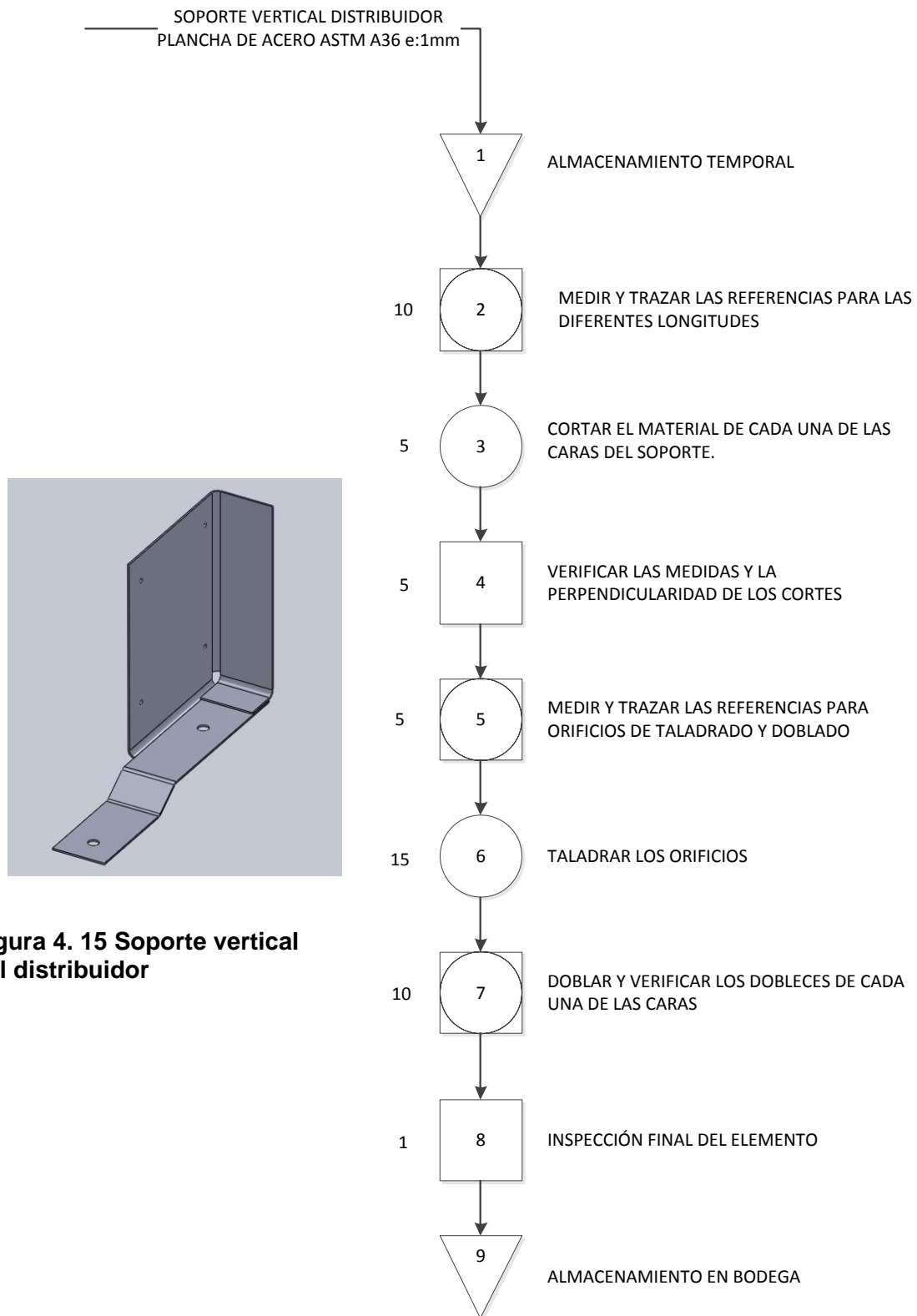


Figura 4. 15 Soporte vertical del distribuidor

4.1.16 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SUJETADOR DE VÁLVULA

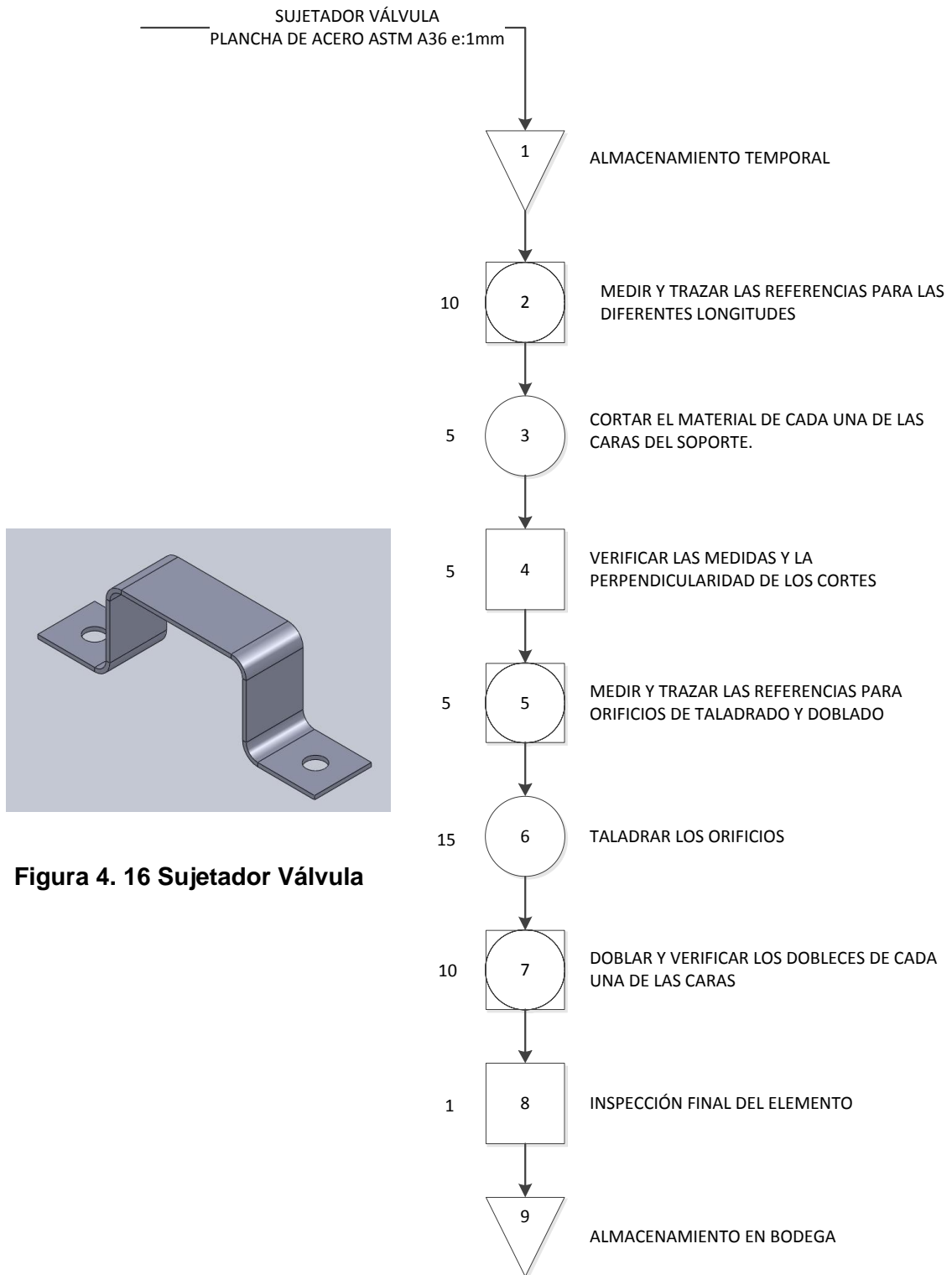
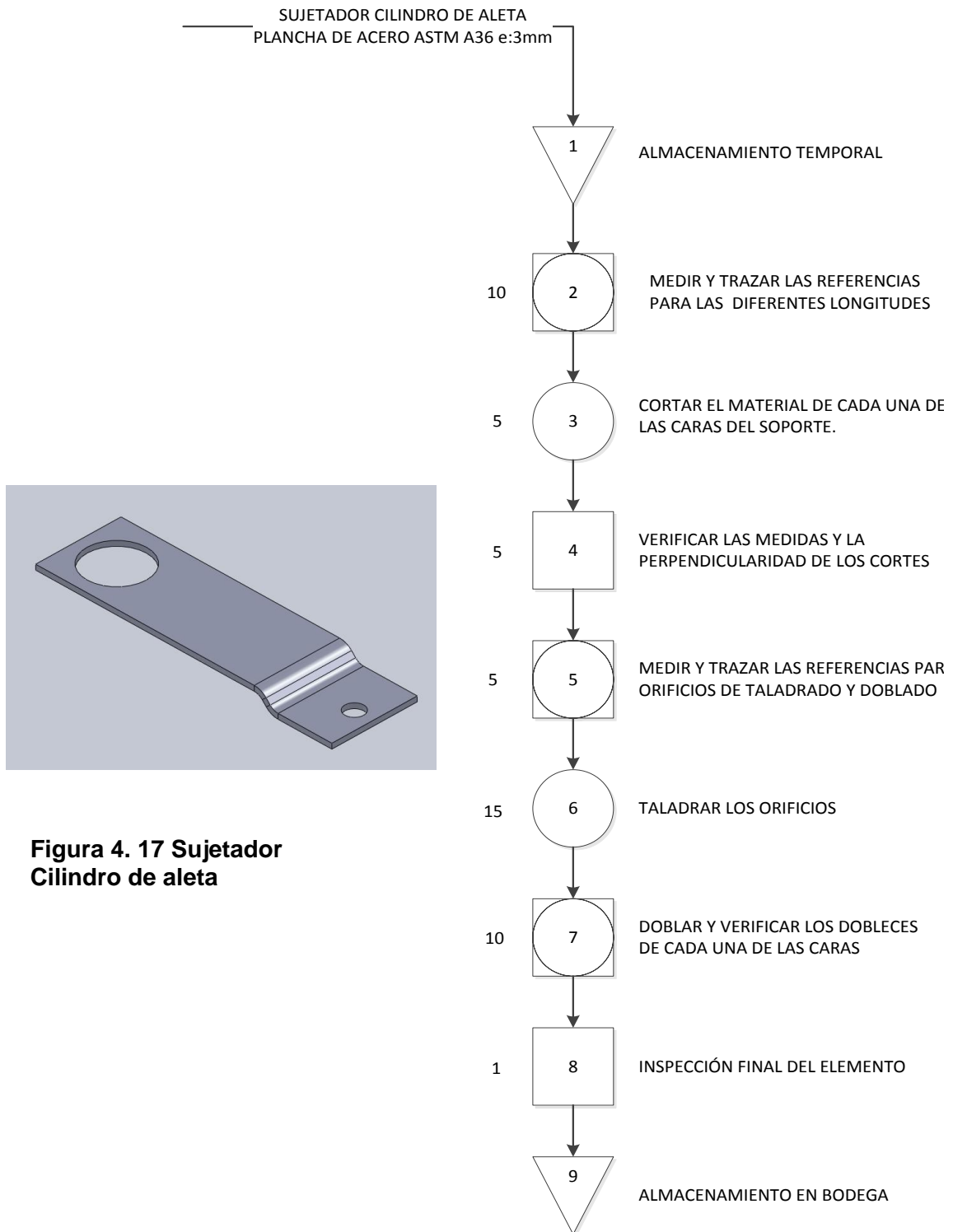


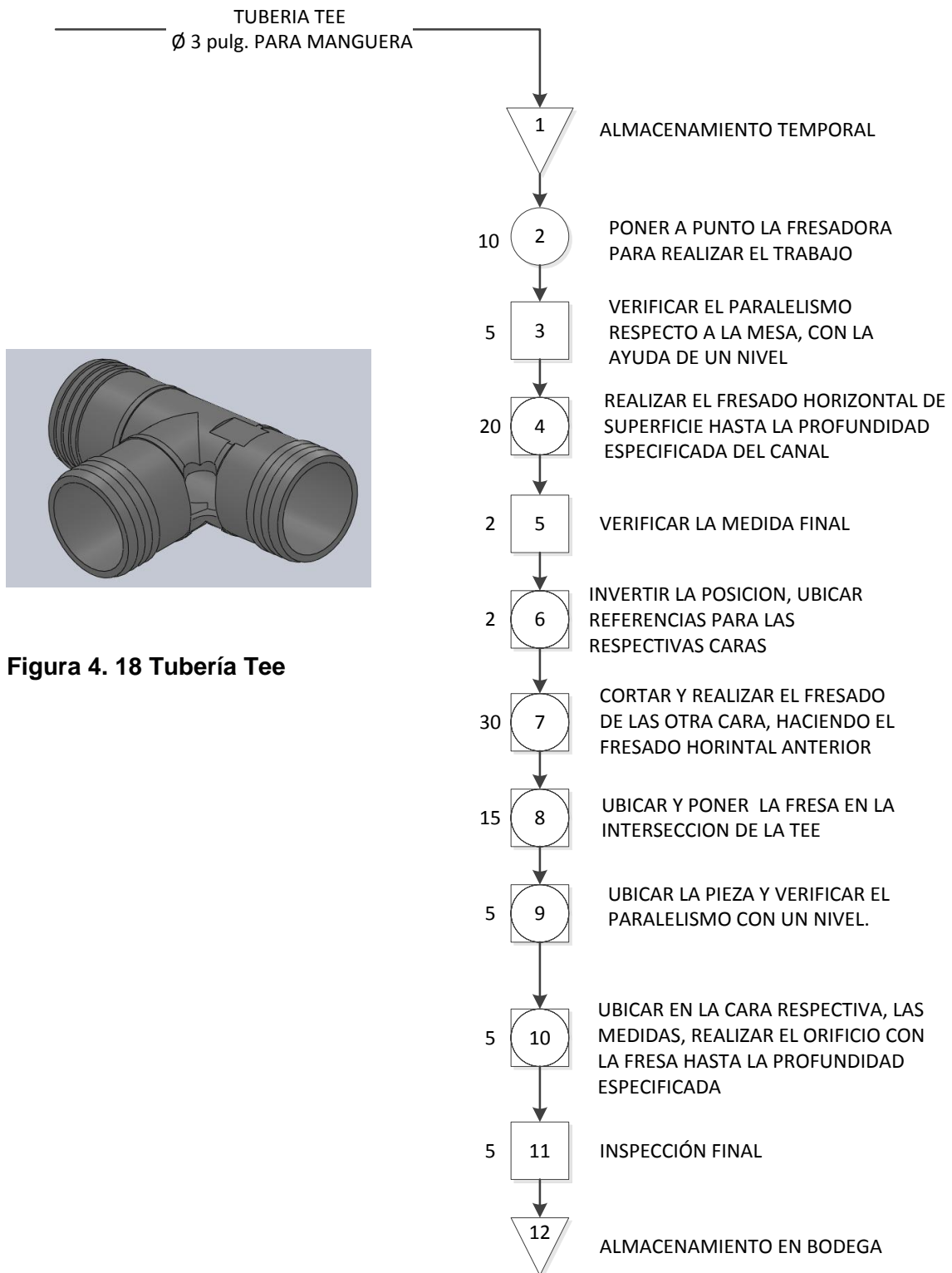
Figura 4. 16 Sujetador Válvula

4.1.17 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SUJETADOR DE CILINDRO DE ALETA



**Figura 4. 17 Sujetador
Cilindro de aleta**

4.1.18 PASOS DE MODIFICACIÓN A LA TUBERÍA TEE



4.1.19 PASOS DE FABRICACIÓN DEL EJE PARA RODAMIENTO

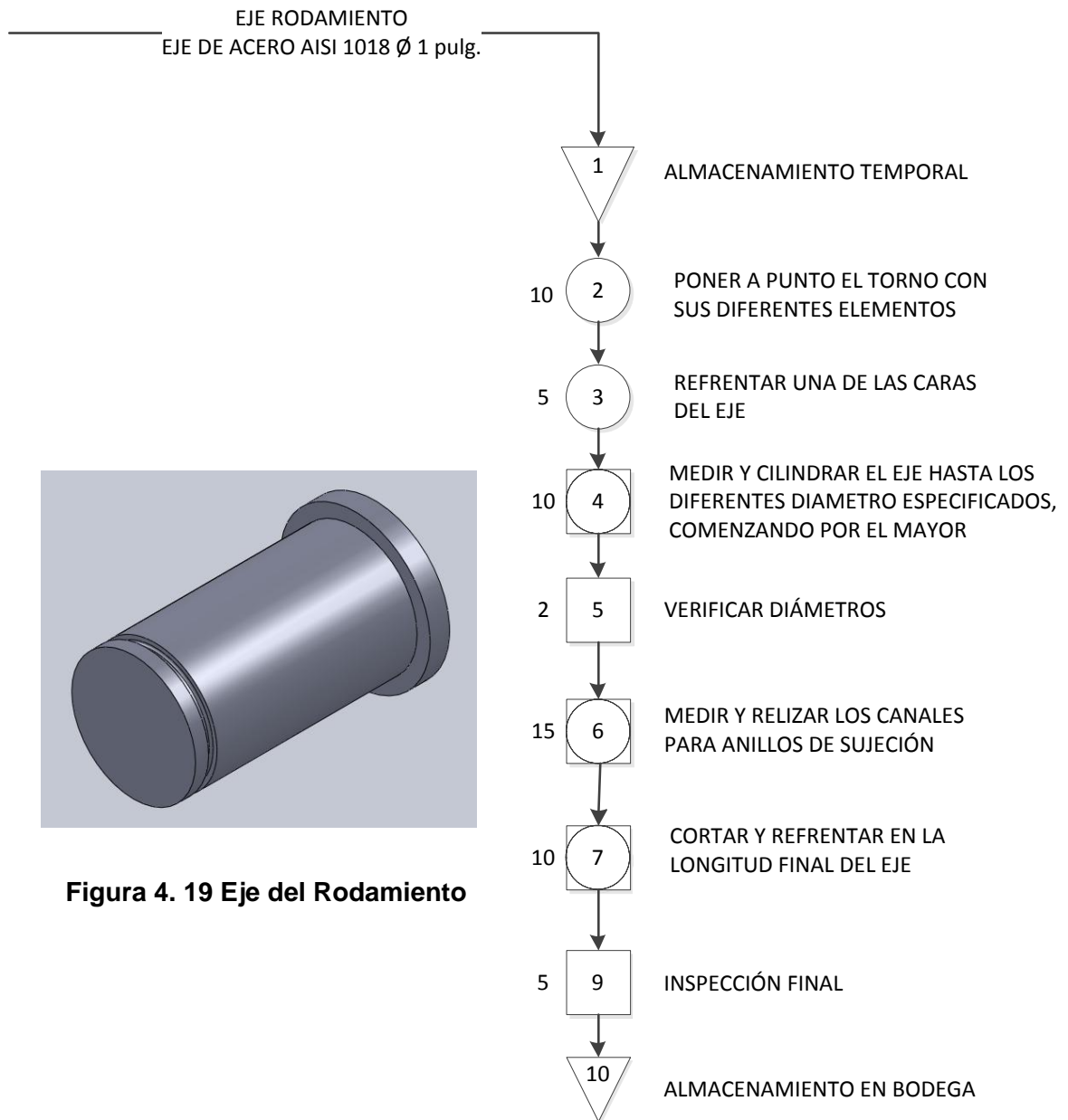


Figura 4. 19 Eje del Rodamiento

4.1.20 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE PARA RODAMIENTO

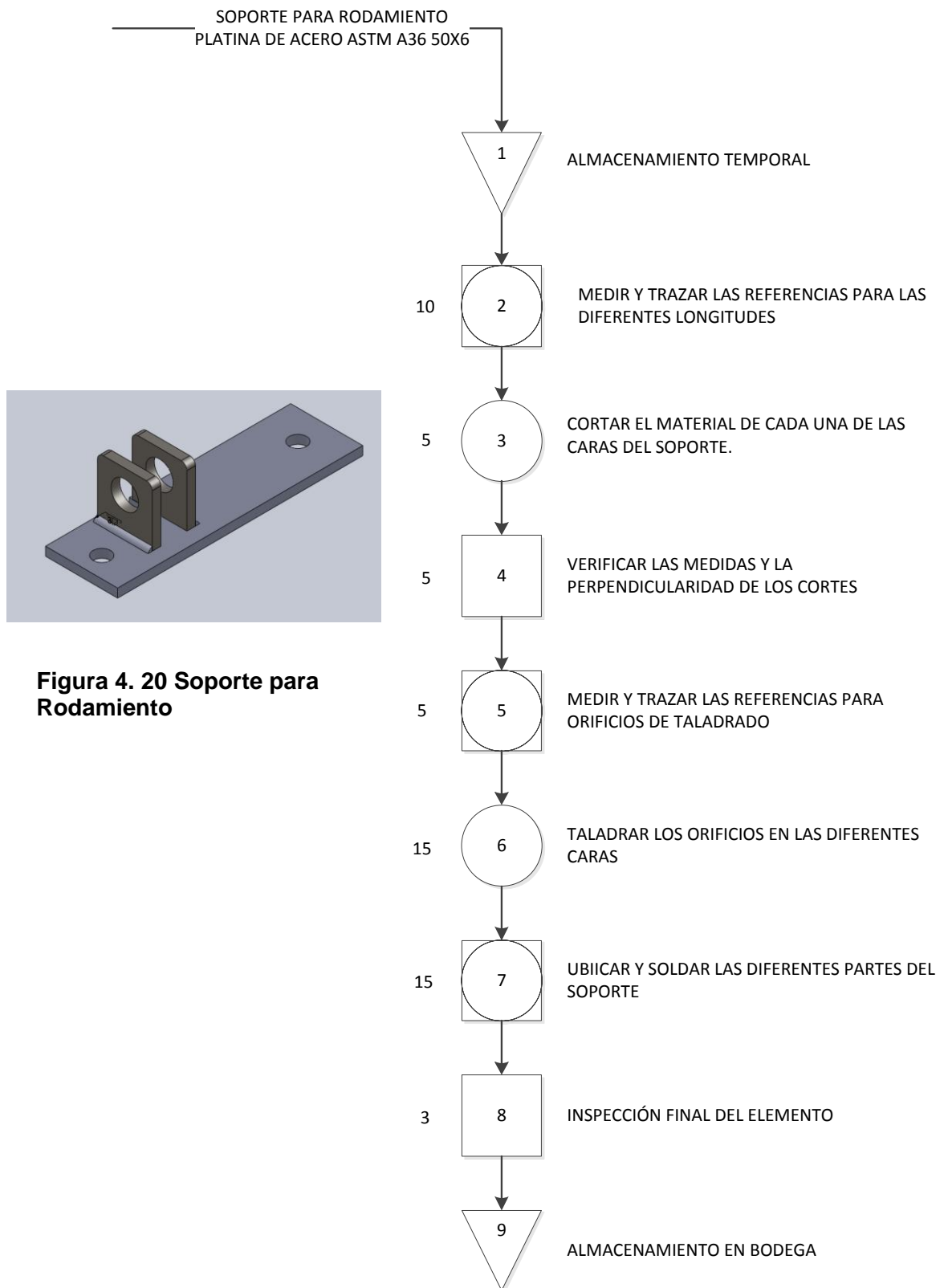


Figura 4. 20 Soporte para Rodamiento

4.1.21 PASOS DE FABRICACIÓN DEL BOCÍN PARA RESORTE

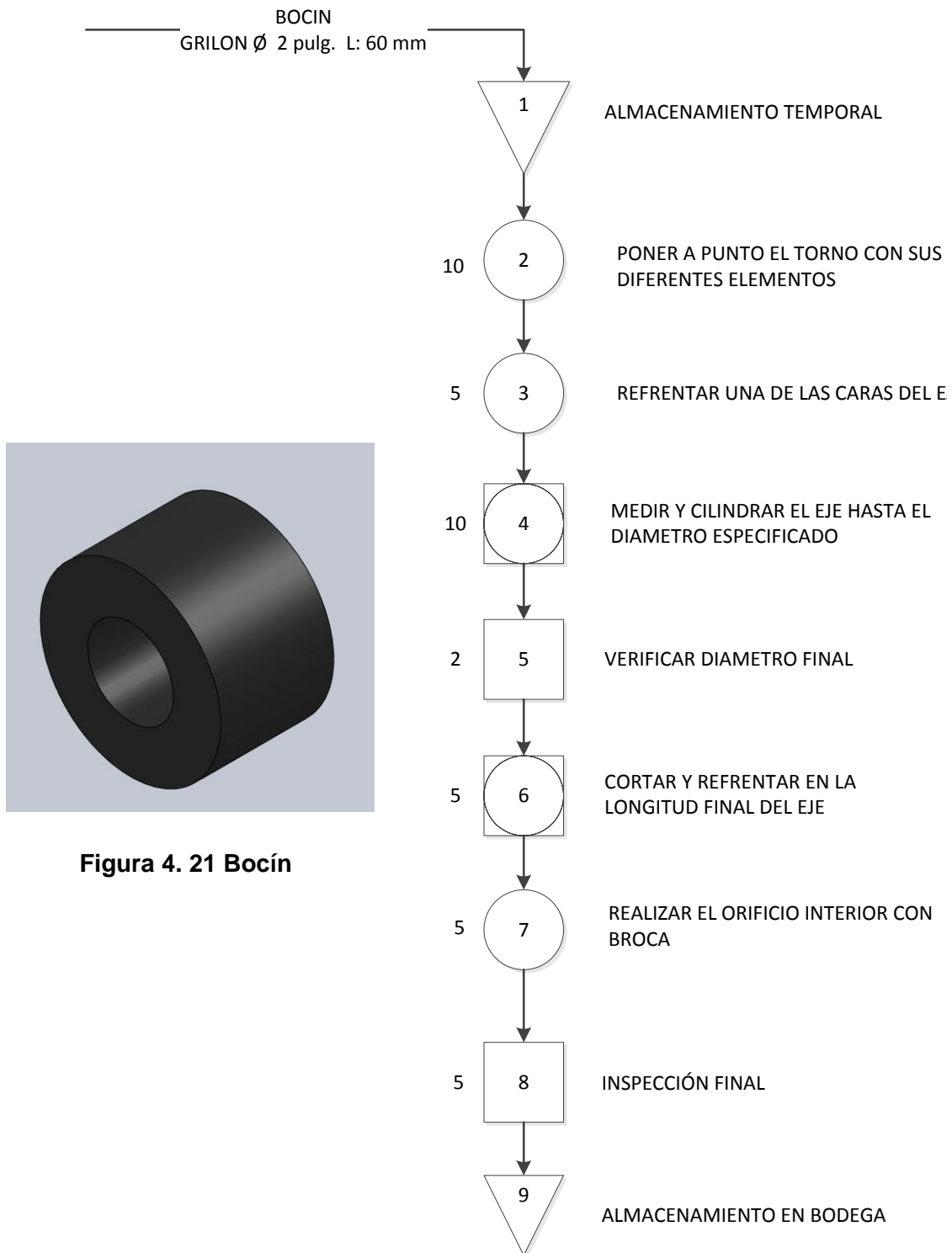


Figura 4. 21 Bocín

4.1.22 PASOS DE FABRICACIÓN DEL BRAZO TENSOR

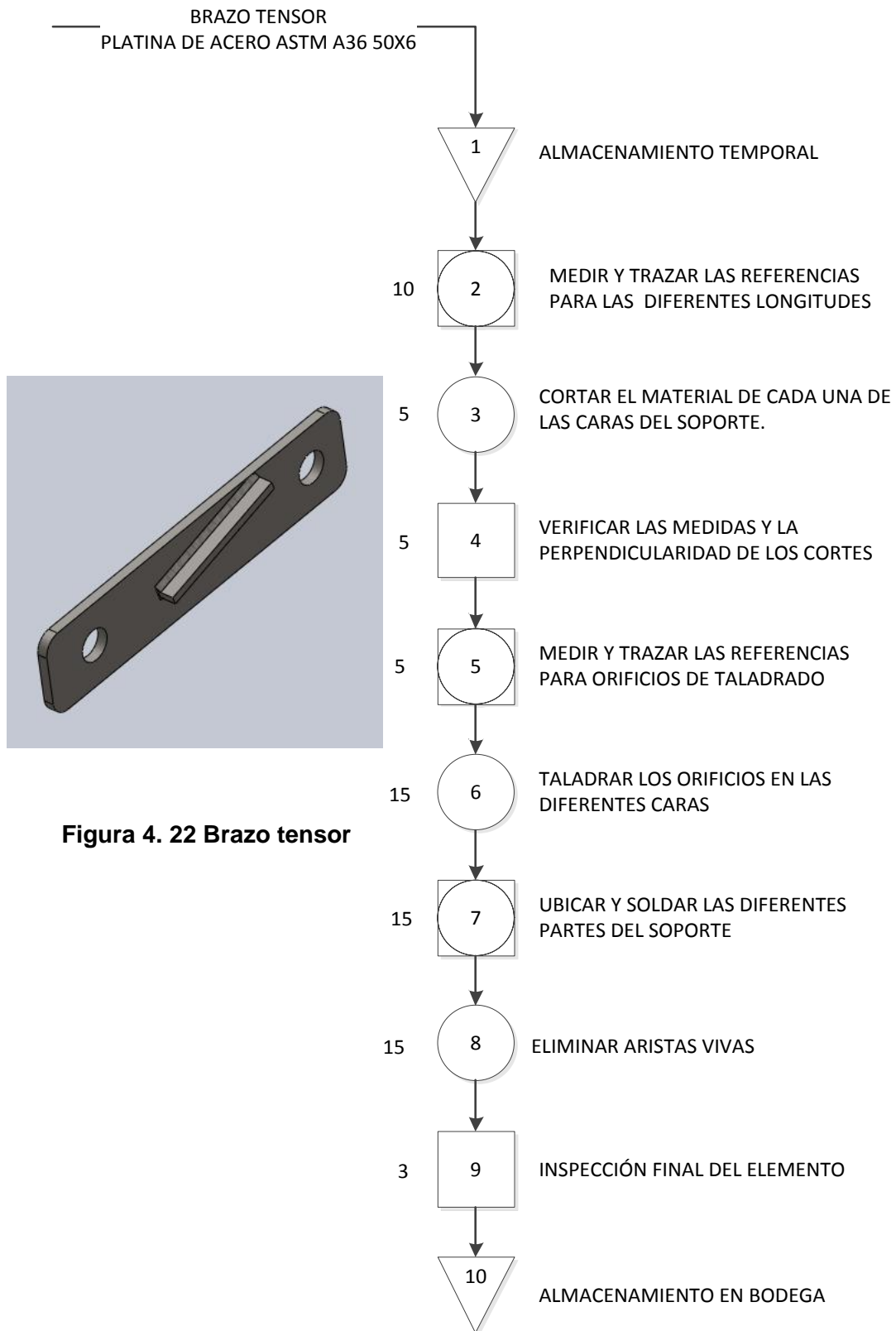


Figura 4. 22 Brazo tensor

4.1.23 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE DEL TENSOR.

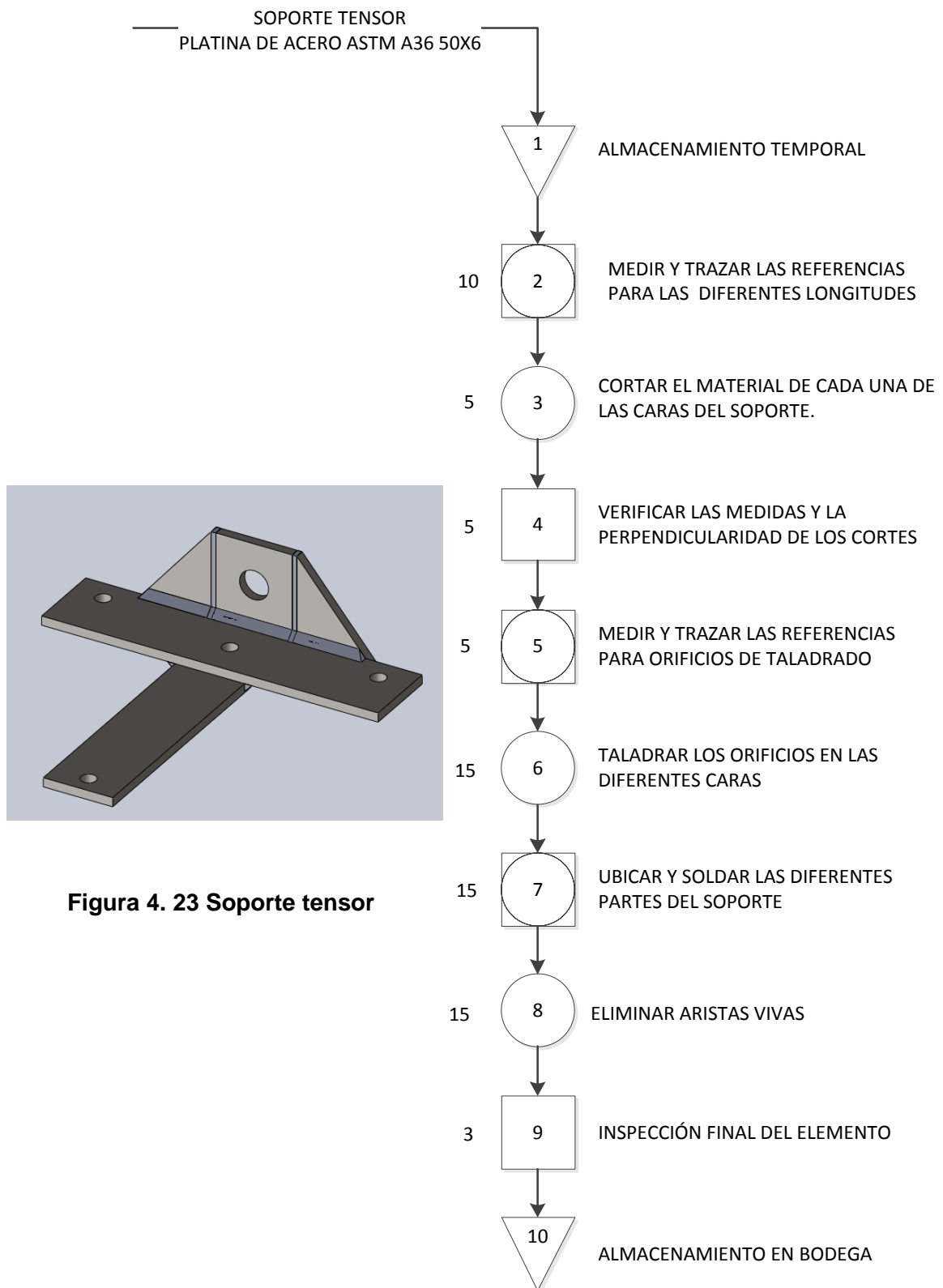


Figura 4. 23 Soporte tensor

4.1.24 PASOS DE FABRICACIÓN DEL EJE DEL TENSOR

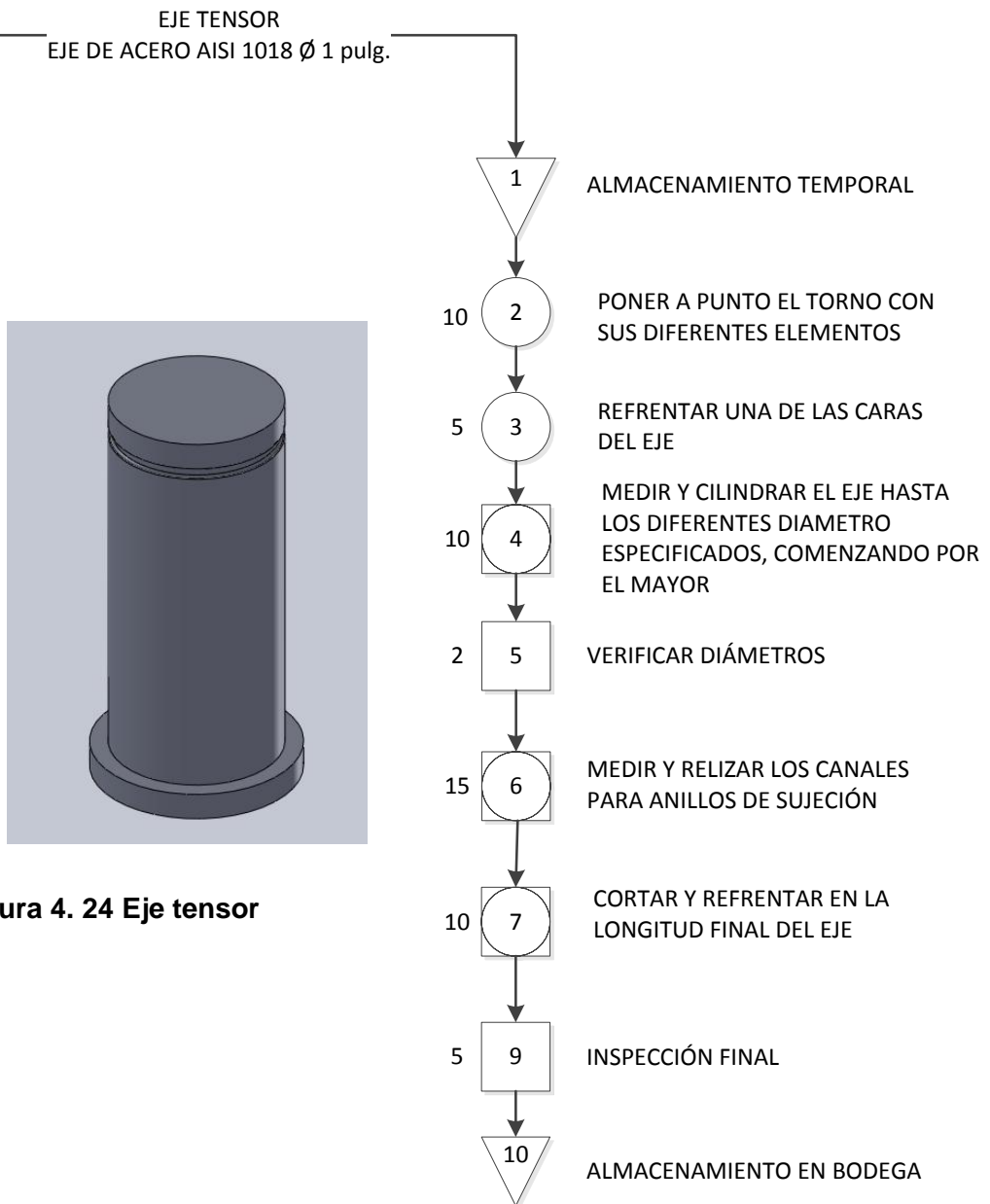


Figura 4. 24 Eje tensor

4.1.25 PASOS DE FABRICACIÓN DEL EJE DE LA POLEA DEL TENSOR

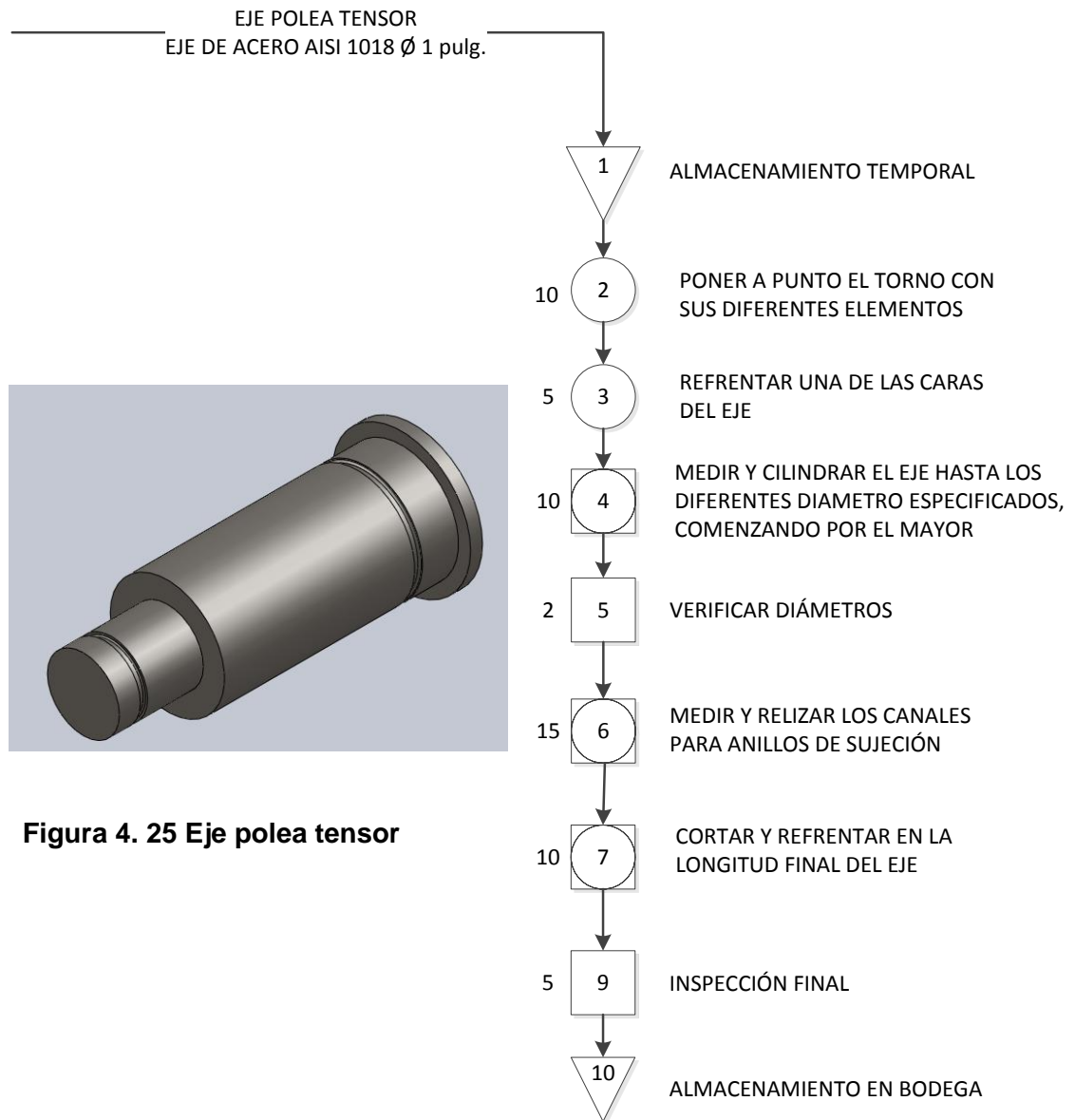


Figura 4. 25 Eje polea tensor

4.1.26 PASOS DE FABRICACIÓN DEL BOCÍN PARA EMBRAGUE

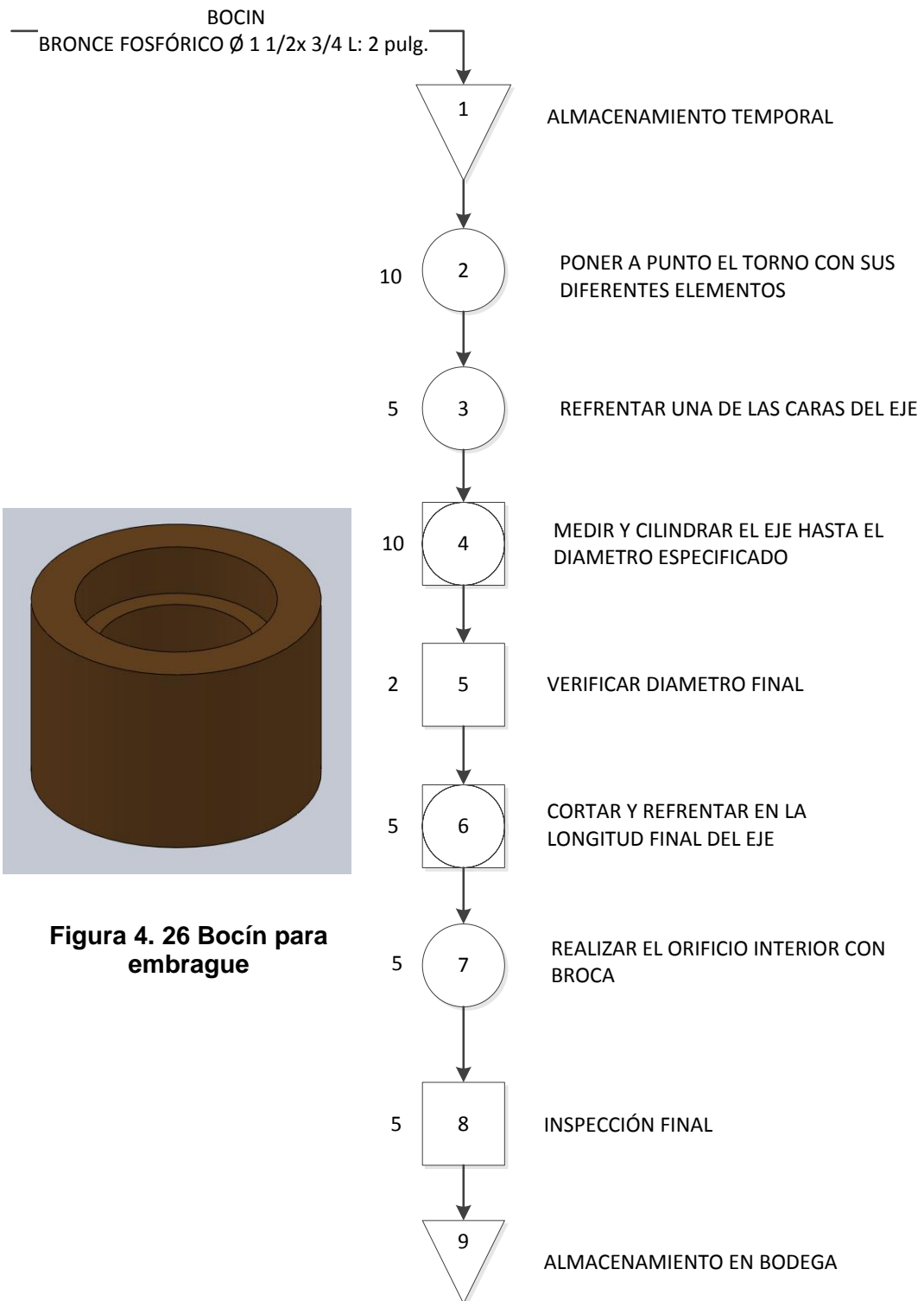


Figura 4. 26 Bocín para embrague

4.1.27 PASOS DE FABRICACIÓN DEL SOPORTE PARA EMBRAGUE

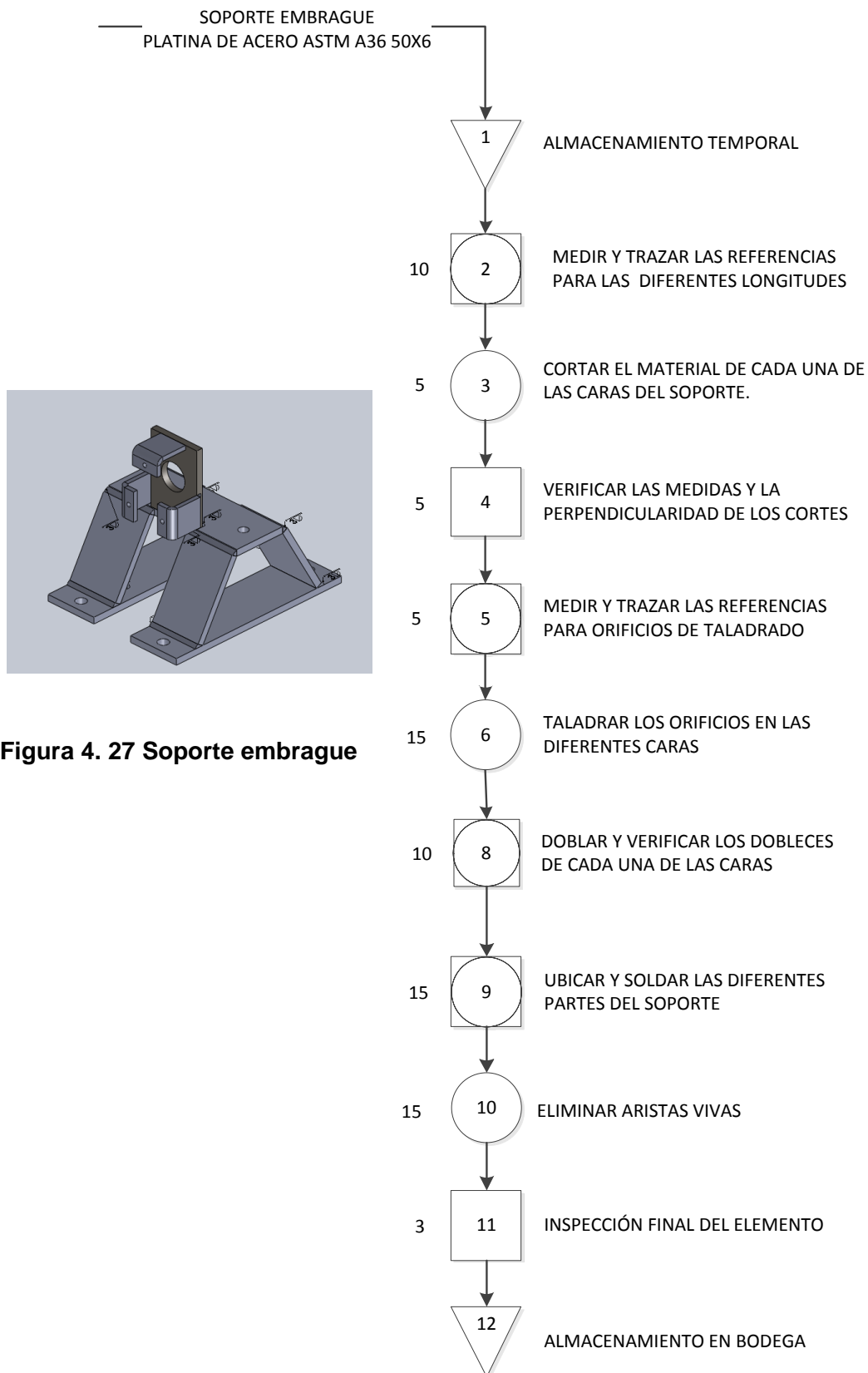


Figura 4. 27 Soporte embrague

4.1.28 PASOS DE FABRICACIÓN DE LA FLECHA SECUNDARIA

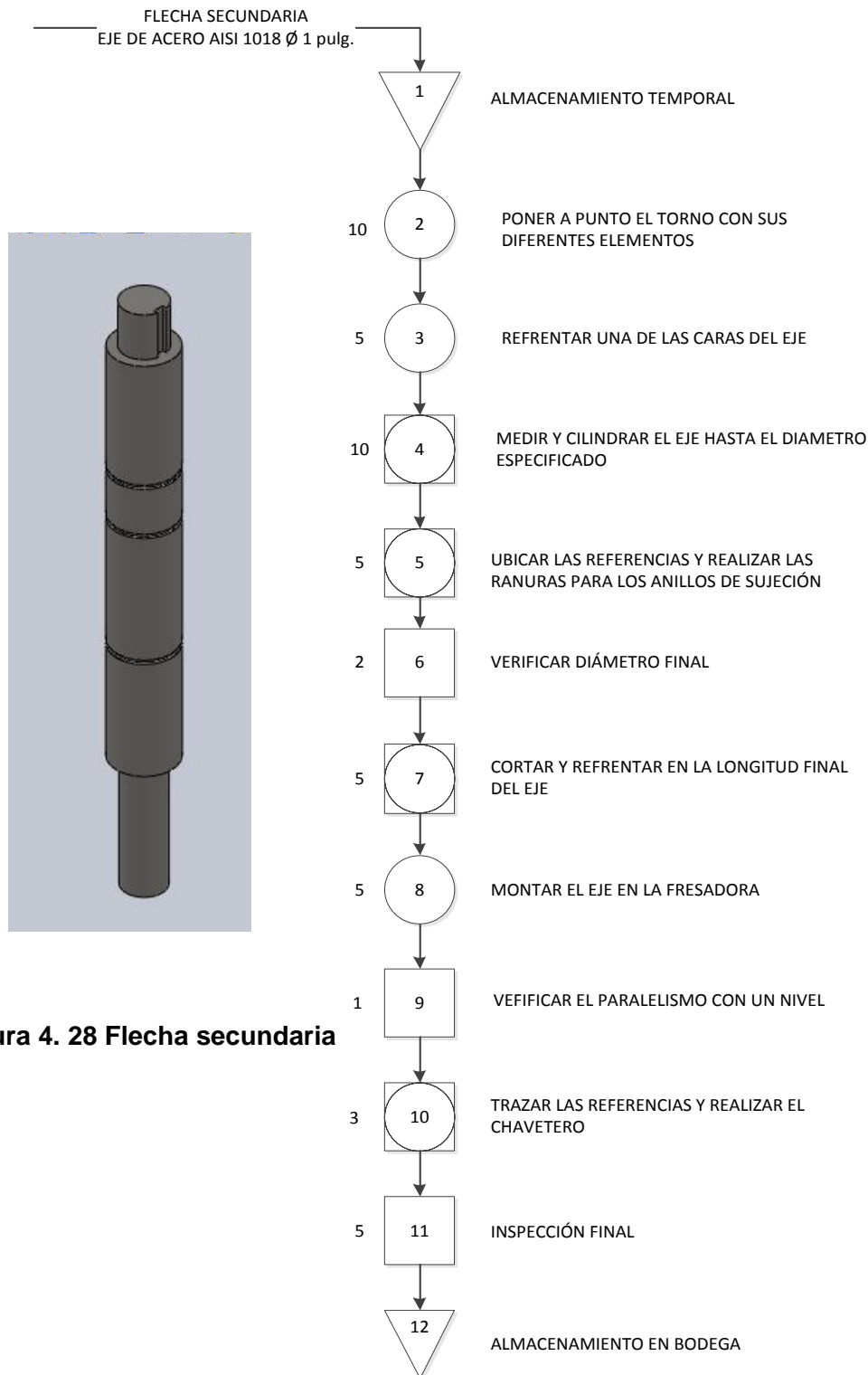


Figura 4. 28 Flecha secundaria

4.2 ELABORACIÓN DE LOS PLANOS DE MONTAJE

Para realizar el montaje del sistema del prototipo, se considera la construcción previa de las diferentes piezas y la selección de otros elementos como son:

Elementos Normalizados.

- Arandelas planas.
- Arandelas de presión.
- Tornillos.
- Pernos.
- Tuercas.
- Bandas.
- Uniones, sellos, llaves de paso para tubería de cobre

Elementos Seleccionados.

- Rodamientos
- Chumaceras.
- Poleas.
- Electro embrague
- Grupo Compresor (cabezal y tanque de almacenamiento)
- Cilindro simple efecto
- Válvulas
- Filtro de aire
- Mangueras
- Cañerías

Para realizar el montaje del prototipo se considera la construcción previa de los soportes, ejes, y demás elementos; teniendo en cuenta las especificaciones establecidas en los planos de construcción.

Seguir las especificaciones establecidas en los planos de taller y diagrama de procesos comprobando en cada uno de los pasos las dimensiones, perpendicularidad, paralelismo y estabilidad.

Los planos de montaje se encuentran en el ANEXO H

4.3 MONTAJE SISTEMA DE AIRE COMPRIMIDO

El sistema consta de tanto el sistema de transmisión que tiene como origen en la llanta posterior izquierda del automóvil, hasta el tanque de almacenamiento.

- Perforar los diferentes orificios en el maletero del automóvil siguiendo las especificaciones establecidas en los planos de montaje donde se encuentra las medidas implantadas.
- Realizar el corte del orificio, por el cual pasara la banda desde la polea inferior hasta el embrague.
- Colocar el soporte inferior, el soporte del embrague, el compresor y el tanque de almacenamiento siguiendo los planos explosionados de los diferentes conjuntos.
- Realizar el anclaje de estos elementos mediante la utilización de pernos de sujeción.
- Verificar la alineación de las poleas
- Ubicar el tensor en la posición de trabajo
- Verificar la tensión de las bandas
- Conectar la cañería de salida del compresor junto con las llaves de paso como muestra el plano neumático.
- Conectar las manqueras, filtro de aire, válvulas, reguladores en el orden que muestra el plano neumático.

4.4 SISTEMA DE INTERCAMBIO DE ALIMENTACIÓN ATMOSFÉRICA Y SOBREALIMENTACIÓN

El sistema de intercambio de alimentación hacia el motor será ubicado en el lugar donde originalmente se encontraba el filtro de aire.

- Realizar el montaje del conjunto siguiendo el plano explosionado del sistema de intercambio de alimentación al motor.
- Empernar el soporte vertical al los pernos de la carrocería.
- Ubicar en el extremo el filtro de aire.
- Asegurar con abrazaderas el filtro de aire
- El otro extremo de la tee, conectarla con la manguera de 3 pulgadas.
- Asegurar la manguera con abrazaderas, tanto a la tee como a la entrada del carburador.

4.5 MONTAJE E INSTALACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO

El sistema eléctrico contará con un panel pequeño de interruptores ubicado el lado derecho del conductor.

- Por facilidad se ubicara la placa de contactos sobre el soporte del compresor, anclándolo mediante pernos
- Ubicar los relés en la placa de contactos y los diferentes grupos de cables que conforman el circuito eléctrico según los planos.

Los planos tanto eléctricos como neumáticos se encuentran en el ANEXO I

CAPITULO 5

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

5.1 DISEÑO DEL PLAN DE PRUEBAS.

Para la evaluación del desempeño del sistema de recuperación de energía y del sistema de sobrealimentación se ha diseñado un plan de pruebas en el que se definen los parámetros a medir y a calcular, los instrumentos y equipos que se utilizarán y en el que se establecen los procedimientos a seguir.

5.1.1 PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

El desempeño del sistema de recuperación de energía se evalúa determinando su eficacia y su eficiencia, las que se definen a continuación:

Eficacia del Sistema de Recuperación de Energía (ϵ_r). Es igual a la variación de presión desde una presión P_i [psi] hasta una presión P_f [psi] ($P_f - P_i = \Delta p$) en un tiempo t_r [s], a una velocidad V_v [m/s] del vehículo. Se analiza la gráfica de variación ϵ_r , respecto a V_v con la finalidad de observar su tendencia.

$$\epsilon_r = \frac{\Delta p}{t_r} \quad [\text{psi/s}]$$

Ec. 5. 1

Eficiencia del sistema (η_r). Viene dada por la relación entre la potencia neumática P_n [W] y la potencia de entrada al eje primario del sistema de recuperación P_e [W].

$$\eta_r = \frac{P_n}{P_e} * 100 \quad [\%] \quad \text{Ec. 5. 2}$$

Potencia neumática (P_n). Es la variación de energía neumática en el tanque del compresor respecto al tiempo; se determina con las presiones manométricas p_2 y p_1 [Pa] y el volumen v [m³] respecto al tiempo t [s].

$$P_n = v \frac{p_2 - p_1}{t} \quad [\text{W}] \quad \text{Ec. 5. 3}$$

Siendo $p_2 > p_1$

Potencia de entrada (P_e). Es la potencia que entra al eje primario del sistema de recuperación de energía y es una fracción de la potencia total del vehículo P [W].

$$P_e = k * P \quad [\text{W}] \quad \text{Ec. 5. 4}$$

Donde k es la fracción de potencia

$$P = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} \quad [\text{W}] \quad \text{Ec. 5. 5}$$

Fracción de la potencia (k). Está definida por la relación entre la potencia que absorbe el sistema de recuperación P_{fr} [W] y la potencia máxima con el sistema de recuperación apagado P_{fa} [W].

Este factor es adimensional.

$$k = \frac{P_{fr}}{P_{fa}} \quad \text{Ec. 5. 6}$$

Potencia del sistema de recuperación (Pfr). Es la potencia que utiliza el sistema de recuperación de energía cinética para funcionar. Está definida por la diferencia entre la potencia máxima del vehículo con el sistema de recuperación apagado Pf_a [hp] y la potencia máxima con el sistema de recuperación encendido Pfe [hp].

$$Pfr = Pf_a - Pfe \quad [\text{hp}] \quad \text{Ec. 5. 7}$$

5.1.2 PRUEBAS PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN.

De igual manera que con el sistema de recuperación, el desempeño del sistema de sobrealimentación se evalúa determinando su eficacia y su eficiencia.

Eficacia del sistema de sobrealimentación. (ϵ_s). Se evalúa a través de la variación de la potencia máxima y la variación del consumo específico de combustible del vehículo con el sistema de sobrealimentación apagado y encendido respectivamente.

Desigualdades:

$$P_{f_{se}} > 1,3 P_{f_{sa}}, \text{ Sistema eficaz.} \quad \text{Des. 5. 1}$$

$$P_{f_{se}} \leq 1,3 P_{f_{sa}}, \text{ Sistema no es eficaz.} \quad \text{Des. 5. 2}$$

$$CEC_e < 0,9 CEC_a, \text{ Sistema eficaz.} \quad \text{Des. 5. 3}$$

$$CEC_e \geq 0.9 CEC_a, \text{ Sistema no es eficaz.} \quad \text{Des. 5. 4}$$

El sistema de sobrealimentación se considera eficaz cuando compensa la pérdida de desempeño que sufre el motor debido a la altura (Aproximadamente a 2800 m.s.n.m existe una pérdida de potencia del 30% y un aumento del 10% en el CEC), durante 6 segundos (tiempo mínimo para realizar un adelantamiento)¹⁸

Pf_{se} [hp]. Es la Potencia máxima con el sistema de sobrealimentación encendido.

Pf_{sa} [hp]. Es la Potencia máxima con el sistema de sobrealimentación apagado y es igual a la Potencia máxima con el sistema de recuperación apagado Pf_a .

CEC_e [g/KWh] ¹⁹. Es el Consumo específico de combustible con el sistema de sobrealimentación encendido.

$$CEC_e = \frac{CC_e}{Pf_{se}} \quad \text{Ec. 5. 8}$$

CC_e [m³/s]. Es el consumo de combustible con el sistema de sobrealimentación encendido en función del tiempo te (s).

$$CC_e = \frac{V_{ci} - V_{cfe}}{te} \quad \text{Ec. 5. 9}$$

Donde V_{ci} es el volumen en el reservorio de combustible inicial (m³), y V_{cfe} es el volumen en el reservorio de combustible final (sistema de sobrealimentación encendido) (m³).

¹⁸ A criterio de los investigadores: en condiciones de carretera asfaltada, terreno plano, a una velocidad promedio de 80 km/h, el adelantamiento a un auto tipo sedan, de dimensiones similares al vehículo de prueba.

¹⁹ Para transformar de [m³/hp s] a [g/KWh] se multiplica por el factor 3.264×10^9

CEC_a [g/KWh] ¹⁹. Es el Consumo específico de combustible con el sistema de sobrealimentación apagado.

$$CEC_a = \frac{CC_a}{P_{fa}} \quad \text{Ec. 5. 10}$$

CC_a [m³/s]. Es el consumo de combustible con el sistema de sobrealimentación apagado en función del tiempo t_a .

$$CC_a = \frac{V_{ci} - V_{cfa}}{t_a} \quad \text{Ec. 5. 11}$$

Donde V_{ci} es el volumen en el reservorio de combustible inicial [m³], y V_{cfa} es el volumen en el reservorio de combustible final (sistema de sobrealimentación apagado) [m³].

Adicionalmente se realizará una prueba para determinar el caudal que requiere el motor y el caudal que entrega el sistema de sobrealimentación. De esta manera podremos determinar si el aire que entrega el sistema es suficiente para cumplir con su objetivo.

Eficiencia del sistema de sobrealimentación (η_s). Viene dada por la relación entre la presión de salida del tanque p_t [Pa], y la presión de entrada al intercambiador de aire p_y [Pa].

$$\eta_s = \frac{p_y}{p_t} * 100 \quad \text{Ec. 5. 12}$$

En la tabla 5.1 se muestran las pruebas a realizarse con sus respectivos parámetros para la determinación de la eficacia y la eficiencia de los dos sistemas.

| | EFICACIA | | EFICIENCIA |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA | $\eta_r = \frac{P_r}{P_e} \times 100$ | | $\eta_r = \frac{P_r}{P_e} \times 100$ |
| | Prueba de recuperación de energía | | Prueba de Almacenamiento de energía neumática |
| SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN | <i>Comparación entre P_{fse} con P_{fsa} y CECe con CECa</i> | <i>Comparación entre Q_N y Q_s</i> | $\eta_r = \frac{P_r}{P_e} \times 100$ |
| | Prueba de potencia máxima y consumo de combustible | Prueba de Caudal | Prueba de Presión |

Tabla 5. 1 Determinación de la eficacia y eficiencia de los sistemas.

5.1.3 PRUEBAS A REALIZARSE.

A continuación se definen las pruebas para obtener los parámetros que permitan evaluar el desempeño de los dos sistemas

Consideraciones.

Se realizan 10 mediciones para el cálculo de incertidumbre. Véase *análisis de incertidumbre*.

Se toman las respectivas medidas de seguridad, como colocación de triángulos de advertencia en la vía, luces de parqueo y señales manuales.

5.1.3.1 Prueba de potencia máxima y consumo de combustible

Con esta prueba se determina:

Pf_r : Potencia que absorbe el Sistema de Recuperación.

Pf_a : Potencia con el sistema de recuperación apagado.

Pf_e : Potencia con el sistema de recuperación encendido.

k : Fracción de potencia

Pf_{se} : Potencia con el sistema de sobrealimentación encendido.

Pf_{sa} : Potencia con el sistema de sobrealimentación apagado

CEC_e : Consumo específico de combustible con el sistema de sobrealimentación encendido.

CEC_a : Consumo específico de combustible con el sistema de sobrealimentación apagado.

PROTOCOLO DE PRUEBA

PARÁMETROS A MEDIR: Potencia máxima: [hp]

Volumen de combustible: [ml]

Tiempo: [s]

El equipo mide la potencia máxima del vehículo que se utiliza para definir los parámetros de las ecuaciones 5.4, 5.6, 5.7, 5.8 y 5.10. La prueba se realiza tanto con el sistema de recuperación encendido y con el sistema apagado; en ambos casos el sistema de sobrealimentación se mantiene apagado.

El parámetro k se lo utiliza en la prueba de almacenamiento de energía neumática.

Se hace la prueba con el sistema de sobrealimentación encendido manteniendo el sistema de recuperación apagado.

Se mide el consumo de combustible con el sistema de sobrealimentación encendido y apagado.

.Velocidad inicial: 0 km/h

INSTRUMENTOS NECESARIOS

Se cuenta con un acelerómetro y es utilizado para medir el la potencia del vehículo con el sistema de recuperación encendido y apagado. Se muestra en la siguiente página

| INSTRUMENTOS | ALCANCE | APRECIACIÓN | USO |
|---------------------|----------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Acelerómetro | 500 hp | 1 hp | Determinación de la potencia máxima (VER ANEXOS) |
| Cronómetro | | 0.2 s | Medición del tiempo en las pruebas de frenado, energía neumática y recuperación de energía |
| Recipiente Graduado | 500 ml | 10 ml | Medición de volumen de combustible |

Tabla 5. 2 Instrumentos para prueba de Potencia máxima y Consumo de combustible.

PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE POTENCIA MÁXIMA.

- Ubicar el vehículo al inicio de la ruta establecida para la prueba.
- Instalar el reservorio auxiliar para medición de combustible.
- Llenar el reservorio auxiliar con combustible hasta la marca.
- Conectar el acelerómetro a la toma de 12 V en la cabina e instalarlo en el parabrisas.
- Encender el acelerómetro y ubicar el selector en “HP”.
- Ingresar el peso del vehículo incluido el peso de los ocupantes.
- Nivelar el equipo siguiendo los procedimientos indicados en el manual de usuario.
- Encender el vehículo y esperar a la señal de “Go” del equipo.
- Empezar a acelerar y activar el cronómetro al mismo tiempo.
- Cambiar de marchas llegando a la línea roja en el tacómetro del vehículo.
- Para obtener la medición de potencia, desacelere hasta detenerse
- Detener el cronómetro
- Apagar el motor.
- Observar en la pantalla del equipo el valor intermitente de potencia máxima y registrarlo.
- Medir el volumen de combustible final.
- Tabular datos.

FORMATO PARA RECOPIACIÓN DE DATOS

| PRUEBA DE POTENCIA MÁXIMA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE | | | |
|----------------------------------------------------|--|------------------------|--|
| Fecha: | | Altitud (m.s.n.m) | |
| Volumen inicial combustible [ml] | | Temp Ambiental [°C] | |
| Masa del automóvil [kg] | | Condiciones climáticas | |
| Velocidad [m/s] | | | |

| SISTEMA DE RECUPERACIÓN APAGADO | | | |
|-----------------------------------|---------------|--------|-----------------------------------|
| SISTEMA SOBREALIMENTACIÓN APAGADO | | | |
| No | Potencia [hp] | ta [s] | Volumen final de combustible [ml] |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| Promedio | | | |

| SISTEMA DE RECUPERACIÓN ENCENDIDO | |
|--------------------------------------|---------------|
| SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN APAGADO | |
| No | Potencia [hp] |
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |
| 6 | |
| 7 | |
| 8 | |
| 9 | |
| 10 | |
| Promedio | |

| SISTEMA DE RECUPERACIÓN APAGADO | | | |
|-------------------------------------|---------------|-------|---------------------------------|
| SISTEMA SOBREALIMENTACIÓN ENCENDIDO | | | |
| No | Potencia [hp] | te[s] | Nivel final de combustible [ml] |
| 1 | | | |
| 2 | | | |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| Promedio | | | |

| Resultados | |
|--------------|--|
| Pfa [hp] | |
| Pfe [hp] | |
| Pfr [hp] | |
| k | |
| Pfse [hp] | |
| Pfsa [hp] | |
| CECe [g/kWh] | |
| CECa [g/kWh] | |

5.1.3.2 Prueba de caudal

Con esta prueba se determina:

Q_N : Caudal de aire que consume el motor en aspiración natural.

Q_S : Caudal de aire que entrega el sistema de sobrealimentación.

PROTOCOLO DE PRUEBA

PARÁMETROS A MEDIR: Velocidad del aire: [m/s]

Midiendo la velocidad del flujo de aire y teniendo el diámetro de la tubería por la cual fluye, se puede obtener el caudal de aire que circula.

Se obtiene el caudal de aire que aspira el motor del vehículo a diferente velocidad de giro (a 2000, 2500, 3000, 3500 y 4000 rpm) y luego se compara con el caudal que entrega el sistema de sobrealimentación.

Si el caudal del sistema de sobrealimentación es menor que el que requiere el motor, entonces el sistema no es eficaz.

INSTRUMENTOS NECESARIOS

Se utiliza un anemómetro que mide la velocidad del flujo de aire.

| INSTRUMENTOS | ALCANCE | APRECIACIÓN | USO |
|---------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| Anemómetro | 35 m/s | 0.1 m/s | Determinación de la velocidad de flujo de aire |
| Tacómetro | 7000 rpm | 100 rpm | Determinación de la velocidad de giro del motor |

Tabla 5. 3 Instrumentos para prueba de Caudal

PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE CAUDAL.

- Verificar que la presión en el tanque de almacenamiento sea de 120 psi.
- Ubicar el vehículo en el lugar designado para la prueba (prueba con el vehículo estacionado).
- Desmontar el depurador de aire del motor.
- Encender el vehículo.
- Ubicar el anemómetro en la manguera de entrada.
- Acelerar el motor del vehículo hasta 2000 rpm y mantener estable.
- Medir la velocidad de flujo y registrar los datos.
- Repetir el procedimiento para 2500, 3000, 3500 y 4000 rpm.
- Apagar el vehículo.
- Ubicar el anemómetro en la salida del sistema de sobrealimentación.
- Abrir la válvula de paso del sistema de sobrealimentación.
- Medir la velocidad de flujo y registrar los datos.

FORMATO PARA RECOPIACIÓN DE DATOS

| DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIANTE LA COMPRESIÓN DE AIRE PARA SOBREALIMENTACIÓN DE UN MOTOR | | | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| DATOS PRUEBA DE CAUDAL | | | | | | | |
| Fecha: | | Alt (m.s.n.m) | | | | | |
| Volumen del tanque [l] | | T (°C) | | | | | |
| Diámetro de entrada [m] | | C.Clim | | | | | |
| | Velocidad del aire (m/s) | | | | | | |
| RPM | S.sobreali | 200 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 7 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | |
| Velocidad media [m/s] | | | | | | | |
| Resultados | | | | | | | |
| | Q_s [m^3/s] | Q_N [m^3/s] | | | | | |
| Caudal [m^3/s] | | | | | | | |
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | |

5.1.3.3 Prueba de presión en el sistema de sobrealimentación.

Con esta prueba se obtiene

p_t : Presión de salida del tanque.

p_y : Presión de entrada al intercambiador de aire

η_s : Eficiencia del sistema de sobrealimentación.

PROTOCOLO DE PRUEBA

PARÁMETROS A MEDIR: Presión [psi]

INSTRUMENTOS NECESARIOS

| INSTRUMENTOS | ALCANCE | APRECIACIÓN | USO |
|---------------------|----------------|--------------------|------------------------------|
| Manómetro | 250 psi | 5 psi | Medición de la presión p_t |
| Manómetro | 15 psi | 0.5 psi | Medición de la presión p_y |

Tabla 5. 4 Instrumentos para prueba de presión en el sistema de sobrealimentación

PROCEDIMIENTO PARA LA PRUEBA DE PRESIÓN.

- Estacionar el vehículo.
- Conectar los manómetros a la salida del tanque a la entrada del intercambiador de aire.
- Abrir la válvula de paso del tanque.
- Medir la presión p_y
- Medir la presión p_t
- Tabular datos.

FORMATO PARA RECOPIACIÓN DE DATOS

| DATOS PRUEBA DE PÉRDIDA DE PRESION | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|---------------|----|----|
| Fecha: | | Alt (m.s.n.m) | | |
| Masa del automovil [Kg] | | T (°C) | | |
| Presión en en tanque [psi] | | C.Clim | | |
| Py[psi] | Pt [psi] | | | |
| No | 40 | 30 | 20 | 10 |
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |
| 5 | | | | |
| 6 | | | | |
| 7 | | | | |
| 8 | | | | |
| 9 | | | | |
| 10 | | | | |
| Py media | | | | |
| Resultados | | | | |
| η_s (%) | | | | |
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita | | | |
| Observaciones: | | | | |

5.1.3.4 Prueba de recuperación de energía.

Permite obtener la variación de presión por unidad de tiempo en el tanque de almacenamiento, en función de la velocidad del vehículo.

En esta prueba se mide el tiempo que tarda en aumentar la presión en el tanque, desde una presión inicial P_i hasta una presión final P_f a diferentes velocidades. Con esta prueba determinaremos la eficacia del sistema de recuperación de energía, obteniendo la gráfica $\Delta p/tr$ vs V_v

Protocolo de pruebas

Las velocidades para la toma de datos serán desde 40 km/h, con un aumento de 5 km/h hasta los 60 km/h²⁰

Parámetros a medir: Tiempo [s]

La presión en el tanque varía en el tiempo cuando el vehículo tiene una velocidad diferente de cero (0).

Tiempo de estabilización de la velocidad inicial al inicio de la prueba: 5 segundos.

p_i : 50 psi.

p_f : 60 psi.

Velocidades constantes de: 40, 45, 50, 55 y 60 km/h

²⁰ Velocidades consideradas seguras conforme al lugar de realización de las pruebas y al criterio de los investigadores

INSTRUMENTOS NECESARIOS

| INSTRUMENTO | ALCANCE | APRECIACIÓN | USO |
|-------------|----------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cronómetro | | 0.2 s | Medición del tiempo en las pruebas de frenado, energía neumática y recuperación de energía |
| Manómetro | 250 psi | 5 psi | Medición de la presión en la prueba de energía neumática y recuperación de energía |
| Velocímetro | 210 km/h | 5km/h | Control de la velocidad en todas las pruebas |

Tabla 5. 5 Instrumentos para prueba de recuperación de energía.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

- Encender el motor
- Verificar que el cronómetro se encuentre en 0.
- Verificar que la presión en el tanque de almacenamiento se encuentre en 50 psi.
- Acelerar hasta alcanzar una velocidad de 40 km/h.
- Mantener la velocidad constante a 40 km/h.
- Encender el sistema de recuperación de manera permanente²¹ y arrancar el cronómetro simultáneamente.
- Esperar hasta que la presión llegue hasta 60 psi y parar el cronómetro.
- Apagar el sistema de recuperación
- Detener el vehículo
- Apagar el motor
- Tabular datos obtenidos
- Repetir el procedimiento para las diferentes velocidades especificadas en la prueba (45, 50, 55, 60 Km/h).

²¹ El sistema cuenta con un interruptor que permite comprimir aire de manera permanente, independientemente de si el conductor presiona el pedal de freno.

FORMATO PARA RECOPIACIÓN DE DATOS

| PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|----|----|----|
| Fecha: | | Altitud (m.s.n.m) | | | |
| Masa del automóvil [kg] | | Temp Ambiental (°C) | | | |
| pi (psi) | | Δp (psi) | | | |
| pf (psi) | | | | | |
| Velocidad inicial [km/h] | | Condiciones climáticas | | | |
| Tiempo [s] | VELOCIDAD [km/h] | | | | |
| Test No | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |
| 6 | | | | | |
| 7 | | | | | |
| 8 | | | | | |
| 9 | | | | | |
| 10 | | | | | |
| Resultados | | | | | |
| tr [s] | | | | | |
| εr [psi/s] | | | | | |
| Vv [m/s] | | | | | |
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita | | | | |
| Observaciones: | | | | | |

5.1.3.5 Prueba de almacenamiento de energía neumática

Con esta prueba se determina:

P_n : La potencia neumática

P_e : La potencia de entrada al sistema de recuperación.

η_r : Eficiencia del sistema de recuperación.

Protocolo de pruebas

Parámetros a medir: Tiempo [s]

Se mide el tiempo que tarda en aumentar la presión en el tanque, desde una presión inicial p_1 hasta una presión final p_2 a una determinada velocidad del vehículo.

Se usa como referencia la ecuación 5.3 de potencia neumática y la ecuación 5.4 de la potencia total del vehículo. Con el automóvil a una velocidad constante determinada, se enciende el sistema de recuperación de energía, se toma el tiempo que tarda el sistema en llegar desde una presión inicial hasta una presión final.

Tiempo de estabilización de la velocidad inicial al inicio de la prueba: 5 seg

p_1 : 60 psi

p_2 : 80 psi

Velocidad constante: 50 km/h. ²²

Volumen inicial de combustible: 1000 cc

²² Velocidad considerada por los investigadores como una velocidad segura y prudente para el desarrollo de la prueba

INSTRUMENTOS NECESARIOS

| INSTRUMENTO | ALCANCE | APRECIACIÓN | USO |
|-------------|----------|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cronómetro | | 0.2 s | Medición del tiempo en las pruebas de frenado, energía neumática y recuperación de energía |
| Manómetro. | 250 psi | 5 psi | Medición de la presión en la prueba de energía neumática y recuperación de energía |
| Velocímetro | 210 km/h | 5km/h | Control de la velocidad en todas las pruebas |

Tabla 5. 6 Instrumentos para prueba de Almacenamiento de energía neumática.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PRUEBA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA NEUMÁTICA

- Ubicar el vehículo al inicio de la ruta establecida para la prueba.
- Verificar que el cronómetro se encuentre en 0.

- Verificar que la presión en el tanque de almacenamiento se encuentre en 60 psi.
- Acelerar hasta alcanzar una velocidad de 50 km/h.
- Mantener la velocidad constante a 50 km/h.
- Encender el interruptor del sistema de recuperación en modo permanente y arrancar el cronómetro simultáneamente.
- Esperar hasta que la presión llegue hasta 80 psi y parar el cronómetro.
- Apagar el sistema de recuperación
- Detener el vehículo
- Apagar el motor
- Tabular datos obtenidos

FORMATO PARA RECOPIACIÓN DE DATOS

| DATOS PRUEBA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA NEUMÁTICA | | | |
|------------------------------------------------------------|--|-------------------------------|--|
| p1 [psi] | | Temp Ambiental (°C) | |
| p2 [psi] | | Condiciones climáticas | |
| Volumen reservorio [m3] | | | |
| Velocidad [km/h] | | | |
| Masa del vehículo [kg] | | | |
| k | | | |

| Test No | Tiempo [s] |
|-------------------------------|-------------------|
| 1 | |
| 2 | |
| 3 | |
| 4 | |
| 5 | |
| 6 | |
| 7 | |
| 8 | |
| 9 | |
| 10 | |
| | |
| | |
| | |
| Presión inicial (Pa) | |
| Presión final (Pa) | |
| | |
| Resultados | |
| Tiempo medio [s] | |
| P [kW] | |
| Pe[kW] | |
| Pn [kW] | |
| η_r[%] | |

| | |
|-----------------------|--|
| Realizado por: | |
|-----------------------|--|

| | |
|-----------------------|--|
| Observaciones: | |
|-----------------------|--|

5.1.4 EQUIPO A UTILIZAR

Sistema de recuperación

Compresor:

| Característica | Descripción |
|-------------------------------|--------------------|
| MARCA | Schulz |
| MODELO | CSI 7,4/25 |
| ETAPAS | 1 |
| PRESION MAX. | 140 psi |
| VOLUMEN DEL RESERVORIO | 125 Litros |
| PRESIÓN MAXIMA | 140 psi |

Tabla 5. 7 Especificaciones del Compresor²³

²³ Compresor seleccionado en el Capítulo 3

5.1.5 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS Y RESULTADOS

| DATOS PRUEBA DE POTENCIA MÁXIMA Y CONSUMO DE COMBUSTIBLE | | | |
|----------------------------------------------------------|------------|------------------------|-----------|
| Fecha: | 17/09/2011 | Altitud (m.s.n.m) | 2260 |
| Volumen inicial combustible [ml] | 500 | Temp Ambiental [°C] | 25 |
| Masa del automóvil [kg] | 1094 | Condiciones climáticas | Despejado |
| Velocidad [m/s] | 13,89 | | |

| SISTEMA DE RECUPERACIÓN ENCENDIDO | |
|--------------------------------------|---------------|
| SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN APAGADO | |
| No | Potencia [hp] |
| 1 | 45 |
| 2 | 42 |
| 3 | 42 |
| 4 | 43 |
| 5 | 44 |
| 6 | 45 |
| 7 | 45 |
| 8 | 42 |
| 9 | 43 |
| 10 | 43 |
| Promedio | 43,40 |

| SISTEMA DE RECUPERACIÓN APAGADO | | | |
|-----------------------------------|---------------|--------------|-----------------------------------|
| SISTEMA SOBREALIMENTACIÓN APAGADO | | | |
| No | Potencia [hp] | ta [s] | Volumen final de combustible [ml] |
| 1 | 48 | 45 | 260 |
| 2 | 46 | 44,2 | 250 |
| 3 | 48 | 41,9 | 240 |
| 4 | 47 | 45,4 | 230 |
| 5 | 46 | 44,6 | 220 |
| 6 | 46 | 44,3 | 260 |
| 7 | 48 | 44,7 | 250 |
| 8 | 48 | 45 | 240 |
| 9 | 47 | 44,2 | 230 |
| 10 | 48 | 44,8 | 220 |
| Promedio | 47,20 | 44,41 | 240,00 |

| SISTEMA DE RECUPERACIÓN APAGADO | | | |
|--------------------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------------------|
| SISTEMA SOBREALIMENTACIÓN ENCENDIDO | | | |
| No | Potencia [hp] | Tiempo [s] | Volumen final de combustible [ml] |
| 1 | 49 | 45 | 230 |
| 2 | 49 | 44,2 | 240 |
| 3 | 46 | 41,9 | 220 |
| 4 | 47 | 45,4 | 250 |
| 5 | 47 | 44,6 | 250 |
| 6 | 48 | 44,3 | 240 |
| 7 | 49 | 44,7 | 240 |
| 8 | 48 | 45 | 220 |
| 9 | 49 | 44,2 | 250 |
| 10 | 49 | 44,8 | 210 |
| Promedio | 48,10 | 44,41 | 235,00 |

| Resultados | | Error |
|---------------------|---------------|--------------|
| Pfa[hp] | 47,20 | 1,74 |
| Pfe[hp] | 43,40 | 1,36 |
| Pfr[hp] | 3,80 | |
| k | 0,08 | |
| Pfse[hp] | 48,10 | 1,94 |
| Pfsa [hp] | 47,20 | 1,74 |
| CECe [g/kWh] | 407,09 | 20,54 |
| CECa [g/kWh] | 407,03 | 21,36 |

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita |
|-----------------------|----------------------------|

| | |
|----------------------|--|
| Observaciones | |
|----------------------|--|

| DATOS PRUEBA DE CAUDAL | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fecha: | 07/07/2012 | Alt (m.s.n.m) | 2260 | | | | |
| Volumen del tanque [l] | 25 | T (°C) | 25 | | | | |
| Diámetro de entrada [m] | 0,0762 | C.Clim | Despejado | | | | |
| Velocidad del aire (m/s) | | | | | | | |
| RPM | S.sobrealim | 2000 | 2500 | 3000 | 3500 | 4000 | 4500 |
| 1 | 5,30 | 4,18 | 4,80 | 5,81 | 6,75 | 7,89 | 10,13 |
| 2 | 5,40 | 4,13 | 4,85 | 5,76 | 6,86 | 7,81 | 9,95 |
| 3 | 5,31 | 4,09 | 4,76 | 5,80 | 6,68 | 7,75 | 10,10 |
| 4 | 5,24 | 4,16 | 4,65 | 5,70 | 6,77 | 7,82 | 10,16 |
| 5 | 5,43 | 4,05 | 4,86 | 5,75 | 6,80 | 7,90 | 10,05 |
| 6 | 5,34 | 4,15 | 4,74 | 5,79 | 6,82 | 7,80 | 10,10 |
| 7 | 5,41 | 4,10 | 4,84 | 5,80 | 6,75 | 7,85 | 10,14 |
| 8 | 5,37 | 4,12 | 4,78 | 5,76 | 6,84 | 7,88 | 10,06 |
| 9 | 5,26 | 4,13 | 4,72 | 5,75 | 6,70 | 7,78 | 10,12 |
| 10 | 5,38 | 4,08 | 4,82 | 5,72 | 6,72 | 7,86 | 10,03 |
| Velocidad media [m/s] | 5,34 | 4,12 | 4,78 | 5,76 | 6,77 | 7,83 | 10,08 |
| Resultados | | | | | | | |
| | <i>Q_s [m3/s]</i> | <i>Q_N [m3/s]</i> | | | | | |
| Caudal [m3/s] | 0,024 | 0,019 | 0,022 | 0,026 | 0,031 | 0,036 | 0,046 |
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita | | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | | |

| DATOS PRUEBA DE PERDIDA DE PRESION | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Fecha: | 07/07/2012 | | Alt (m.s.n.m) | 2260 |
| Masa del automovil [Kg] | 1094 | | T (°C) | 25 |
| Presión en en tanque [psi] | 120 | | C.Clim | Despejado |
| Py[psi] | Pt [psi] | | | |
| No | 40 | 30 | 20 | 10 |
| 1 | 6 | 5 | 3,5 | 2,5 |
| 2 | 5,5 | 5 | 3,5 | 2,5 |
| 3 | 6 | 5 | 3,5 | 2,5 |
| 4 | 6 | 5 | 3,5 | 2,5 |
| 5 | 6 | 5 | 3 | 2,5 |
| 6 | 5,5 | 5 | 3 | 2,5 |
| 7 | 5,5 | 4,5 | 3 | 2,5 |
| 8 | 6 | 5 | 3,5 | 2,5 |
| 9 | 6 | 5 | 3,5 | 2,5 |
| 10 | 6 | 4,5 | 3,5 | 2,5 |
| Py media | 5,85 | 4,90 | 3,35 | 2,50 |
| Resultados | | | | |
| ηs (%) | 14,63% | 16,33% | 16,75% | 25,00% |
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita | | | |
| observaciones: | | | | |

| PRUEBA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------------|-------|------------------------|-----------|-------|--|
| Fecha: | 17/09/2011 | | Altitud (m.s.n.m) | 2260 | | |
| Masa del automóvil [Kg] | 1094 | | Temp Ambiental [°C] | 25 | | |
| pi [psi] | 50 | | Δp [psi] | 10 | | |
| pf [psi] | 60 | | | | | |
| Velocidad inicial [Km/h] | 100 | | Condiciones climáticas | despejado | | |
| Tiempo [s] | VELOCIDAD [km/h] | | | | | |
| Test no | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | |
| 1 | 28,8 | 22 | 18,3 | 16,8 | 14,3 | |
| 2 | 27,5 | 21,4 | 17,2 | 14,4 | 13,8 | |
| 3 | 29,2 | 22,2 | 16,7 | 15,3 | 13,8 | |
| 4 | 28,8 | 21,8 | 18,5 | 15,2 | 13 | |
| 5 | 27,2 | 21 | 17,9 | 15,6 | 13 | |
| 6 | 27,2 | 21,4 | 17,6 | 15 | 13,4 | |
| 7 | 28,2 | 21,6 | 18 | 14,8 | 13,4 | |
| 8 | 28,2 | 22 | 18 | 14,8 | 13,4 | |
| 9 | 28,4 | 21,8 | 17,8 | 15 | 13 | |
| 10 | 27,8 | 22 | 18,4 | 15,2 | 13,6 | |
| Resultados | | | | | | |
| tr [s] | 28,13 | 21,72 | 17,84 | 15,21 | 13,47 | |
| Er [psi/s] | 0,36 | 0,46 | 0,56 | 0,66 | 0,74 | |
| Vv [m/s] | 11,11 | 12,50 | 13,89 | 15,28 | 16,67 | |
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita | | | | | |
| Observaciones: | | | | | | |

| PRUEBA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA NEUMÁTICA | | | |
|-----------------------------------------------|-------|-------------------------------|-----------|
| p₁ [psi] | 60 | Temp Ambiental [°C] | 25 |
| p₂ [psi] | 80 | Condiciones climáticas | despejado |
| Volumen reservorio [m³] | 0,025 | | |
| Velocidad [km/h] | 50 | | |
| masa del vehículo [kg] | 1094 | | |
| k | 0,08 | | |

| Test No | Tiempo [s] |
|---------|------------|
| 1 | 45 |
| 2 | 44,2 |
| 3 | 41,9 |
| 4 | 45,4 |
| 5 | 44,6 |
| 6 | 44,3 |
| 7 | 44,7 |
| 8 | 45 |
| 9 | 44,2 |
| 10 | 44,8 |

| | |
|---------------------------|---------------|
| p₁ [Pa] | 413640 |
| p₂ [Pa] | 551520 |
| Resultados | |
| Tiempo medio [s] | 44,41 |
| P [kW] | 2,38 |
| Pe[kW] | 0,19 |
| Pn [kW] | 0,08 |
| η_r[%] | 40,58% |

| | |
|-----------------------|----------------------------|
| Realizado por: | David Solano, Jorge Zurita |
|-----------------------|----------------------------|

| | |
|-----------------------|--|
| Observaciones: | |
|-----------------------|--|

5.1.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Eficacia del Sistema de Recuperación de Energía Los valores de eficacia obtenidos con los datos de la *prueba de recuperación de energía* se muestran en la siguiente tabla:

| ϵ_r [psi/s] | 0,36 | 0,46 | 0,56 | 0,66 | 0,74 |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| V_v [km/s] | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |

Tabla 5. 8 Eficacia del sistema de recuperación de energía

La eficacia del sistema es creciente conforme aumenta la velocidad del vehículo, como se aprecia en la siguiente figura:

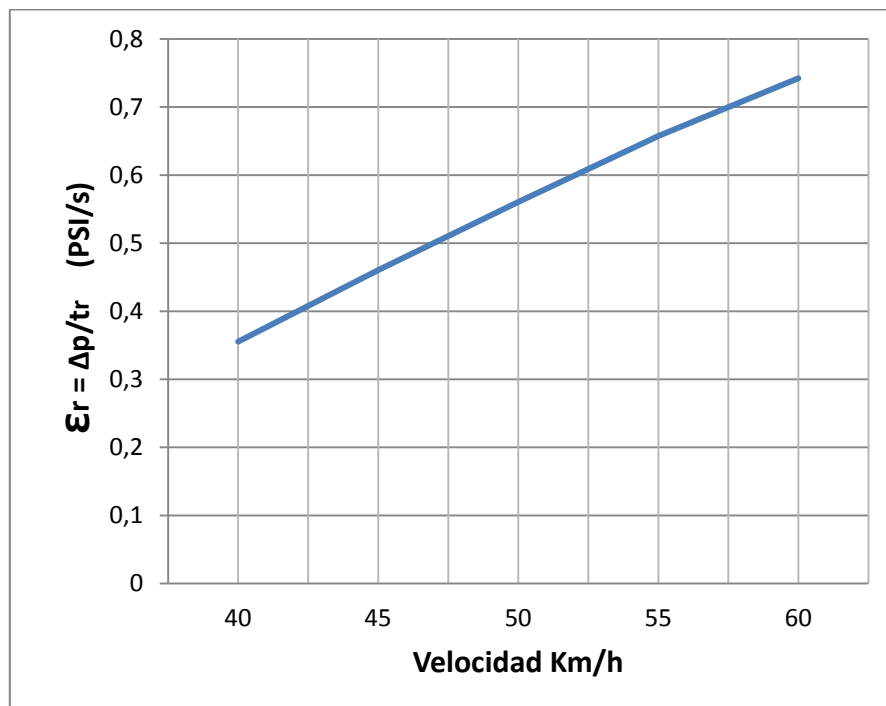


Gráfico 5. 1 $\Delta p / t_r$ vs V_v

La eficacia indica que a mayor velocidad del vehículo el tanque se llena con mayor rapidez.

Eficiencia del Sistema de Recuperación de Energía. Según los resultados de la *prueba de almacenamiento de energía* neumática, La eficiencia del sistema es:

$$\eta_r = 40.58 \%$$

El resto de energía de entrada al sistema de recuperación se disipa en pérdidas debido a la fricción en el sistema de transmisión y la eficiencia del cabezal compresor.

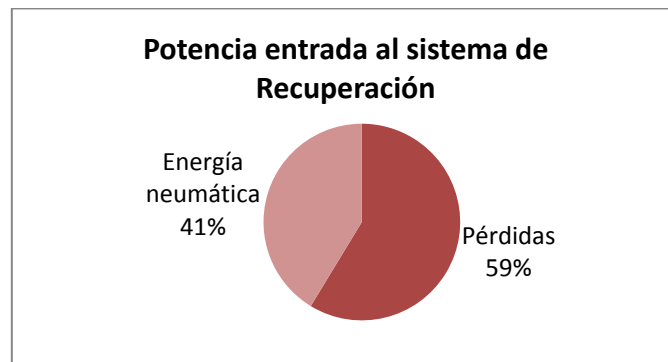


Gráfico 5. 2 Eficiencia del sistema de recuperación de energía

SISTEMA DE SOBREALIMENTACIÓN

Eficacia del Sistema de sobrealimentación.

Los resultados de la prueba de potencia máxima son:

$$P_{f_{sa}} = 47.2 \text{ HP}$$

$$P_{f_{se}} = 48.1 \text{ HP}$$

$$CEC_a = 407.09 \text{ g/KWh}$$

$$CEC_e = 407.03 \text{ g/KWh}$$

Para determinar la eficacia del sistema de sobrealimentación se utilizan las desigualdades del numeral 5.1.2

$$Pf_{se} \leq 1,3 Pf_{sa} \quad \text{Des. 5. 2}$$

$$48.1 \text{ HP} < 61.4 \text{ HP}$$

$$CEC_e \geq 0.9 CEC_a. \quad \text{Des. 5. 5}$$

$$407.03 \text{ g/KWh} > 366.38 \text{ g/KWh}$$

Por lo tanto el sistema **no es eficaz**. La diferencia de potencia y el consumo específico de combustible al encender el sistema de sobrealimentación es insignificante, considerando la definición de eficacia del sistema y la incertidumbre en los datos obtenidos.

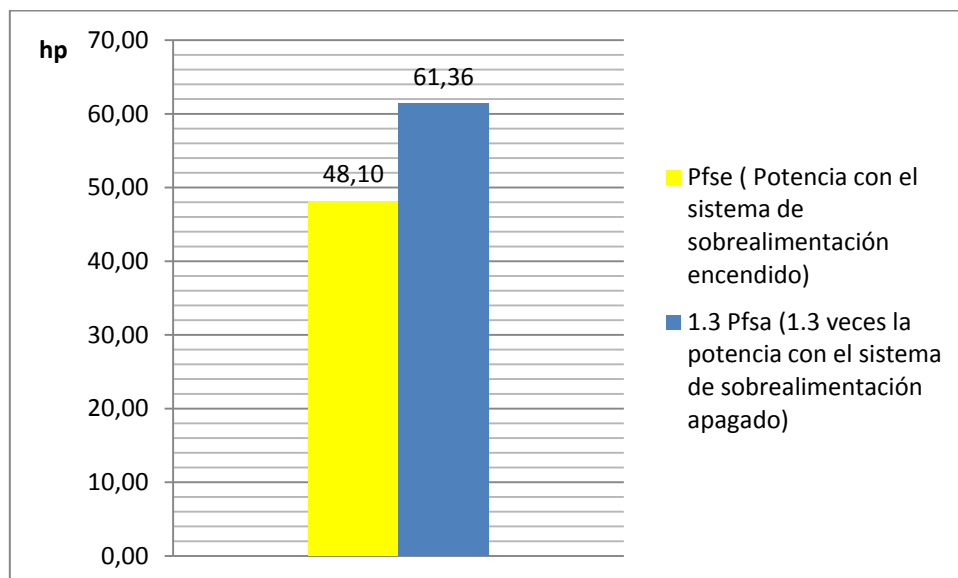


Gráfico 5. 3 Comparación entre Pf_{se} y Pf_{sa}

La potencia con el sistema de sobrealimentación encendido debe superar los 61.3 HP, para ser considerado eficaz, en el gráfico se muestra que P_{fse} es menor a dicho valor.

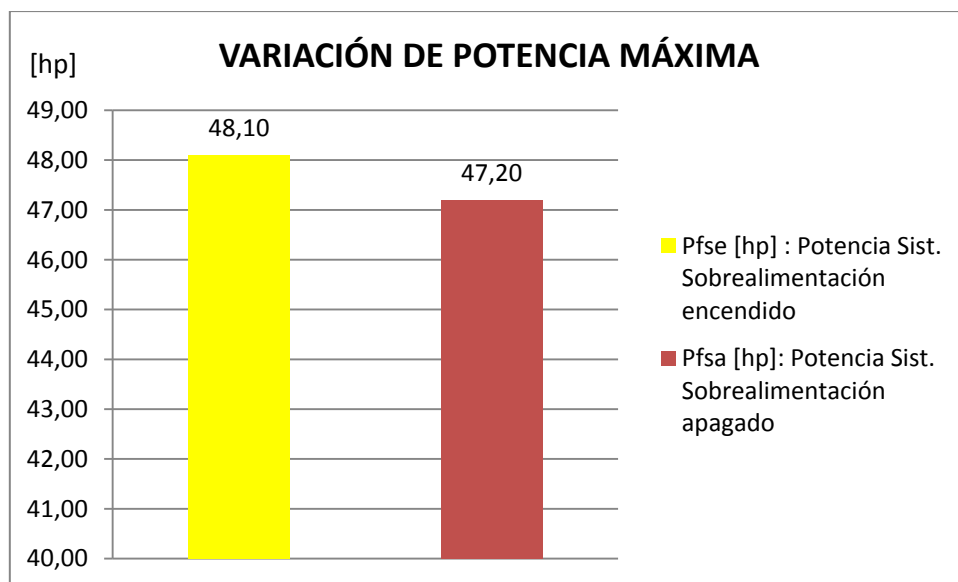


Gráfico 5. 4 Variación de Potencia Máxima

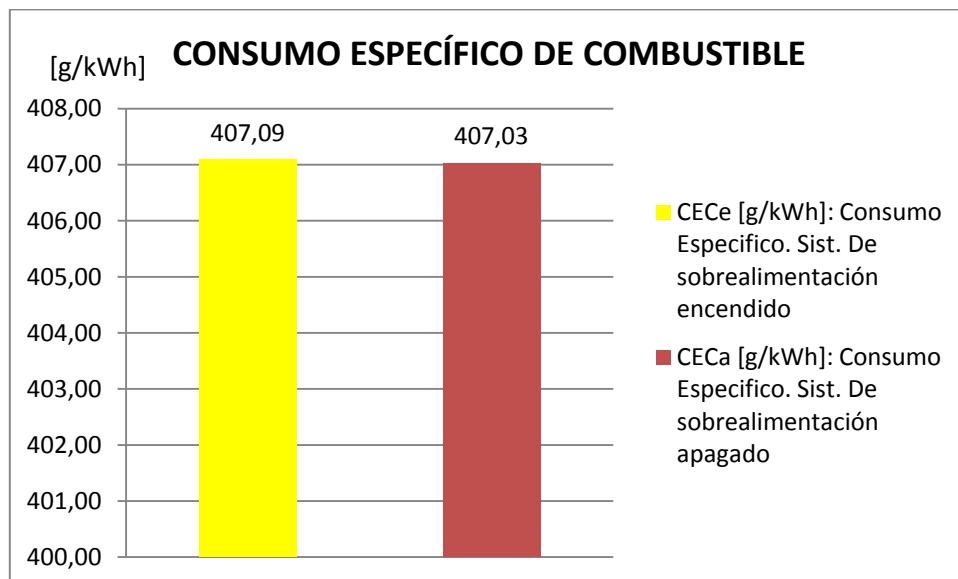


Gráfico 5. 5 Variación del consumo específico de combustible

Los resultados de la prueba de caudal nos indican que la cantidad de aire proporcionada por el sistema de sobrealimentación no es suficiente para abastecer la demanda del motor en altas revoluciones. En el siguiente gráfico se aprecian la demanda de caudal del motor (Q_N) en función de la velocidad de giro del motor (rpm) y el caudal de entrega el sistema de sobrealimentación (Q_S).

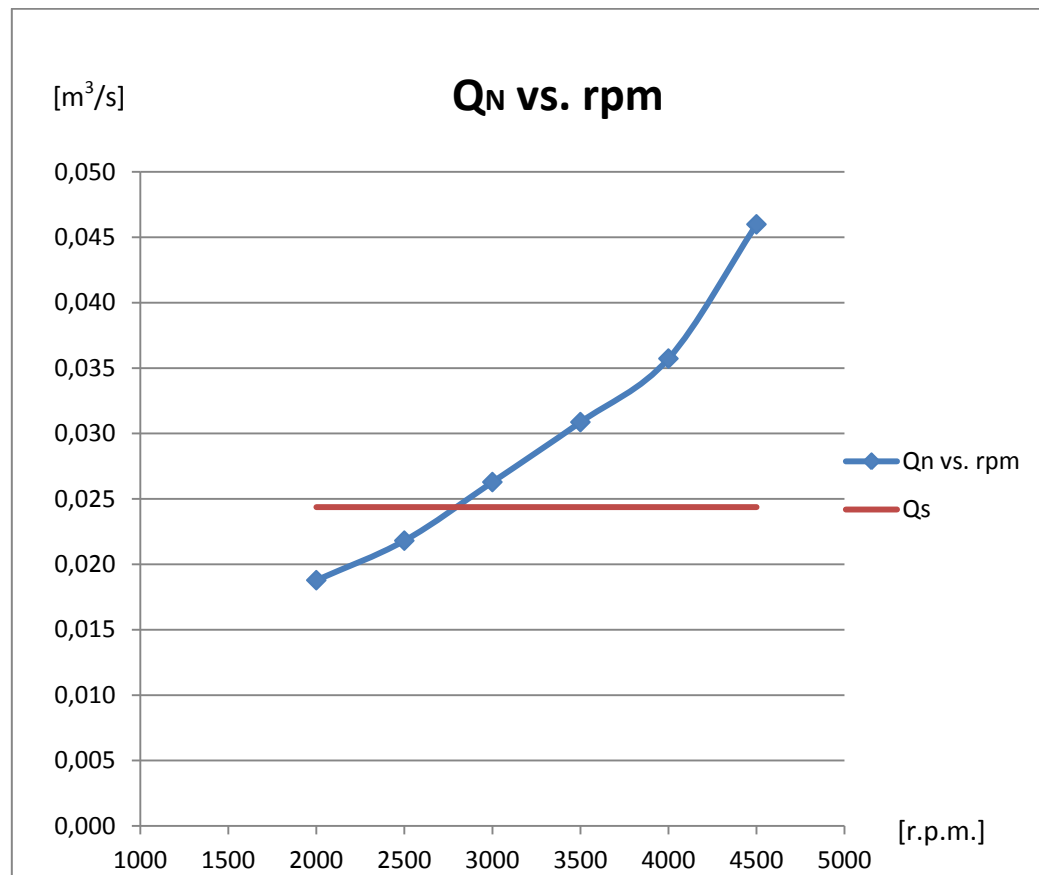


Gráfico 5. 6 Caudal de aire consumido por el motor en función de la velocidad de giro

El tanque de almacenamiento de $0,025 \text{ [m}^3\text{]}$ (25 litros), a una presión de 5745 [Pa] (120 psi), contiene aire para mantener la sobrealimentación

durante aproximadamente 6 [s] a una velocidad de giro del motor de 4500 [rpm]. Siempre y cuando se utilice la tubería recomendada en el diseño.

Eficiencia del Sistema de Sobrealimentación. Según los resultados de la *prueba de presión*, se tiene una caída de presión máxima de 34.14 psi y se alcanza una eficiencia del 25 %.

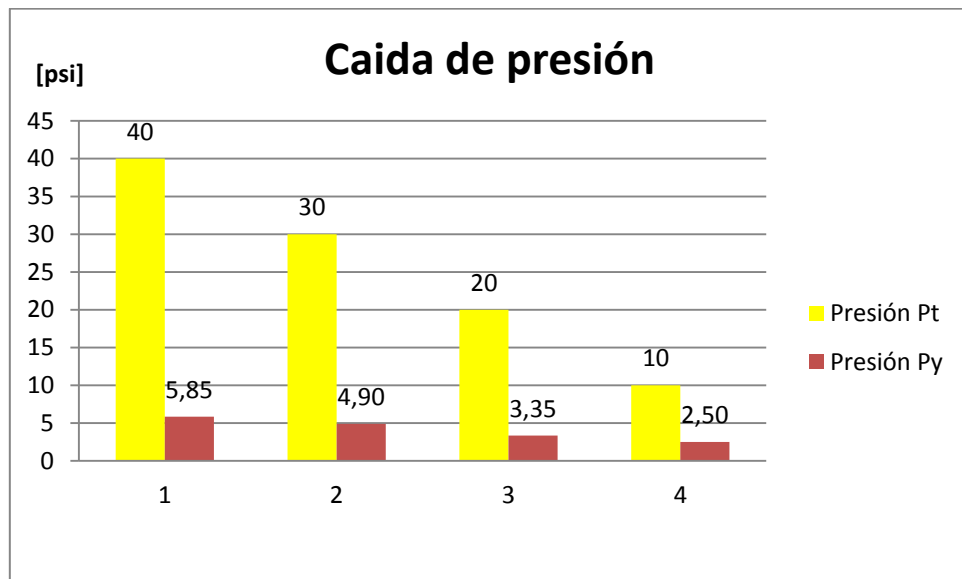


Gráfico 5.7 Caída de presión en el sistema de sobrealimentación

Se puede observar en el gráfico que la caída de presión varía de 34,14 psi a 7,7 psi de conforme disminuye pt

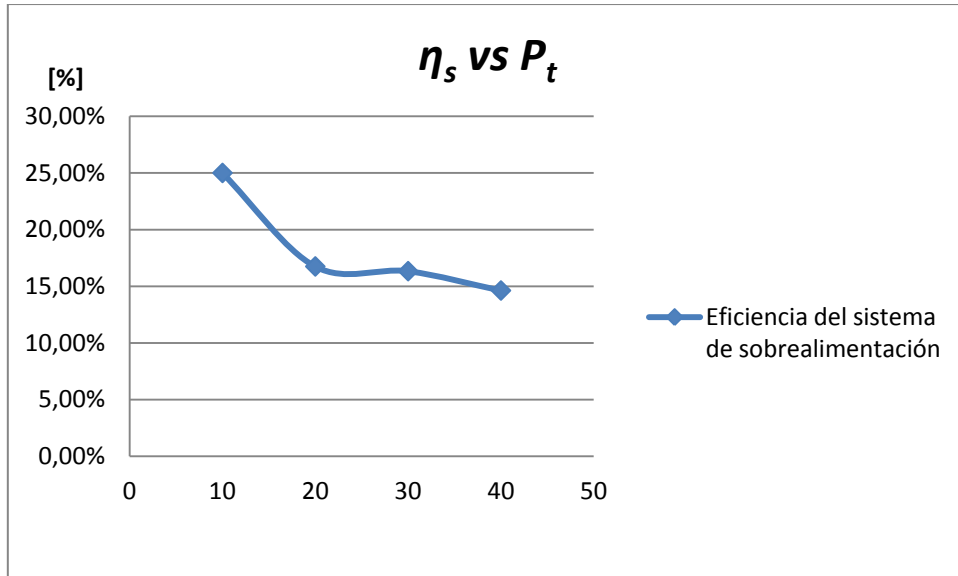


Gráfico 5. 8 Eficiencia del sistema de sobrealimentación en función de la presión en el tanque

La eficiencia es varía entre los valores del 25 % al 14.63% de acuerdo a como disminuye la presión en la línea y en o tanque, el sistema no es eficiente.

Eficiencia y eficacia global del sistema

Eficiencia global se obtiene al multiplicar la eficiencia del sistema de recuperación por la eficiencia del sistema de sobrealimentación

$$0.4058 \times 0.25$$

Es igual a 0.1015, que representa el 10.15%

El sistema de recuperación de energía y sobrealimentación no es eficaz

5.1.7 DETERMINACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE EN EL CÁLCULO DE RESULTADOS

Incertidumbre de medición tipo A: Puede ser calculada estadísticamente sobre series de mediciones. De acuerdo con el teorema del límite central, si el número de mediciones es menor que 10 se corrige con el factor t de Student.²⁴

La incertidumbre tipo A se calcula con la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}} \quad \text{Ec. 5. 13}$$

S es conocida también como la desviación estándar estimada.

Donde X_1 es el resultado de la medición y \bar{X} es la media aritmética de los n resultados considerados.

El factor “t” se lo obtiene de la tabla de distribución “t” de student.

Para corregir la incertidumbre de tipo A la formula es:

$$A = t_{\text{nivel de confiabilidad}} \times \frac{s}{\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 5. 14}$$

²⁴ RESTREPO DÍAZ Jaime, Aseguramiento Metrológico Industrial, tomo 1. Pág. 98

Incertidumbre de medición tipo B: Se determina a partir de los datos del fabricante del dispositivo de medición, especificaciones, etc.

$$B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Ec. 5. 15}$$

Donde

a= Límite de error o exactitud especificada por el fabricante del dispositivo.

Incertidumbre de medición tipo C: incertidumbre combinada es la suma cuadrática de las incertidumbres tipo A y tipo B

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} \quad \text{Ec. 5. 16}$$

Incertidumbre de medición expandida: cuando por razones de seguridad o salud se necesita expresar la incertidumbre con un nivel de confianza²⁵ se multiplica por un factor de cobertura K que puede ser

K=1 para un nivel de confianza de 68%

K=2 para un nivel de confianza de 95,5%

K=3 para un nivel de confianza de 99,7%

Además

Según la referencia bibliográfica²⁶ la incertidumbre se define para $R=R(x_1, x_2, x_3 \dots x_n)$ como:

²⁵ RESTREPO DÍAZ Jaime, Aseguramiento Metrológico Industrial, tomo 1. Pág. 104

$$W_R = \left[\left(\frac{\delta R}{\delta x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta x_n} w_n \right)^2 \right] \quad \text{Ec. 5. 17}$$

Donde w son las incertidumbres en las variables independientes

Cálculo de incertidumbre

En la prueba de frenado:

La energía disipada es función de varias variables independientes, en este caso

$E_d = E_d(m, v)$

Para calcular la incertidumbre se aplica a la ecuación 5.17

$$W_R = \left[\left(\frac{\delta R}{\delta x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\delta R}{\delta x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\delta R}{\delta x_n} w_n \right)^2 \right]$$

Donde las incertidumbres de la masa y la velocidad son

$w_v = \pm 5$ [km/h] o 1,35 [m/s] Se basa en la apreciación del velocímetro

$w_m = \pm 1$ [kg] Se asume que el pesaje se realizó en una balanza de apreciación ± 1 [kg] (peso del vehículo indicado en el manual de usuario más el peso del conductor)

²⁶ HOLMAN, JP. Métodos experimentales para Ingenieros 3era Ed.

Para los 80 km/h o los 22.2 m/s

$$\frac{\delta E_d}{\delta m} = \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} 22.2^2 = 246$$

$$\frac{\delta E_d}{\delta V} = mV = 1094 \times 22.2 = 24286$$

$$W_{ed} = \left[\left(\frac{\delta E_d}{\delta m} w_m \right)^2 + \left(\frac{\delta E_d}{\delta v} w_v \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = [(246 \times 1)^2 + (24286 \times 1,35)^2]^{\frac{1}{2}} = 32820 \text{ [J]}$$

Para un valor k de 1 con nivel de confianza de 68%

Por lo tanto la energía disipada a 80 [km/h] es:

$$E_d = 270 \text{ [kJ]} \pm 32 \text{ [kJ]} \text{ con un nivel de confianza de 68\%}$$

Para Pf_{sa} ecuación 5.7²⁷

$$A = t_{\text{nivel de confiabilidad 95\%}} \times \frac{s}{\sqrt{n}}$$

La desviación estándar se obtiene mediante el programa Excel

$$A = 2.262 \times \frac{0.918}{\sqrt{10}} = 0.656 \text{ hp}$$

$$B = \frac{\text{apreciación acelerómetro}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.57$$

$$C = \sqrt{A^2 + B^2} = 0.86 \text{ [hp]}$$

Factor k_f de corrección con un nivel de confianza de 95% es:

$$k_f = 2$$

Por lo tanto el error aproximado es de 1,74 [hp] con un nivel de confianza del 95%.

²⁷ Se realiza el mismo procedimiento para el cálculo de incertidumbre del consumo del combustible

El error calculado es de $\pm 1,74$ [hp]:

- Si se toma en cuenta el límite inferior igual a $- 1.74$ [hp] entonces Pf_{se} es igual a $46,36$ [hp], valor que es aún menor a Pf_{sa} , es decir existiría un decremento.
- Además el valor absoluto del error es mayor que el aumento de potencia obtenido con el sistema de sobrealimentación encendido ($Pf_{se} - Pf_{sa} = 0.9$), por lo tanto no se puede asegurar que exista un aumento de potencia del motor.

CAPITULO 6

ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO

6.1 ANÁLISIS ECONÓMICO-FINANCIERO

El análisis económico, tiene por objetivo determinar el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto. El análisis económico se lo realiza tomando en cuenta los costos directos y los costos indirectos.

Para determinar el costo total directo se considera los costos parciales de:

- Materiales directos.
- Elementos normalizados.
- Costos de maquinado.
- Costos de montaje.

De manera similar para determinar el costo total indirecto se considera los costos parciales de:

- Materiales indirectos.
- Costos de ingeniería.
- Gastos imprevistos.

Para determinar el costo total del sistema de recuperación de energía cinética se suma el total de los costos directos con los costos indirectos.

6.2COSTOS

Costos de construcción de la máquina.

Para realizar el análisis es preciso cotizar los precios de todos los componentes que se utilizan en el desarrollo de la máquina, como también todos aquellos agentes directos e indirectos que intervienen en la fabricación del mismo.

Personal requerido para la construcción de la máquina

Para la construcción del sistema de recuperación de energía cinética se requiere personal hábil y con conocimientos en máquinas herramientas, como también en procesos de producción, para el uso adecuado de las mismas.

- · Cerrajero
- · Soldador
- · Tornero
- · Doblador
- · Otros Operarios

6.2.1 COSTOS DIRECTOS.

Costos de Materiales Directos.

Se denominan materiales directos a la materia prima que se utiliza para construir los elementos que conforman la máquina. Los costos de los materiales directos se indican en la tabla siguiente

| COSTO DE MATERIALES DIRECTOS | | | |
|-------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| Materiales | Cantidad | Costo Unitario | Costo [USD] |
| Plancha de acero ASTM A 36 PL 1220x1440x1 mm. | 1 | 13,60 | 13,60 |
| Eje Acero AISI-1018 – 1 pulg. | 1,5 | 2,70 | 4,05 |
| Eje Acero AISI-1018 – 4 pulg. | 2 | 2,70 | 5,40 |
| Eje Acero AISI-1018 – 8 pulg. | 2 | 4,50 | 9,00 |
| Barra Poliamida 6 (GRILON) Color negro Ø 25 x 400 mm. | 1 | 2,35 | 2,35 |
| Barra Poliamida 6 (GRILON) Color negro Ø 50 x 80 mm. | 1 | 12,60 | 12,60 |
| Platina de acero ASTM A 36 PLT 50mm x 6m e: 6 mm. | 2 | 12,50 | 25,00 |
| Barra de POLYAMIDA 6 EXTRUIDA | 1 | 14,75 | 14,75 |
| Barra perforada de Bronce fosfórico 1 | 1 | 5,00 | 5,00 |
| Cañería de Cobre 5/16 x 1/4 (metros) | 1,5 | 5,20 | 7,80 |
| Cañería de Cobre 1/4 (metros) | 2,5 | 5,20 | 13,00 |
| Manguera 1/4 Multiusos 300 | 7 | 4,50 | 31,50 |
| Manguera 3/4 Multiuso 300 | 5 | 6,60 | 33,00 |
| | | SUBTOTAL | 177,05 |

Tabla 6. 1 Costo de Materiales Directos

Costos de Elementos Normalizados.

Se denominan elementos normalizados a los elementos que han sido diseñados con un fin específico y no necesitan ser alterados para su uso. Los costos de estos elementos se muestran en la tabla siguiente.

| COSTO DE ELEMENTOS NORMALIZADOS Y EQUIPOS | | | |
|--------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------------|
| Materiales | Cantidad | Costo unitario (USD) | Costo [USD] |
| Compresor SCHULZ CSI 7,4/25 | 1 | 480,00 | 480,00 |
| Electrovalvula MINDMAN 3/2 NC 1/4 Monoestable | 1 | 67,14 | 67,14 |
| Electroválvula Camozzi 3/2 NC 1/8 Monoestable | 1 | 72,10 | 72,10 |
| Pernos Arandelas y Tuercas | 20 | 0,35 | 7,00 |
| Polea de un canal Diam | 1 | 3,25 | 3,25 |
| Polea de un canal Diam | 1 | 5,20 | 5,20 |
| Chumacera SKF equivalente | 1 | 32,47 | 32,47 |
| Rodamiento SKF | 2 | 9,80 | 19,60 |
| Canastillas SKF | 1 | 7,00 | 7,00 |
| Banda en V trapezoidal | 1 | 7,50 | 7,50 |
| Banda en V trapezoidal | 1 | 5,64 | 5,64 |
| Secador de aire MINDMAN | 1 | 19,32 | 19,32 |
| Regulador de presión | 1 | 17,00 | 17,00 |
| Accesorios para mangueras y Cañerías de presión | ----- | 96,00 | 96,00 |
| Electro embrague | 1 | 112,00 | 112,00 |
| Manómetro 150 psi | 1 | 17,00 | 17,00 |
| Manómetro 15 psi | 1 | 26,00 | 26,00 |
| Material Electrico | ----- | 95,00 | 95,00 |
| Bateria | 1 | 55,00 | 55,00 |
| | | SUBTOT | 1.144,22 |

Tabla 6. 2 Costo de elementos normalizados y equipos

Costos de Maquinado.

Este costo tiene que ver con el valor respecto a la mano de obra directa empleada en las máquinas herramientas y equipamiento eléctrico.

| COSTO DE MAQUINADO Y MANO DE OBRA | | | |
|------------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------------------|
| Proceso | Tiempo [h] | Costo/ Hora [usd/h] | Costo Total [USD] |
| Cortado | 0,5 | 5,00 | 2,50 |
| Soldado | 2 | 9,00 | 18,00 |
| Amolar | 1 | 5,00 | 5,00 |
| Cizalla | 0,5 | 5,00 | 2,50 |
| Doblado | 1 | 4,00 | 4,00 |
| Torneado | 5 | 10,00 | 50,00 |
| Fresado | 2 | 11,40 | 22,80 |
| Taladrado | 1 | 5,50 | 5,50 |
| Esmerilado | 0,5 | 3,50 | 1,75 |
| Otros | 8 | 10,00 | 80,00 |
| | | SUBTOTAL | 192,05 |

Tabla 6. 3 Costo de maquinado y mano de obra

Estos costos están relacionados con la mano de obra necesaria para el armado y ensamblado de cada una de las partes y la máquina. Para el montaje, se considera el trabajo de 2 personas Durante 3 días a un costo de \$25 diarios/trabajador, resultando un costo total de \$150.

Costo Total Directo.

En la tabla se indica la cantidad total del costo directo.

| COSTO TOTAL DIRECTO | |
|----------------------------------------|--------------------|
| COMPONENTE DEL COSTO | VALOR [USD] |
| Costo directo Materia prima | 177,05 |
| Costo Elementos Normalizados y Equipos | 1101,22 |
| Costo Maquinado y Mano de Obra | 192,05 |
| Costo de Montaje | 150 |
| TOTAL | 1620,32 |

Tabla 6. 4 Costo de total directo

6.2.2 COSTOS INDIRECTOS.

Costos de Materiales Indirectos.

Los costos de materiales indirectos se indican en la tabla siguiente:

| COSTO DE MATERIALES INDIRECTOS | | | |
|---------------------------------------|-----------------|-----------------------|--------------------|
| Materiales | Cantidad | Costo Unitario | Costo [USD] |
| Electrodos E 6011 x 1/8 (kg) | 1 | 3,00 | 3,00 |
| Grasa de Litio Multiusos | 1 | 5,00 | 5,00 |
| Pegamento para uniones. | 1 | 4,00 | 4,00 |
| Limpiador Carburador (latas) | 2 | 2,70 | 5,40 |
| Pintura en Spray (latas) | 3 | 2,60 | 7,80 |
| Material de seguridad, guantes, gafas | ---- | 13,00 | 13,00 |
| Brocas | 7 | 3,00 | 21,00 |
| Varios | ---- | 11,30 | 11,30 |
| Elevadores manuales | 4 | 7,50 | 30,00 |
| varias herramientas | | 22,00 | 22,00 |
| Gasolina extra(gl) | 70 | 1,48 | 103,60 |
| | | SUBTOTAL | 226,10 |

Tabla 6. 5 Costo de materiales indirectos

Costos de Ingeniería.

Corresponde el valor económico del tiempo que los investigadores han dedicado para el diseño y selección los elementos del sistema.

El tiempo necesario es de aproximadamente 160 horas, a lo que se propone un valor de 4 USD/hora por lo tanto el costo por diseño es: 680 dólares.

Gastos Imprevistos.

Se relacionan principalmente con los costos de movilización de las personas y transporte de materiales. Se estima estos costos aproximadamente en 60 USD.

Costo Total Indirecto.

En la tabla se indica la cantidad total del costo indirecto.

| COSTO TOTAL INDIRECTO | |
|------------------------------|--------------------|
| COMPONENTE DEL COSTO | VALOR [USD] |
| Materiales Indirectos | 226,1 |
| Costo de Ingeniería | 680 |
| Gastos Imprevistos | 100 |
| TOTAL | 1006,1 |

Tabla 6. 6 Costo total indirecto

6.3 COSTO TOTAL DEL SISTEMA DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE ENERGIA PARA SOBREALIMENTACIÓN

Resulta de la suma de los costos directos con los costos indirectos.

| COSTO TOTAL | |
|-----------------------------|--------------------|
| COMPONENTE DEL COSTO | VALOR [USD] |
| Costo TOTAL DIRECTO | 1.620,32 |
| Costo TOTAL INDIRECTO | 1.006,10 |
| | |
| TOTAL | 2.626,42 |

Tabla 6. 7 Costo total

6.4 ANÁLISIS COMPARATIVO COSTO-BENEFICIO

En un proyecto de investigación experimental como el presentado en este trabajo, no es necesario establecer este tipo de análisis, ya que lo importante son los resultados y las conclusiones generadas

CAPITULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

1. Se cumplió con el objetivo de diseñar un sistema de recuperación de energía cinética mediante la compresión de aire.
2. El sistema de recuperación tiene una eficiencia relativamente baja debido a las pérdidas en la transmisión de potencia y su eficacia depende de la velocidad del vehículo (a mayor velocidad, mayor eficacia).
3. El sistema de sobrealimentación instalado tiene baja eficiencia debido a las pérdidas de presión en el ducto utilizado, lo cual no permite cubrir el requerimiento de aire del motor.
4. El sistema de sobrealimentación no es eficaz, lo cual demuestra que no es posible sobrealimentar un motor de automóvil con aire comprimido almacenado en un tanque en las condiciones y con los elementos utilizados en este trabajo.

7.2 RECOMENDACIONES DEL PROYECTO

1. Se recomienda usar el aire almacenado para otro tipo de aplicaciones diferentes a la sobrealimentación como: accionamiento de herramientas neumáticas, sistemas neumáticos de suspensión, inflado de llantas, etc.
2. Mejorar el sistema de control del sistema de recuperación de energía de tal forma que se pueda aumentar su eficacia, para lo cual se recomienda usar un sistema de transmisión que permita mantener la velocidad de giro del compresor constante a cualquier velocidad del vehículo.

3. Cuando se requiera sobrealimentar un motor de automóvil, se recomienda utilizar un compresor de flujo continuo.

BIBLIOGRAFÍA

- REESE, R.L. Física universitaria. Traducido del inglés por Ricardo Rubio. s.e. México D.F. Thompson. 2002. v1 752 p.
- WILSON, J.D. y BUFFA, A J. Física. Traducido del inglés por Roberto Escalona. 5ta ed. México D.F. Pearson. 2003. 920 p.
- TIPPENS, P.E. Física. Conceptos y aplicaciones. Traducido del inglés por González Ruíz. 6ta ed. S.L. Mc Graw hill .2001 943p. 530
- ORTEGA RODRIGUEZ, M. Energías renovables. 2da ed. Madrid. Thompson. 2007. 328 p.
- DEUTSCHMANN, A. Diseño de máquinas teoría y prácticas Traducido del inglés por José Garza. 2da. ed. México D.F. Continental. 1995. 973 p.
- BUDYNAS Y NISBETT Shygly's Mechanical engineering design. 8va. ed. Estados Unidos. McGraw-Hill. 2006. 1059 p.
- SHIGLEY, J. y MISCHKE C. Diseño en ingeniería mecánica. Traducido del inglés por Javier León. 6ta ed. México D.F. McGraw-Hill. 2002. 1258 p.
- ALONSO, J.M Técnicas del automóvil: Motores. 10ma ed. Madrid. Thompson. 2000. 755 p.
- PULKRABEK, W. Engineering fundamentals of the internal combustion engines. Primera ed. New Jersey. Prentice Hall. s.f. 411 p.
- GILLES, T. Diagnóstico y reparación de motores. Traducido del inglés por Mariana Díaz. s.e. Madrid. Paraninfo. 1996. 482 p.
- MEZQUITA, J. y DOLS, J.F. Tratado sobre automóviles. s.e. Valencia Alfaomega. 2001. v 2. 247 p.
- MAJUMDAR, S.R Sistemas neumáticos principios y funcionamiento. s.e. México D.F. Mc Graw Hill. 1998. 299 p.
- GREENE, R. Compresores, selección uso y mantenimiento. Traducido del inglés por Francisco Noriega. primera ed. México D.F. McGraw Hill. 1992. 292 p.

- GUTIERREZ, H. y DE LA VARA R., Análisis y diseño de experimentos. 2da ed. México D.F. McGraw Hill. 2004. 571 p.
- HOLLMAN, J.P. Métodos experimentales para ingenieros. Traducido del inglés por Julio Fournier González. 2da ed. México. McGraw-Hill. 1992. 559 p.
- MASON R. D. Estadística para administración y economía. Traducido del inglés por María Cristina Hernández. 10ma ed. México D.F. Alfaomega. 2003. 795 p.