

**FABRICACION DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA PARA ESTUDIO DE
VARIABLES EN LABORATORIO**

**CARLOS ARBEY VALENCIA RESTREPO
RUBEN DARIO DEQUE HERRERA
ANDRES FELIPE ARIAS ARIAS**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA Y AFINES
TECNOLOGÍA EN MECÁNICA INDUSTRIAL
MEDELLÍN**

2014

**FABRICACION DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA PARA ESTUDIO DE
VARIABLES EN LABORATORIO**

**CARLOS ARBEY VALENCIA RESTREPO
RUBEN DARIO DEQUE HERRERA
ANDRES FELIPE ARIAS ARIAS**

**Trabajo de Grado presentado como requisito para optar el Título de:
Tecnólogo en Mecánica Industrial**

**Asesor:
SAUL RIVERO MEJIA
Ingeniero Mecánico**

**INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE MECÁNICA Y AFINES**

TECNOLOGÍA EN MECÁNICA INDUSTRIAL

MEDELLÍN

2014

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos principalmente al técnico operativo: Javier de Jesus Mejia, quien ha hecho posible la realizacion de este logro, quien por su constante fascinacion y dedicacion por los motores stirling nos ha impulsado con excelentes ideas y mejoras en el proyecto.

Agradecimientos el Ingeniero Mecanico: Saul Emilio Rivero, asesor de nuestro proyecto que gracias a su dedicación se lleva a finalidad el proyecto.

Agradacimientos a la Institución Universitaria Pascual por la formacion academica adquirida durante el ciclo universitario y la disponibilidad de los laboratorios, equipos y monitores de taller en la construccion del proyecto.

Agradecemos a nustras familias que han sido el apoyo y motor constante para que desde jovenes nos encaminaramos por el gusto a la educacion, para mas adelante vernos convertidos en profesionales.

Finalmente agradecemos al docente Carlos Maya, quien impulsó y asesoró la construcción del motor Stirling tipo alfa mediante un proyecto en la asignatura termodinámica.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. EL PROBLEMA.....	11
2. JUSTIFICACIÓN	122
3. OBJETIVOS	133
3.1 Objetivo general.....	133
3.2 Objetivos específicos	133
4. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO.....	¡Error! Marcador no definido.4
4.1 Operación de un motor Stirling.....	14
4.1.1 Modo de operación de un motor de vacío.....	14
4.1.2 El motor Stirling como máquina de refrigeración y bomba de vacío.....	15
4.2 Partes de un motor Stirling.....	16
4.2.1 Zona caliente.....	16
4.2.2 Zona fría.....	17
4.2.3 Sistema de refrigeración de un motor Stirling.....	17
4.2.4 Refrigeración por aire.....	18
4.2.5 Refrigeración por agua.....	18
4.2.6 Regenerador.....	20
4.2.7 Pistón.....	21
4.2.8 Desplazador.....	21

4.2.9 Mecanismo de conversión de movimiento.....	22
4.2.10 La volante.....	22
4.3 Ciclo de la maquina Stirling.....	23
4.3.1 Expansión isotérmica (1-2).....	25
4.3.2 Enfriamiento isocónico (2-3).....	25
4.3.3 Compresión isotérmica (3-4).....	25
4.3.4 Calentamiento isocónico (4-1).....	26
5. METODOLOGÍA	27
5.1 Procedimiento.....	¡Error! Marcador no definido.
5.1.1 etapa 1.....	28
5.1.2 etapa 2.....	28
5.2 Elección de los instrumentos.....	29
5.3 Aspectos administrativos.....	30
5.3.1 Recursos humanos.....	30
5.3.2 Recursos técnicos.....	30
5.3.3 Recursos materiales.....	30
6. RESULTADOS DEL PROYECTO.....	¡Error! Marcador no definido.
6.1 Resultados obtenidos por la medición de variables de salida.....	32
6.1.1 Temperatura en el tubo de cristal.....	32
6.1.2 Temperatura en el foco caliente.....	32
6.1.3 temperatura en el foco frio.....	32

6.1.4 RPM obtenidas.....	35
6.2 Resultados finales.....	36
7. CONCLUSIONES.....	37
8. RECOMENDACIONES.....	38
BIBLIOGRAFÍA.....	39
ANEXOS.....	40

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 - Marcado de materiales	40
Figura 2 - Análisis de planos	40
Figura 3 - Construcción del soporte para la volante	41
Figura 4 - Construcción del soporte para el foco caliente	41
Figura 5 - Bulón 1 y 2 mecanizados	42
Figura 6 - Piezas mecanizadas	42
Figura 7 - Molde para la base del motor	43
Figura 8 - Base del motor	43
Figura 9 - Construcción de la volante	44
Figura 10 - Construcción del tapón para el foco caliente	44
Figura 11 - Base perforada	45
Figura 12 - Montaje de las bases del foco frio y caliente	45
Figura 13 - Montaje de soportes para la volante	46
Figura 14 - Montaje del intercambiador de calor	46
Figura 15 - Montaje de la volante	47
Figura 16 - Montaje del sistema de movimiento rotatorio	47
Figura 17 - Montaje del foco frio	48
Figura 18 - Montaje del foco caliente	48
Figura 19 - Montaje del pistón	49
Figura 20 - Montaje del tubo de cristal	49
Figura 21 - Montaje del mechero de alcohol	50
Figura 22 - Puesta en marcha del motor	50
Figura 23 - Partes de un motor Stirling	16
Figura 24 - Mecanismos de volante del motor Stirling	23
Figura 25 - Diagrama p-v del motor Stirling	24

LISTADO DE PLANOS

	Pág.
Plano 1 - Base	51
Plano 2 - Columna principal	52
Plano 3 - Coluna	53
Plano 4 - Varilla roscada	54
Plano 5 - Empujador 1	55
Plano 6 - Bulon 1	56
Plano 7 - Bulon 2	57
Plano 8 - Arandela	58
Plano 9 - Tubo de cristal	59
Plano 10 - Vastago	60
Plano 11 - Cilindro principal	61
Plano 12 - Culata cilindro principal	62
Plano 13 - Cojinete de bronce	63
Plano 14 - Soporte eje	64
Plano 15 - Embolo principal	65
Plano 16 - Tapa embolo	66
Plano 17 - Piston	67
Plano 18 - Culata cilindro secundario	68
Plano 19 - Cilindro secundario	69
Plano 20 - Soporte	70
Plano 21 - Articulacion	71
Plano 22 - Excentrica	72
Plano 23 - Empujador 2	73
Plano 24 - Eje	74
Plano 25 - Volante	75

Plano 26 - Quemador de gas	76
Plano 27 - Union quemador	77
Plano 28 - Unión generador	78
Plano 29 - Soporte motor	79
Plano 30 - Soporte quemador	80
Plano 31 - Banco de pruebas	81
Plano 32 - Ensamble motor Stirling	82

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 - Temperatura en el tubo de cristal.....	32
Tabla 2 - Temperatura en el foco caliente.....	33
Tabla 3 - Temperatura en el foco frío.....	34
Tabla 4 - RPM obtenidas.....	35

LISTADO DE GRAFICAS

	Pág.
Grafica 1 - Temperatura en el tubo de cristal.....	32
Grafica 2 - Temperatura en el foco caliente.....	33
Grafica 3 - Temperatura en el foco frio.....	34
Grafica 4 - RPM obtenidas.....	35

FABRICACION DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA PARA ESTUDIO DE VARIABLES EN LABORATORIO

Autores

Carlos Arbey Valencia Restrepo

Rubén Darío Duque Herrera

Andrés Felipe Arias Arias

Asesor

Saúl Rivero Mejía

RESUMEN

La educación sin lugar a dudas es en estos momentos uno de los campos más importantes que tendrá influencia en las personas para crear un mejor futuro. Fue entonces cuando pensamos en la construcción de un motor Stirling adaptado en un banco de pruebas que satisficiera todas las necesidades tanto de los docentes como de los estudiantes a nivel didáctico e investigativo; y pensando en una de las grandes problemáticas a nivel global como lo es la contaminación. Con el motor Stirling adaptado en un banco de pruebas para medición de variables de salida de un sistema térmico muy probablemente se mejorara el aprendizaje en campos de la ingeniería tan elementales como la termodinámica, y estudios de gases y fluidos.

PALABRAS CLAVE: Motor Stirling, problemáticas, variables, investigación, pruebas.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se expondrá una descripción detallada de la fabricación y funcionamiento de un motor Stirling tipo alfa para el análisis y estudio de variables en laboratorio; partiendo de una breve historia y del autor principal de la idea.

El motor Stirling fue originalmente inventado en 1816 por el fraile escocés sir Robert Stirling. En esta época existía un gran interés en diseñar un sustituto para los motores de vapor ya que estos trabajaban con calderas a muy altas presiones que frecuentemente estallaban. Esto sumado a que los materiales sufrían mucho desgaste por efecto de la corrosión causada por el agua. Más tarde se vuelve obsoleto con la aparición de los motores de combustión interna y los motores eléctricos, y rápidamente fue reemplazado para sumirse en el olvido.

Cuando las fuentes convencionales de energía dejen de ser viables debido a la escasez de materia prima, costos, carencia de infraestructura, entre otros, se buscarán fuentes alternativas, las cuales permitirán una buena relación costo-beneficio y sostenibilidad con el medio ambiente. Es aquí donde el motor Stirling jugará un papel importante dentro de desarrollo de energía limpia amigable con el medio ambiente; siendo retomado como solución energética sin efectos secundarios al medio ambiente.

En años no muy lejanos, el motor Stirling será el boom del desarrollo con respecto a la obtención de una energía limpia e independiente, a causa de su fácil operatividad y mantenimiento requerido para un debido funcionamiento.

1. EL PROBLEMA

Actualmente los estudiantes, docentes e investigadores de la Facultad de ingeniería de la Institución Universitaria Pascual Bravo no cuentan con un laboratorio en el cual se puedan evidenciar procesos termodinámicos; en donde sea posible realizar mediciones sobre motores o en máquinas térmicas. Adicionalmente, parte de los laboratorios que sirven de apoyo a la docencia y a la investigación se utilizan por debajo de su capacidad.

De otro lado, más allá de los problemas que implica para la institución la subutilización de los laboratorios, hay un riesgo mucho mayor, el cual tiene que ver con las competencias con las que los estudiantes se graduarán, que podrían estar por debajo de las necesidades del mercado laboral.

La institución está formando profesionales para el presente y el futuro, pero por falta de apoyos didácticos los estudiantes están pasando por alto muchos aspectos importantes, los cuales más adelante se van a ver reflejados en un mal desempeño profesional.

Buscamos entonces con este proyecto solucionar algunas de las problemáticas antes mencionadas, incentivar a los estudiantes en el campo de la investigación para que siendo profesionales ayuden a disminuir las necesidades energéticas partiendo de combustibles no fósiles, usando energía más limpia y amigable con el medio ambiente; siendo estas una de las mayores preocupaciones que abarcan a nivel mundial en los últimos tiempos.

La propuesta final entonces es fabricar un motor Stirling tipo alfa, partiendo de unas condiciones de operación que se desean analizar, mediante la implementación de un banco de estudio.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto busca trascender el conocimiento de los motores Stirling, los cuales a pesar de ser una tecnología antigua, han sido inexplicablemente olvidados durante muchos años. Aquí, mediante la implementación de un banco de prueba se pretende medir y analizar las diferentes variables de funcionamiento del motor, de tal forma que los estudiantes puedan llenar algunos vacíos teóricos, en tanto que los docentes posean también una herramienta de apoyo para el trabajo experimental, permitiendo de esa manera la contrastación teoría y práctica.

Un aspecto importante por el cual debe desarrollarse el proyecto, es que es una tecnología amigable con el medio ambiente. Éste último, normalmente es centro de debate mundial por los problemas relacionados con el cambio climático y de contaminación ambiental. En las empresas o compañías donde se generan grandes cantidades de gases contaminantes se pueden utilizar los motores Stirling para generar electricidad y así disminuir una parte de su propio consumo.

Por medio de este trabajo de grado, es posible sensibilizar sobre la viabilidad de desarrollar una tecnología que no solo es de bajo costo, sino que ha sido olvidada y que paulatinamente se está volviendo a utilizar en muchos países dadas sus evidentes ventajas. Si los estudiantes de la INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO se acercan a esta tecnología y logran entender su funcionamiento, cuando salgan a competir como profesionales, podrán tener la oportunidad de transferir y de aplicar sus conocimientos hacia soluciones de la sociedad, logrando con ello mostrarse como profesionales innovadores.

La puesta en funcionamiento del motor Stirling es un gran paso para fortalecer los procesos misionales de la Institución, impactando esencialmente asignaturas tan importantes para la formación del Ingeniero y del Tecnólogo como lo son: termodinámica, transferencia de calor y el diseño mecánico.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Construir un prototipo de motor Stirling tipo alfa de baja potencia para el análisis de variables térmicas en los laboratorios de la Institución Universitaria Pascual Bravo.

3.2 Objetivos específicos

- Seleccionar materiales para cada una de las piezas que hacen parte del motor Stirling
- Dibujar planos de ensamble del motor Stirling
- Fabricar y ensamblar las piezas del motor Stirling
- Seleccionar y ensamblar los dispositivos de medición de las variables de funcionamiento del motor

4. REFERENTES TEORICOS

4.1 Operación de un motor Stirling

El principio de operación de un motor Stirling es muy antiguo y muy fácil. Desde hace más de 2000 años los egipcios usaban el principio de expansión del aire caliente para abrir las puertas de sus templos. Bajo el mismo principio trabaja el motor térmico que Robert Stirling patentó en 1816: Un quemador con combustible que calentaba el aire en el interior de un cilindro y que proveía de energía al motor que era activado por medio del giro de una rueda volante.

A pesar de su simple diseño, los motores Stirling son máquinas sorprendentes.

El aire dentro del cilindro de trabajo es calentado por medio de una llama y debido a su expansión, el aire impulsa los pistones de desplazamiento que de igual manera activan los pistones de trabajo. Los pistones de desplazamiento retornan a su posición original gracias a la rueda volante produciendo que el aire detrás de ellos se refrigere y generando vacío. Este vacío asegura que los pistones de trabajo regresen a su posición inicial. Este proceso se repite continuamente y la máquina se pone en operación.

4.1.1 Modo de Operación de un Motor de Vacío

El motor de vacío que fue patentado por Henry Wood en 1758 es normalmente llamado como motor traga-llamas y pertenece al grupo de motores térmicos tal y como el motor Stirling. Similar al primer motor a combustión, la presión atmosférica conlleva la mayor parte del trabajo. Por medio de una válvula el pistón succiona la llama producida dentro del cilindro (el ruido típico producido aquí se asemeja al generado por un tractor tipo Lanz).

La llama calienta el aire en el cilindro y los pistones son presionados hacia atrás.

De esta manera se cierra la válvula conectada a la rueda volante y el aire contenido dentro del cilindro es nuevamente refrigerado. Los pistones retornan a su posición original gracias a la presión atmosférica. Cuando los pistones alcanzan su punto muerto, la válvula se abre nuevamente y el ciclo se repite nuevamente.

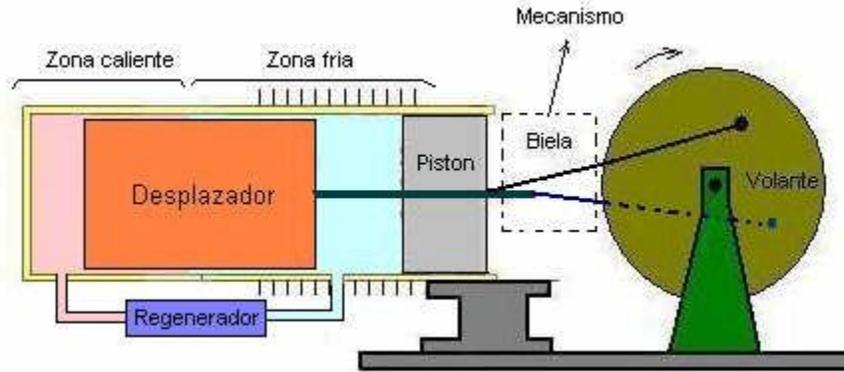
La rueda volante soporta la superación de ambos puntos muertos. Los modelos funcionales de motores de vacío son usados normalmente como motores estacionarios y son construidos con unos o más cilindros. Los motores de vacío también son usados en modelos históricos de tractores y de medios de transporte sobre rieles.

4.1.2 El motor Stirling como máquina de refrigeración y bomba de calor

Hasta ahora, el motor Stirling se representó como máquina térmica motriz: por el flujo de energía térmica de un reservorio caliente a uno frío, se generó trabajo mecánico. En cambio, si se aporta trabajo mecánico accionando la máquina desde afuera, se genera a la inversa un flujo de calor del reservorio de menor temperatura al de mayor temperatura. Ahora, si el reservorio de mayor temperatura se mantiene a temperatura ambiente, puede enfriarse así el otro reservorio, con lo que se obtiene una máquina de refrigeración. En cambio, si el reservorio de menor temperatura se encuentra a temperatura ambiente, el otro reservorio se calienta, con lo que se obtiene una bomba de calor.

En ambos casos, el diagrama pV - a diferencia del motor de aire caliente – se desarrollará en sentido anti-horario. Vale decir, la expansión isotérmica se produce a la temperatura inferior T_2 . La energía térmica necesaria para ello se extrae del reservorio más frío y se libera en la compresión a la temperatura superior T_1 .

Figura 23. Partes de un motor Stirling



Fuente: http://srv2.fis.puc.cl/mediawiki/images/7/78/Stirling-Motor_rev3.pdf

4.2 Partes de un motor Stirling tipo alfa

4.2.1 Zona caliente

Esta es la parte del motor donde se le entrega (transfiere) calor, y, por consiguiente, estará sometido a altas temperaturas (alrededor de 800°C). Los materiales a utilizar para su fabricación deberían ser materiales resistentes a la fricción. Se podría utilizar acero inoxidable austenítico, acero al Cr-Mo, etc. Esta parte puede ser de varias formas. Su forma más simple es cuando no hay ningún tipo de presurización dentro del cilindro, ésta puede ser un cilindro con una tapa plana. Esta configuración la podemos adoptar en motores pequeños y experimentales que no estén presurizados.

El diseño de la zona caliente varía de acuerdo al fluido de trabajo a utilizar, esto es debido a las propiedades del fluido. Por ejemplo, el He tiene una conductividad térmica de seis veces la conductividad del aire, por esta razón el diámetro interno de los tubos de la zona caliente debería ser más pequeño si utilizamos aire como

fluido de trabajo, esto es para hacer más eficiente la transferencia de calor debido a la baja conductividad térmica del aire. Un motor diseñado para utilizar aire, si funciona eficientemente utilizando He y H₂, pero no ocurre lo contrario. Más información sobre el diseño.

Las configuraciones mostradas anteriormente nos dan una idea para diseñar esta parte del motor Stirling, para la aplicación que deseemos, esto no quiere decir que tiene que ser de la misma forma como se muestran en las fotografías, sino de captar la esencia de esto y hacerlo de la forma más conveniente para la configuración del motor Stirling a utilizar, sin aumentar mucho el volumen muerto.

4.2.2 Zona fría

En esta parte se extrae calor del motor. La extracción de calor puede realizarse por convección libre o forzada. En el caso que sea libre, ésta puede realizarse mediante la colocación de aletas de aluminio para disipar rápidamente el calor.

En el caso de una refrigeración forzada, ésta se realiza acondicionando una camiseta de agua. Esta parte puede hacerse de acero inoxidable, fierro fundido, aluminio, cobre, etc. Estos dos últimos materiales se pueden utilizar en motores de baja potencia o experimentales, ya que en motores de alta potencia sería necesario un mayor espesor de éstos, y el costo sería elevado.

4.2.3 Sistema de refrigeración de un motor Stirling

El sistema de refrigeración tiene como objeto evacuar el calor del fluido de trabajo hacia un medio exterior más frío. Este es una parte muy importante del motor, porque debe ser capaz de evacuar por lo menos el 50% del calor que recibe el motor, y que lo debe hacer a la menor temperatura posible para mejorar la eficiencia térmica del motor. Existen dos tipos de refrigeración:

4.2.4 Refrigeración por aire

Debido a que este tipo de refrigeración es poco eficiente, se decidió utilizar materiales de alta conductividad térmica en la fabricación del cilindro de la zona fría, como cobre y aluminio.

Durante la investigación se tuvo problemas con este tipo de refrigeración, porque luego de cierto tiempo no muy largo, el calor transmitido por convección (por parte del fluido de trabajo y de la fuente caliente) y conducción (desde el cilindro de la zona caliente) calentaban el cilindro de la zona fría y con el tiempo de funcionamiento sus aletas se calentaban tanto que era imposible tocarlas con las manos, trayendo como consecuencia que la temperatura del cilindro de la zona fría sea alta, esto influye en la diferencia de temperaturas del gas entre las dos zonas haciendo que ésta disminuya. Esto se manifestaba mediante una disminución gradual de las RPM del motor, y, por consiguiente, de la potencia, siendo necesario, para que recupere su velocidad máxima alcanzada o mantenerla en cierto valor, aumentar el flujo de calor entregado al motor. Sin embargo, esto se volvía a repetir después de cierto tiempo.

Esto también traía como consecuencia un mayor calentamiento de la zona fría y de la estructura del motor y un mayor gasto de combustible, por esta misma razón, tomar datos de potencia o generación de energía eran casi imposible por la tendencia a la disminución continua (en el tiempo) de estos parámetros.

4.2.5 Refrigeración por agua

Para utilizar este tipo de refrigeración, se acondicionó una chaqueta de agua en el cilindro de aluminio ya que ésta es la parte intermedia. Para que sea efectiva la refrigeración del fluido de trabajo, ésta tiene que empezar antes de que éste ingrese a la zona fría (cuando el flujo de gas pasa a través de la holgura entre el desplazador y el cilindro).

El problema fue encontrar un diseño adecuado de la chaqueta de agua de tal manera que pueda ser desmontable fácilmente y que sea hermético. Con este tipo de refrigeración no se presentó el problema que se tuvo con el sistema anterior, ahora el motor se mantenía estable por más que esté funcionando 2 horas o más. La temperatura de las aletas del cilindro se mantenía en un valor que nuestro tacto podía soportar, pero esto mejoró aún más cuando se instaló un disco de acero de 12" x 1/8" con un agujero por donde entraba el cilindro de la zona caliente conjuntamente con la "cámara de combustión", con esto la temperatura del cilindro de cobre era mucho más baja.

Con esto se logró que el motor tenga un régimen estable con carga y una variación mínima de la velocidad que alcanzaba. En estas condiciones, se pudo tomar datos confiables en las pruebas que se hicieron, tomando en cuenta las recomendaciones que se El agua utilizada para el enfriamiento del motor fue tomada de la red pública de abastecimiento. Debido a que esta agua tiene cierta dureza se pudo observar la formación de sarro en el cilindro de aluminio después de cierto tiempo de uso del motor; esto puede acarrear problemas con el tiempo porque la capa de sarro puede hacerse tan gruesa que actúe como un aislante, por lo cual se recomienda realizar la limpieza del cilindro con cierta frecuencia, o, en todo caso, utilizar agua destilada en un circuito cerrado de refrigeración.

Se recomienda que el agujero de entrada del agua esté en la parte baja de la chaqueta y el de salida en la parte superior de ésta, esto es porque por diferencia de densidades el agua caliente tiende a estar en la parte más alta.

4.2.6 Regenerador

Esta es una parte muy importante del motor Stirling. Es sumamente necesario hacer uso del regenerador cuando el motor Stirling es presurizado, y, también, cuando el motor tenga grandes dimensiones a pesar que no esté presurizado. El regenerador absorbe y entrega calor al fluido de trabajo compensando una parte del calor perdido por el motor, haciendo que la potencia y velocidad del motor se incrementen, esto sucede porque cuando trabaja el regenerador el fluido de trabajo necesitaría absorber menos calor en cada ciclo, con lo cual hace que el ciclo necesite de menos tiempo para realizarse y también se consume menos cantidad de combustible.

El regenerador trabaja de la siguiente manera: suponiendo que el gas en la zona caliente está a 400°C y en la zona fría a 40°C . Cuando el gas pasa de la zona fría a la zona caliente, un regenerador ideal elevaría la temperatura del gas hasta 300°C , por lo tanto, el calentador tiene que entregar menos cantidad de calor para subir la temperatura del gas de 300 a 400°C ; de la misma manera, cuando el gas pasa de la zona caliente a la zona fría, el calor absorbido por el regenerador dejaría al gas que está en el lado frío a una temperatura de 100°C , y sólo se tendría que enfriar un poco para pasar de 100 a 40°C . Con esto se lograría, en ambos casos, reducir el tiempo de calentamiento y enfriamiento del gas con lo cual el ciclo se desarrolla más rápidamente.

Existen varias disposiciones de los regeneradores, entre los cuales están los estáticos y los móviles. Los móviles mayormente están dentro del desplazador y los estáticos pueden estar dentro o fuera del cilindro.

El material del regenerador debe tener una alta capacidad de almacenar energía térmica para que su temperatura sea estable. También, debe tener una conductividad térmica baja en la dirección del flujo, para generar un gradiente de temperatura.

4.2.7 Pistón

Esta parte es la que realiza el trabajo motriz, y va conectado al mecanismo de transformación de movimiento. El pistón debe ser ligero porque el gas realiza trabajo sólo durante la expansión. Debido a que el pistón está en la zona fría del motor, sí se puede utilizar aluminio para su construcción. Para motores pequeños experimentales, también utilizan teflón.

El pistón debe llevar anillos en el caso de que el motor sea presurizado y se podría obviar éstos en el caso de ser un motor pequeño o experimental.

4.2.8 Desplazador

Esta parte es la encargada de desplazar el aire de una zona a otra. Esta parte debe ser capaz de generar un gradiente de temperatura entre la zona caliente y la zona fría. Idealmente, esto se lograría haciendo que la cámara central del desplazador sea un aislador térmico, pero debido a que sería complicada su construcción, se puede hacer el desplazador largo y que el material tenga baja conductividad térmica; por otra parte, éste debe ser capaz de soportar altas temperaturas, porque la zona caliente siempre se mantendrá a alta temperatura. En motores pequeños y experimentales, el desplazador suele comportarse como un regenerador haciendo que éste tenga paredes lo más delgadas posible.

El desplazador también debe ser liviano porque, en la expansión, sube, juntamente con el pistón, y si éstos son pesados hacen más difícil la expansión del gas, y, por consiguiente, disminuye la potencia. Mayormente, los desplazadores se construyen de acero inoxidable por sus propiedades de conductividad térmica y de resistencia a altas temperaturas. Se sabe que en motores pequeños (de exhibición), también se pueden hacer de aluminio, pero esto no sucede en motores más grandes.

La longitud de un desplazador puede ser de 1 a 3 veces su diámetro, y la holgura radial que debe haber entre éste y el cilindro es de 1 a 2% del diámetro del cilindro, para que exista un efecto de regeneración [14]. Algunos investigadores consideran que el diámetro óptimo del desplazador es el 98% del diámetro del cilindro, lo cual es equivalente al 1% mencionado anteriormente.

4.2.9 Mecanismo de conversión de movimiento

Es el mecanismo que hace posible transformar la energía térmica en energía mecánica.

El tipo de mecanismo determina la forma del ciclo del motor Stirling, y, por consiguiente, con unos se obtendrán mejores resultados que con otros, pero, generalmente, son más complicados de construir.

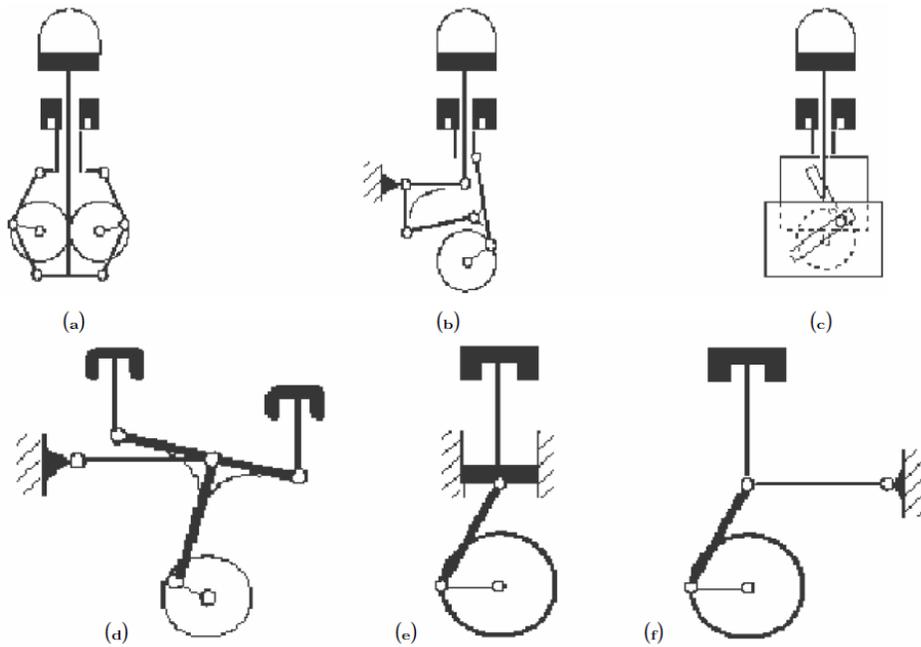
4.2.10 La volante

Esta es la parte que entrega energía al ciclo para que se produzca la compresión del fluido de trabajo y también ayuda a mantener estable el giro del motor.

Los diferentes mecanismos poseen sus propios parámetros óptimos de diseño, los cuales podemos encontrarlos en literatura técnica especializada.

Figura 24. Mecanismos de volante del motor Stirling

(a) Mecanismo rómbico, (b) De manivela y balancín, (c) De manivela y cursor, (d) Mecanismo de Ross, (e) Cigüeñal y biela con guiage lineal, (f) Cigüeñal y biela con guiage por balancín.



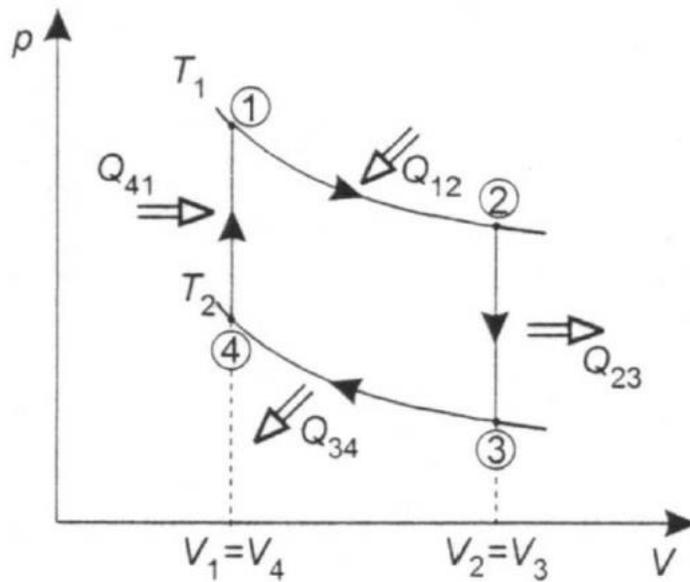
Fuente: http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/756/1/aguero_zv.pdf

4.3 Ciclo de la máquina Stirling

Ahora, explicamos el diagrama de estado del ciclo de operación de la máquina Stirling como máquina térmica motriz (motor de aire caliente). El aire como medio de trabajo gaseoso, se mueve dentro de un volumen cerrado limitado por el pistón de trabajo. El pistón desplazador divide el volumen de trabajo en dos áreas. En ello, el gas en el subvolumen sobre el desplazador se mantiene a la temperatura T_1 mediante una fuente de calor.

En el subvolumen inferior, el gas está en contacto, por la camisa de agua refrigerante, con un reservorio térmico de temperatura $T_2 < T_1$. El desplazador puede desplazar el gas entre los dos volúmenes de un lado a otro. En ello, el gas de trabajo fluye a través del regenerador con el que puede intercambiar calor.

Figura 25. Diagrama p-v del motor Stirling



Fuente: http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/756/1/aguero_zv.pdf

El cambio del volumen de trabajo entre los valores extremos V_1 y V_2 se convierte en un movimiento rotatorio a través de la excéntrica. El movimiento del desplazador relativo al pistón de trabajo se conduce mediante un accionamiento romboidal. Cuando el pistón de trabajo se ubica en el punto de inversión superior ($V = V_1$). Supongamos que el desplazador se encuentra tan cerca del pistón que todo el gas se ubica en la parte "caliente" del cilindro con la temperatura T_1 .

4.3.1 Expansión isotérmica (1-2):

Al aportar la cantidad de calor Q_{12} , el gas se expande en forma isotérmica del volumen V_1 al V_2 . Dado que con cambios de estado isotérmicos no cambia la energía interna U del sistema ($dU = 0$), del primer principio de la termodinámica resulta $dW = -dQ$, vale decir, el calor aportado se convierte completamente en trabajo mecánico.

$$W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} dW = -nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{12}$$

4.3.2 Enfriamiento isocórico (2-3):

El pistón de trabajo se ubica en el punto de inversión inferior ($V = V_2 = V_3$). Ahora, el desplazador se mueve hacia arriba y el gas caliente fluye a través del regenerador "frío" a la zona enfriada inferior del cilindro. En ello, el gas es enfriado (por el regenerador) de la temperatura T_1 a la temperatura T_2 y reduce su energía interna en $U_3 - U_2$. Dado que en cambios de estado isocóricos no se realiza trabajo mecánico ($W_{23} = 0$), se obtiene del primer principio que el calor $Q_{23} = dU < 0$ se transfiere al regenerador calentándolo y luego vuelve a quedar disponible para el calentamiento isocórico del gas. (Por decirlo así, sin regenerador, el Q_{23} se "derrocharía" entregándolo al agua refrigerante).

4.3.3 Compresión isotérmica (3-4):

Mediante el volante, el pistón de trabajo vuelve al punto de inversión superior en ello, el gas en la parte "fría" del cilindro se comprime a temperatura T_2 pasando del volumen V_3 al volumen V_4 . En ello, aumenta la presión del gas de acuerdo

con la ecuación. El trabajo mecánico realizado por el volante se entrega en este proceso al refrigerante como calor Q_{34} .

$$W_{34} = \int_{V_3=V_2}^{V_4=V_1} dW = nRT_2 \ln \frac{V_2}{V_1} = -Q_{34}$$

4.3.4 Calentamiento isocórico (4-1):

El pistón de trabajo se ubica en el punto de inversión superior ($V = V_4 = V_1$). Ahora, el desplazador se mueve hacia abajo, y el gas frío fluye a través del regenerador "caliente" a la zona calentada superior del cilindro. En ello, el gas es calentado (por el regenerador) de la temperatura T_2 a la temperatura T_1 y aumenta su energía interna en $(\int_{T_2}^{T_1} nC_V dT = nC_V(T_1 - T_2))$. El calor requerido para ello $Q_{41} = dU = -Q_{34}$ es extraído del regenerador y éste vuelve a enfriarse. (Sin regenerador, el Q_{41} tendría que ser compensado por la fuente de calor).

Al final, se realizó el siguiente trabajo neto:

$$W = W_{12} + W_{34} = -nR(T_1 - T_2) \ln \frac{V_2}{V_1} = -\oint p dV$$

5. METODOLOGÍA

Para la construcción del motor, se tuvieron en cuenta diversos aspectos. En primer lugar se realizó una búsqueda de referentes teóricos en tesis de grado y de información en revistas especializadas. La búsqueda de la información se centró en conocer aspectos tales como: el principio básico del funcionamiento del motor y los distintos tipos de motor, guías o recomendaciones de construcción del motor, planos de ensamble, manuales de mantenimiento, videos, informes técnicos, entre otros.

A continuación se describen los pasos previos a la construcción del motor

5.1 Procedimiento

Se analizó la necesidad de un proyecto el cual permitiera observar los algunos fenómenos termodinámicos y el estudio de variables termodinámicas, para así luego concluir que era justo fabricar un motor Stirling tipo alfa con base a unos planos tomados de (desarrollo de proyectos mecánicos).

Después de haber observado la viabilidad del proyecto se procedió a la fabricación. El 80% de las piezas se mecanizaron en torno y fresadora el resto son comerciales en el mercado, la base que soporta el motor se fabricó en bronce, mediante el proceso de fundición, utilizando el laboratorio de la universidad.

Se realizó el montaje de cada uno de los componentes, asegurándonos de tapar las posibles fugas en el sistema y asegurándonos de su excelente funcionamiento. Finalmente se diseñó y fabrico el modulo para análisis de variables de: temperatura; rpm; voltaje; torque; etc.

5.1.1.1 Etapa 1

Se visualizaron los planos del motor y luego se procedió a recopilar información primaria y secundaria, así se analizó que información faltaba para luego pedir asesoría por parte de personas concernientes al tema. Después de haber analizado todos los aspectos antes mencionados se hizo la cotización y compra de materiales e insumos para la fabricación. Luego de hacer estas compras, se destinó el espacio y herramientas para la elaboración del proyecto y posteriormente se inició la fabricación del motor utilizando la aplicación de técnicas de medición. A medida que se fue realizando el proyecto se realizaron informes de avance previos a la entrega final.

5.1.2 Etapa 2

Para el estudio y la fabricación de este proyecto se buscaron asesorías técnicas, para proceder al montaje de cada una de las piezas del motor y así tener tiempo de hacer ajustes necesarios antes del funcionamiento del motor en un periodo prudente de prueba y poder realizar las evaluaciones pertinentes para la elaboración final del informe y proyecto.

5.2 Elección de los instrumentos

Para la fabricación del motor Stirling se utilizaron varios instrumentos de medición de alta precisión para garantizar que cada una de las piezas quedara con las

medidas perfectas para garantizar la hermeticidad del motor; entre los instrumentos que se utilizaron están los siguientes:

- Pie de rey digital y análogo
- Micrómetro digital y análogo de un rango de 0-25
- Micrómetro digital y análogo de un rango de 25-50
- Flexómetro

También se utilizaron otro tipo de instrumentos, pero a diferencia de los anteriores estos fueron utilizados en la etapa final para medir las variables de salida y medidas estándares de funcionamiento y estos son:

- Pirómetro
- Multímetro
- Tacómetro

5.3 Aspectos administrativos

5.3.1 Recursos humanos

Para la realización del proyecto se contó con el apoyo de laboratoristas, los cuales fueron parte importante, permitiendo que se usara la maquinaria e instrumentos de los talleres de la institución. El jefe de taller también fue de gran ayuda dándonos indicaciones en momentos en los cuales se tenían dificultades en el momento de la fabricación, y por ultimo cabe destacar el gran aporte del asesor técnico quien guio a cada instante el proceso.

5.3.2 Recursos técnicos

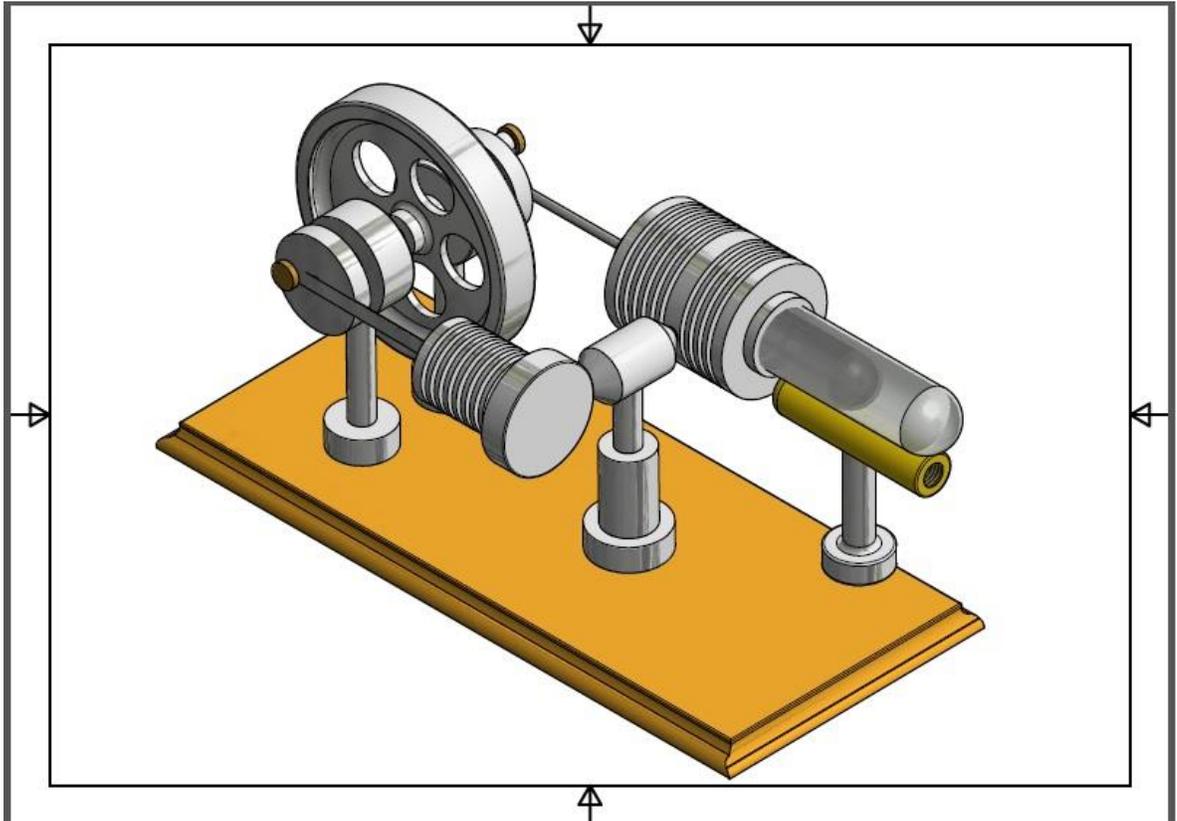
A la hora de la elaboración del proyecto y para el diseño de los planos se utilizaron computadores en los cuales estaba instalado el software Solid Edge ST4, al estar listos los planos se procedió a mecanizar las piezas y para esto se utilizaron instrumentos de medición y máquinas de mecanizado en general y para el informe se utilizó cámara para las fotografías del desarrollo del proyecto e impresora para los informes del proyecto.

5.3.3 Recursos materiales

Lápices, Resmas de papel, Libros, Reglas, Borradores, Marcadores, Sacapuntas, Compas, Graduador, Escuadras, Tuercas, Tornillos, Galgas, Estopa, Gasolina, Aceite, Pintura, Grasa, Disolventes, Caja para depositar repuestos, Lijas, Cepillo de alambre, Tintas, Lubricantes, Grafito, Instrumentos de medición, Pintura en aerosol.

6. RESULTADOS DEL PROYECTO

Plano 32 – Ensamble motor Stirling



Después de satisfactoriamente haber terminado el proyecto de grado **FABRICACION DE MOTOR STIRLING TIPO ALFA PARA ESTUDIO DE VARIABLES EN LABORATORIO** pudimos proceder a realizar la medición de las variables de salida teniendo en cuenta que estas se realizaron mientras que el motor funcionaba en condiciones normales de trabajo, los datos que obtuvimos fueron los siguientes:

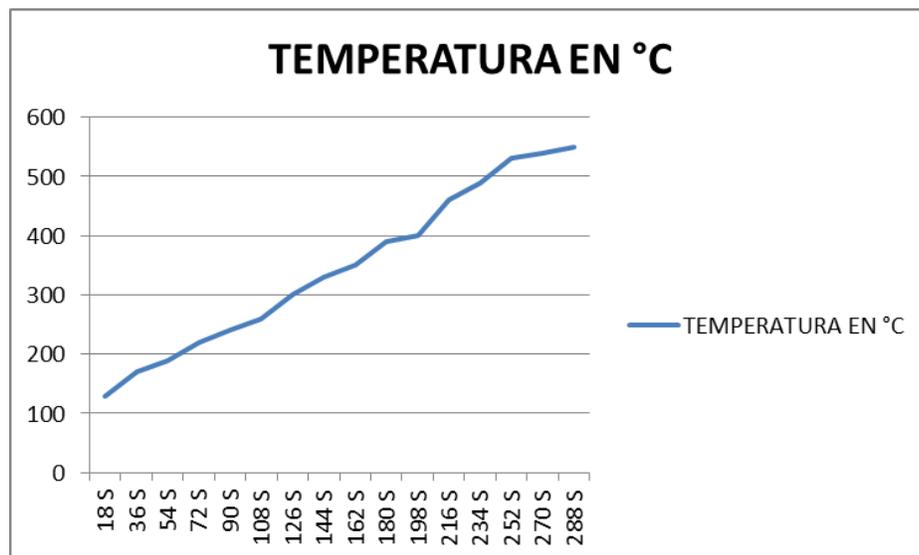
6.1 Resultados obtenidos por la medición de variables de salida

6.1.1 Temperatura en el tubo de cristal

Tabla 1 - Temperatura en el tubo de cristal

TIEMPO EN SEGUNDOS	TEMPERATURA EN °C
18 S	130
36 S	170
54 S	190
72 S	220
90 S	240
108 S	260
126 S	300
144 S	330
162 S	350
180 S	390
198 S	400
216 S	460
234 S	490
252 S	530
270 S	540
288 S	550

Grafica 1 - Temperatura en el tubo de cristal

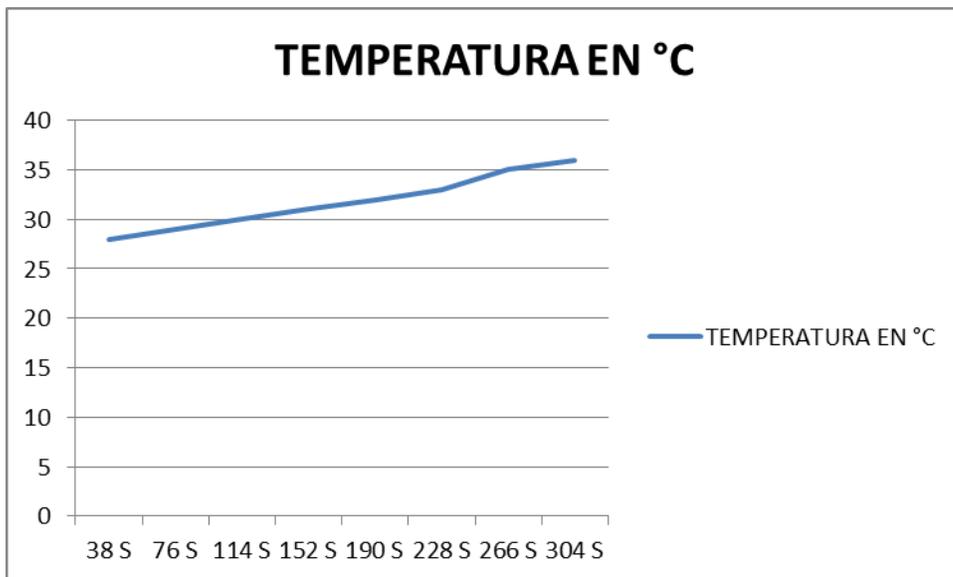


6.1.2 Temperatura en el foco caliente

Tabla 2 - Temperatura en el foco caliente

TIEMPO EN SEGUNDOS	TEMPERATURA EN °C
38 S	28
76 S	29
114 S	30
152 S	31
190 S	32
228 S	33
266 S	35
304 S	36

Grafica 2 - Temperatura en el foco caliente

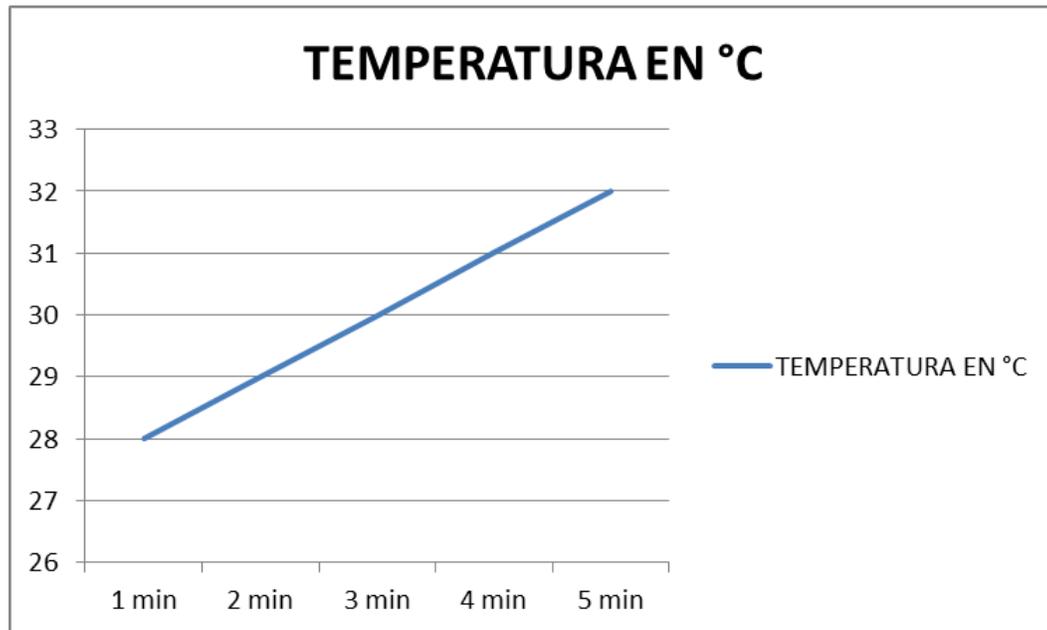


6.1.3 Temperatura en el foco frio

Tabla 3 - Temperatura en el foco frio

TIEMPO EN MINUTOS	TEMPERATURA EN °C
1 min	28
2 min	29
3 min	30
4 min	31
5 min	32

Grafica 3 - Temperatura en el foco frio

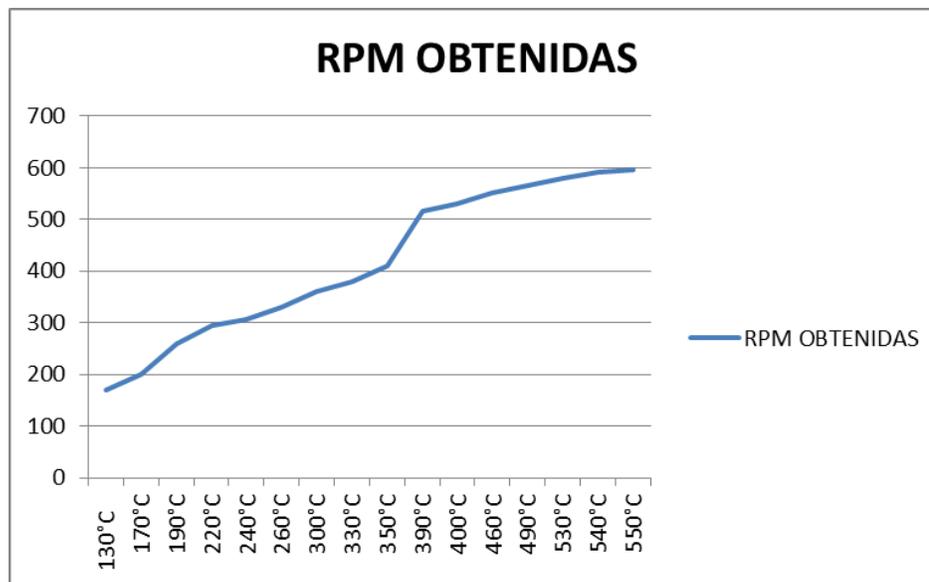


6.1.4 RPM obtenidas

Tabla 4 - RPM obtenidas

TEMPERATURA EN EL TUBO DE CRISTAL	RPM OBTENIDAS
130°C	170
170°C	200
190°C	260
220°C	295
240°C	305
260°C	330
300°C	360
330°C	380
350°C	410
390°C	515
400°C	530
460°C	550
490°C	565
530°C	580
540°C	590
550°C	595

Grafica 4 - RPM obtenidas



6.2 Resultados finales

Tenemos entonces un motor Stirling tipo alfa que funciona con las siguientes condiciones de trabajo:

Aporte calorífico: alcohol industrial al 95%

Presión del sistema: presión atmosférica

Carga de gas en el sistema: N₂O (aire)

En estas condiciones de trabajo se obtuvieron los siguientes resultados:

Temperatura final en el tubo de cristal: 550 °C

Temperatura final en el foco caliente: 36 °C

Temperatura final en el foco frío: 35 °C

RPM max obtenidas: 595 Rpm

7. CONCLUSIONES

- Los actuales sistemas de producción de energía eléctrica presentan problemas a nivel económico, político y medioambiental. Estos problemas, lejos de disminuir, se acentúan cada año, por lo que se hace necesario encontrar nuevas formas de producción de energía. Estas nuevas formas de producción de energía eléctrica deben ser lo suficientemente efectivas como para sustituir a los sistemas basados en la quema de combustibles fósiles, además de ser respetuosas con el medio ambiente.
- La generación de electricidad con el motor Stirling a gran escala es tecnológicamente posible y podría llegar a ser competitiva en un plazo no muy largo de tiempo. Para ello, deben realizarse nuevos esfuerzos en la investigación de su funcionamiento.
- El motor Stirling es una maquina generadora de energía por medio de la cual se pueden estudiar variables tan importantes como temperatura, presión, voltaje de salida, rpm. Sabiendo que según las condiciones de trabajo dichas variables se modificarían y afectarían el comportamiento del motor.
- Este proyecto será una herramienta de gran aporte en el campo didáctico e investigativo de la institución y ayudara a mejorar campos importantes como la termodinámica, fluidos y gases del campo de la ingeniería.

8. RECOMENDACIONES

- En el momento de mecanizar las piezas es necesario que se garantice la hermeticidad de cada una de ellas, esto se logra llevando un control muy estricto de la medición.
- Es de gran ayuda que en momento en el que se está realizando el ensamble se utilice una silicona que ayude a sellar las pérdidas de gas y un pegante de alta resistencia para tener buen ajuste.
- Es necesario que todos los componentes que se utilicen sean resistentes a altas temperaturas ya que el motor genera unas muy altas.
- Utilizar un combustible que genere un buen aporte calorífico pero teniendo en cuenta que este mismo no nos averíe empaques u otras partes del motor.
- Utilizar lubricantes secos como el grafito en los mecanismos del motor, ya que los lubricantes como aceites pueden crear capas de residuos de polvo y estos serán factores que no permitirán el adecuado funcionamiento.
- En el momento en el que se esté realizando el mecanizado de las piezas, utilizar las herramientas de corte adecuadas para dar un excelente acabado superficial, de lo contrario un mal acabado va a generar fricción entre las piezas.

BIBLIOGRAFIA

CREUS SOLE, ANTONIO. Instrumentación Industrial, editorial Marcombo, séptima edición, Barcelona España. 2007

DAVINCI, LEONARDO. Concursoespacial.com/trabajos2009/proyecto-stirling-2010-ies-leonardo-da-vinci.pdf

DIXON, Jerry. EnCORE On-demand service goes live (Online). (Londres, Reino Unido) Abr. 2011 (Visitado el 14 Dic, 2011). <http://blog.ocf.co.uk/?p=322>

FARRARONS, Roger. ¿Qué es el CFD? (Online). (Madrid, España) Oct. 2010 (Visitado el 9 Dic, 2011). <http://www.gadgets.com/noticias/4208/que-es-cfd/>

MAOCHO, FELIX. Wordpress.com/2012/03/11/robotica-el-motor-stirling-es-tan-sencillo-que-hasta-lo-puedes-construir-tu-mismo/

RODRIGUEZ, Natalia. CLASIFICACIÓN DEL FLUJO (Online). (Medellín, Colombia) Abr 2009. (Visitado el 4 de Mayo, 2012).

SMIHT Y CORRIPIO. Control Automático de Procesos. Editorial Limusa. 1984.

XCHANCE, Diecast. C209: the collection of my younger days (Online). (USA). Ago.2009 (visitado el 14 Mayo, 2012). <http://www.diecastxchange.com/forum1/topic/58066-c209-the-collection-of-my-younger-days/>

ANEXOS

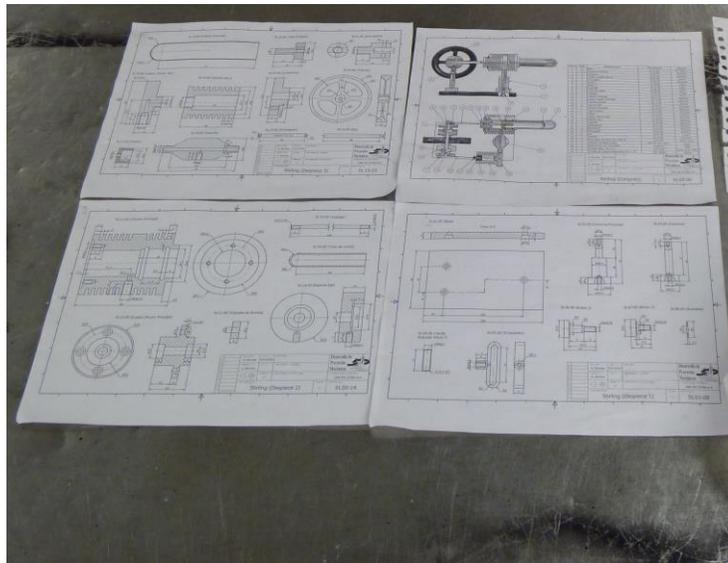
Construcción y montaje

Figura 1 – Marcado de materiales



Fuente: Autoría propia

Figura 2 – Análisis de planos



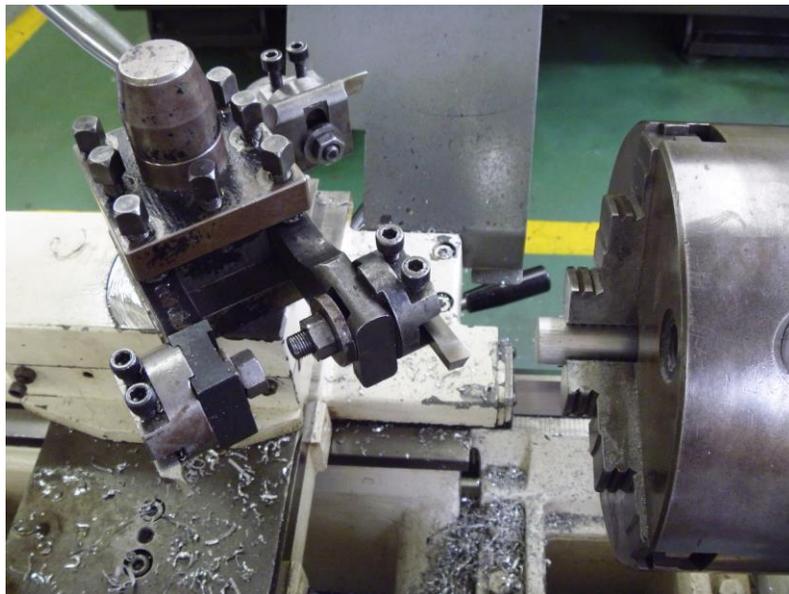
Fuente: Autoría propia

Figura 3 – Construcción del soporte para la volante



Fuente: Autoría propia

Figura 4 – Construcción del soporte para el foco caliente



Fuente: Autoría propia

Figura 5 – Bulón 1 y 2 mecanizados



Fuente: Autoría propia

Figura 6 – Piezas mecanizadas



Fuente: Autoría propia

Figura 7 – Molde para la base del motor



Fuente: Autoría propia

Figura 8 – Base del motor



Fuente: Autoría propia

Figura 9 – Construcción de la volante



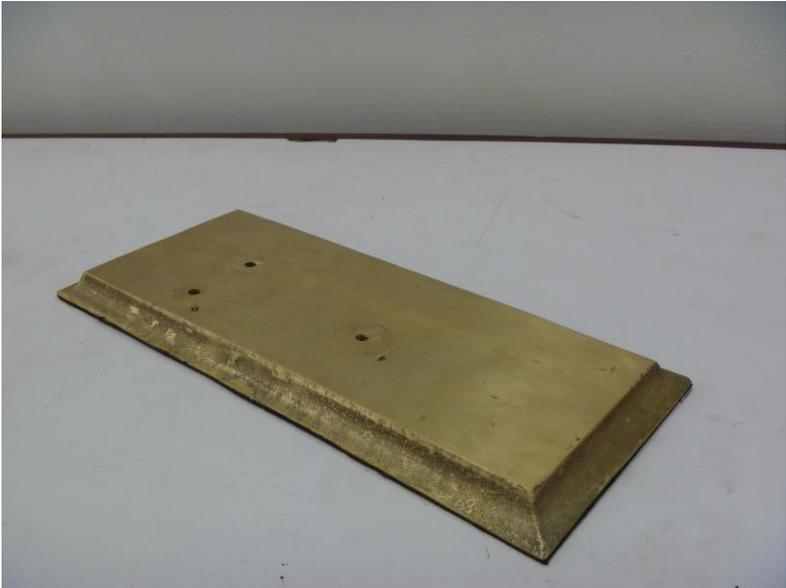
Fuente: Autoría propia

Figura 10 – Construcción del tapón para el foco caliente



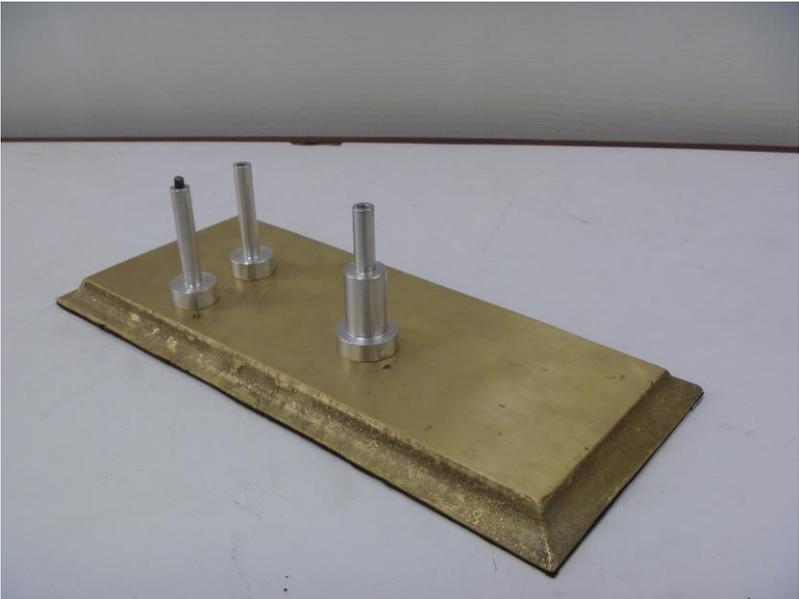
Fuente: Autoría propia

Figura 11 – Base perforada



Fuente: Autoría propia

Figura 12 – Montaje de las bases del foco frío y caliente



Fuente: Autoría propia

Figura 13 – Montaje de soportes para la volante



Fuente: Autoría propia

Figura 14 – Montaje del intercambiador de calor



Fuente: Autoría propia

Figura 15 – Montaje de la volante



Fuente: Autoría propia

Figura 16 – Montaje del sistema de movimiento rotatorio



Fuente: Autoría propia

Figura 17 – Montaje del foco frio



Fuente: Autoría propia

Figura 18 – Montaje del foco caliente



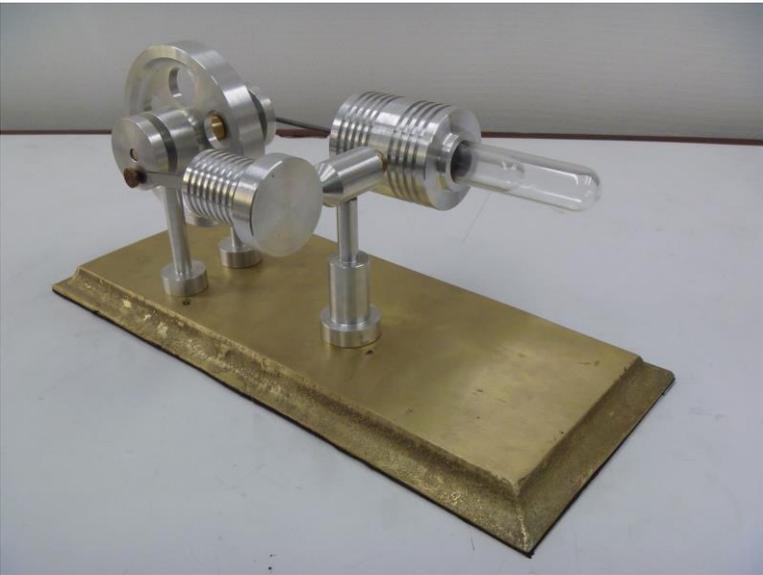
Fuente: Autoría propia

Figura 19 – Montaje del pistón



Fuente: Autoría propia

Figura 20 – Montaje del tubo de cristal



Fuente: Autoría propia

Figura 21 – Montaje del mechero de alcohol



Fuente: Autoría propia

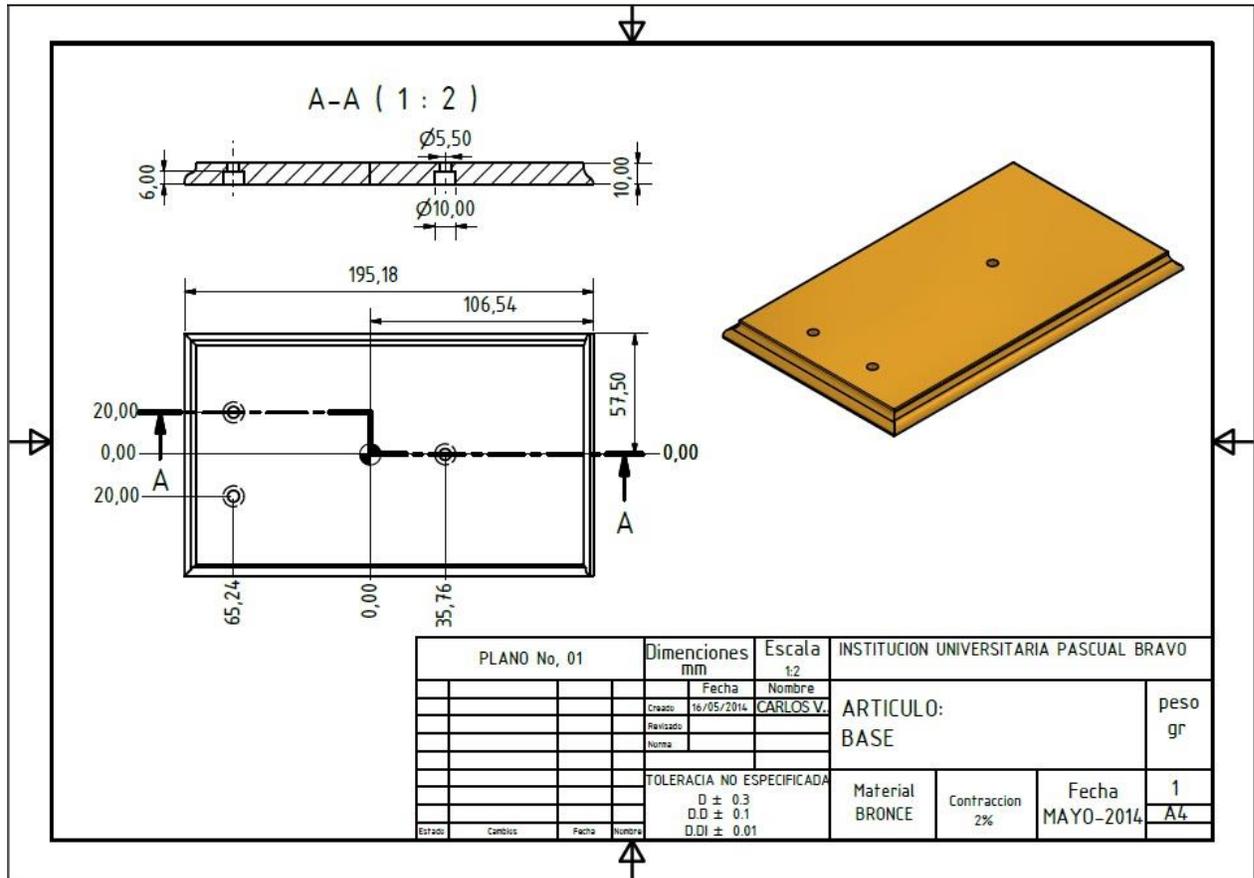
Figura 22 – Puesta en marcha del motor



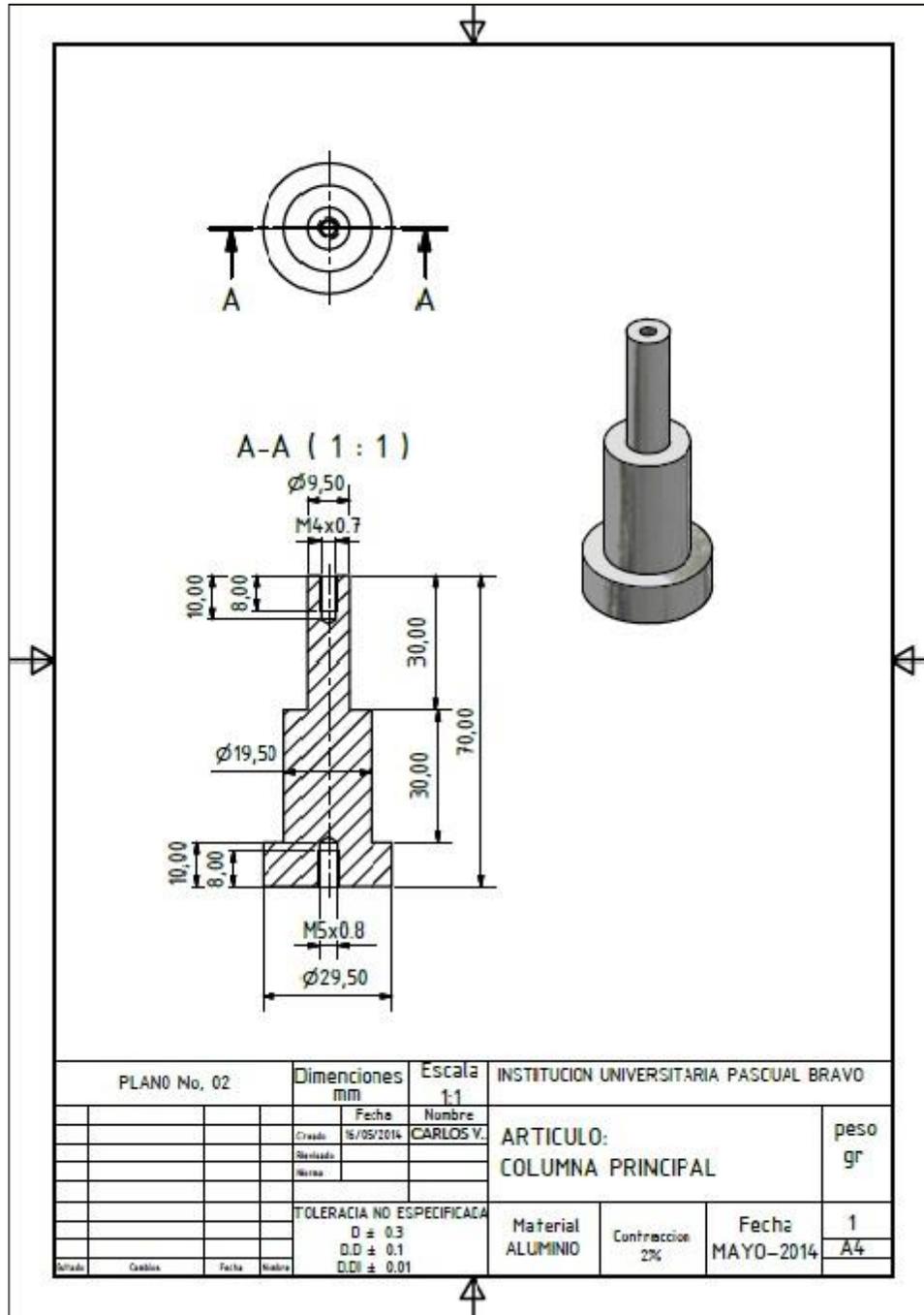
Fuente: Autoría propia

Planos

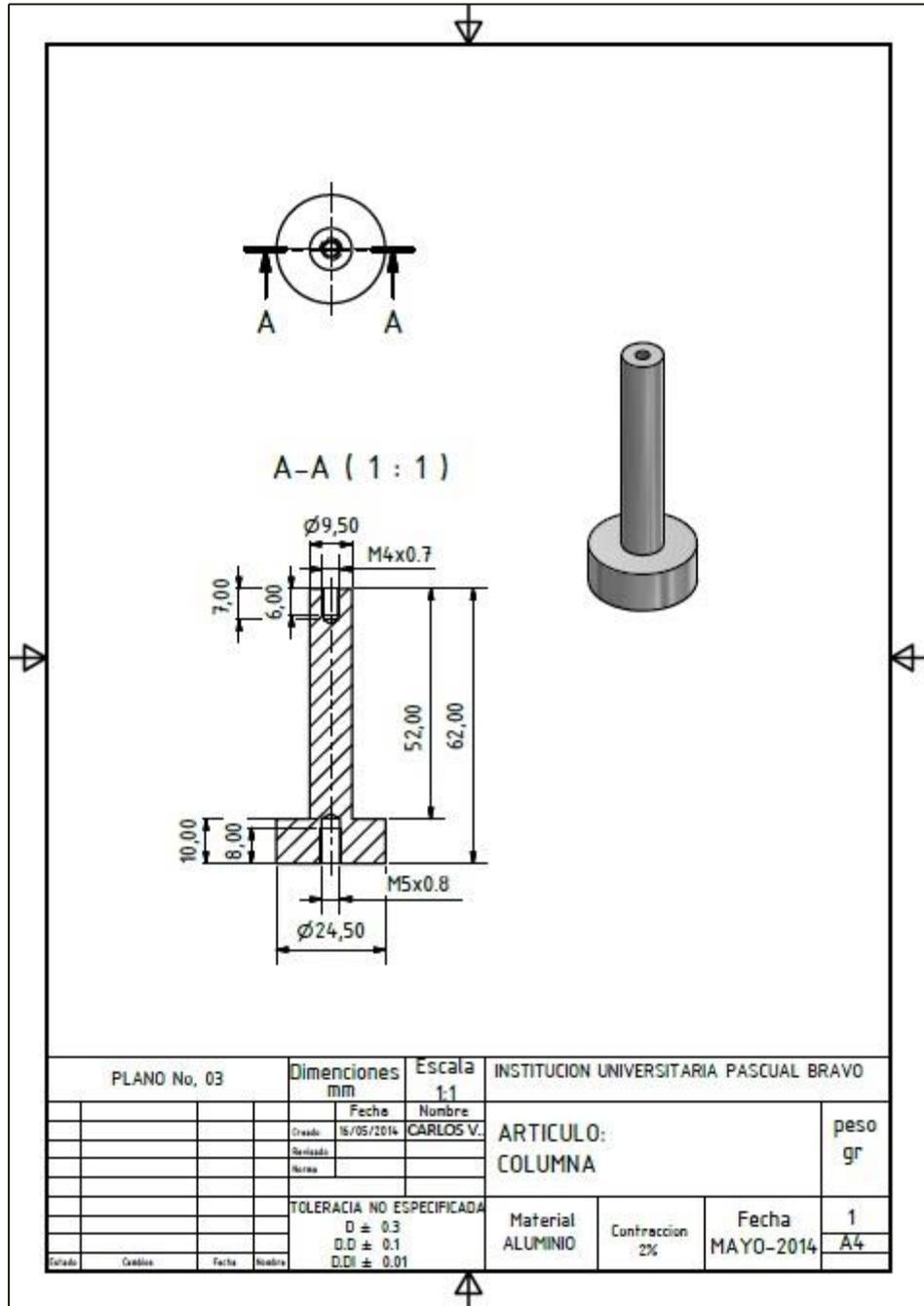
Plano 1 - Base



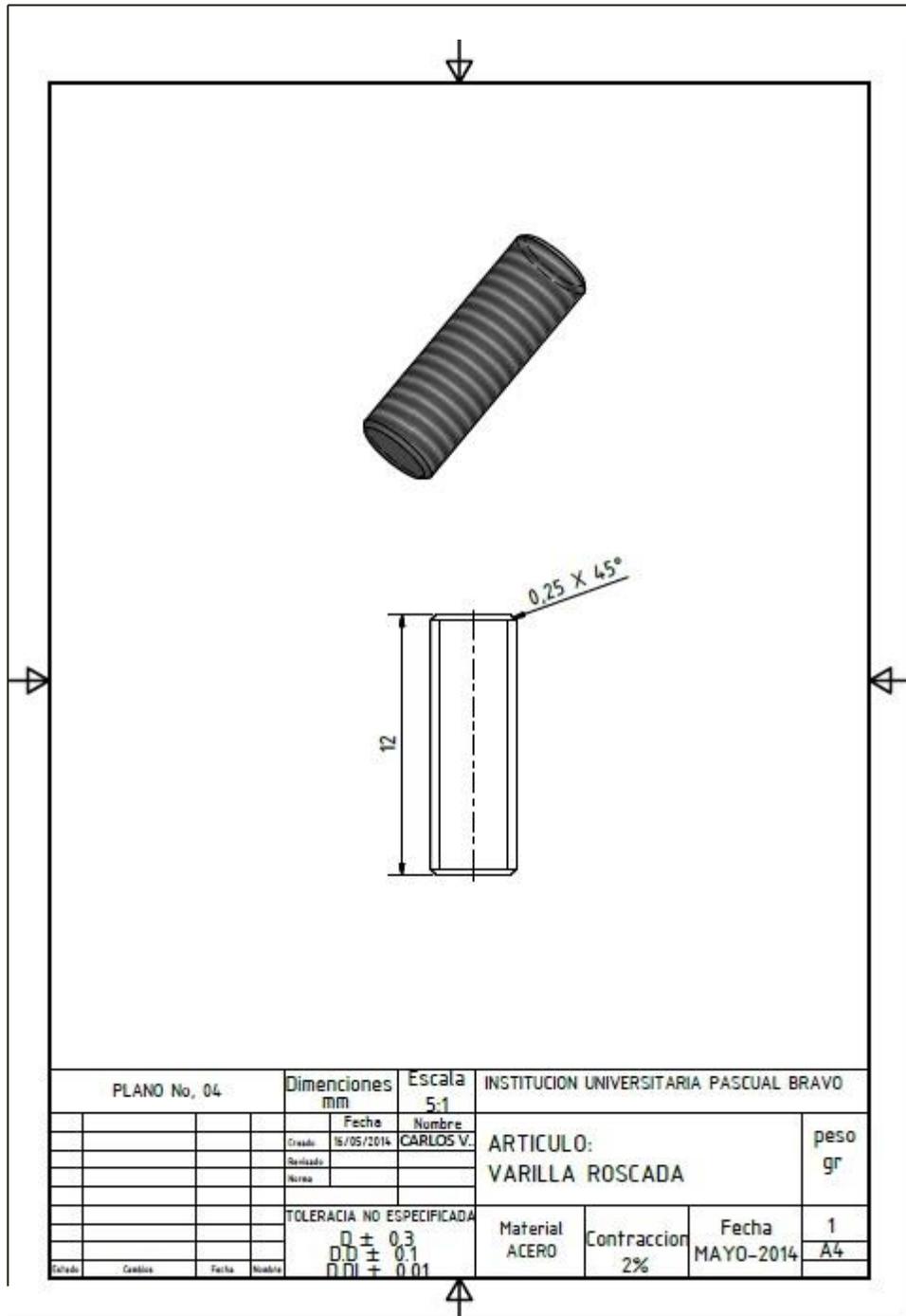
Plano 2 – Columna principal



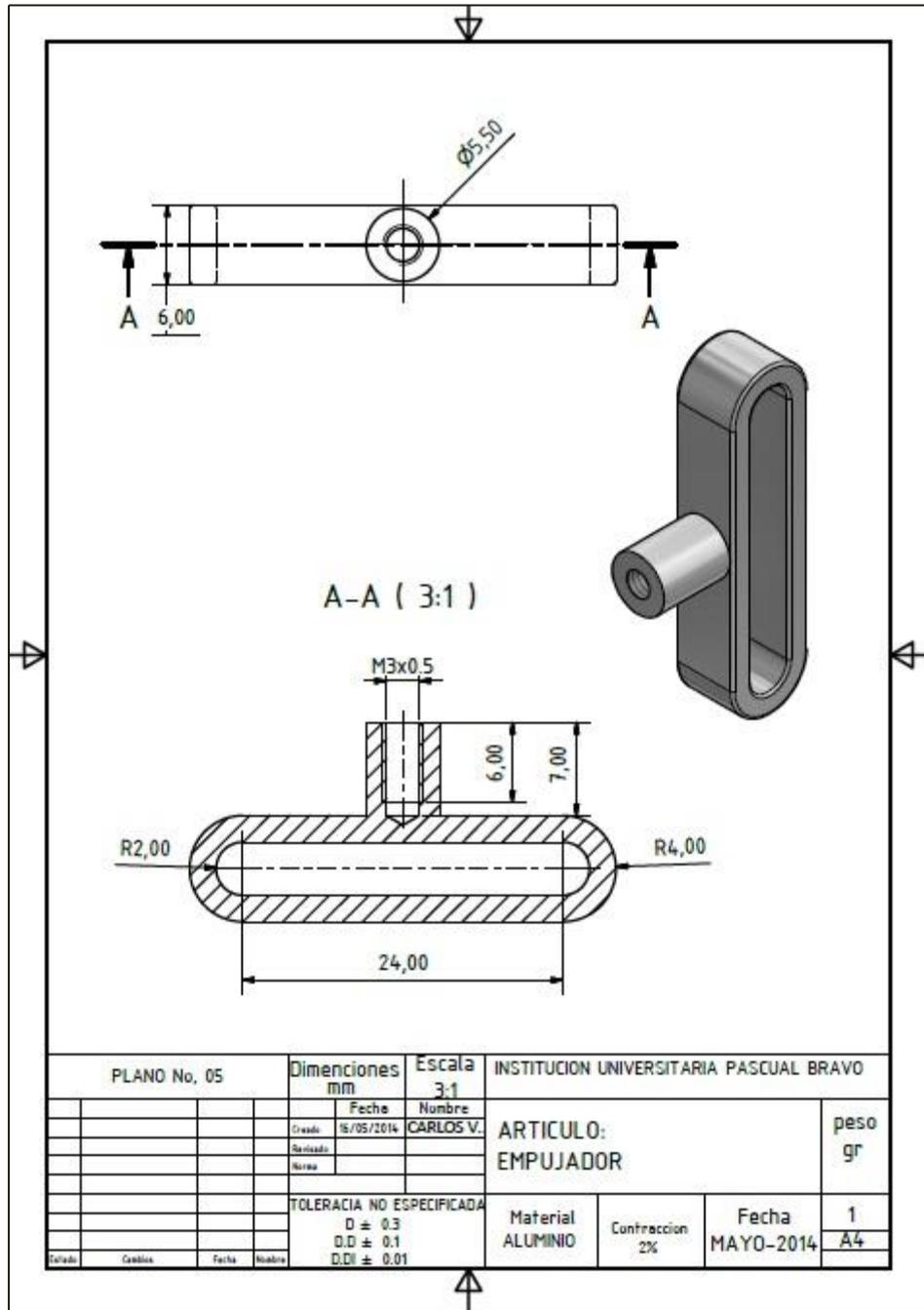
Plano 3 - Columna



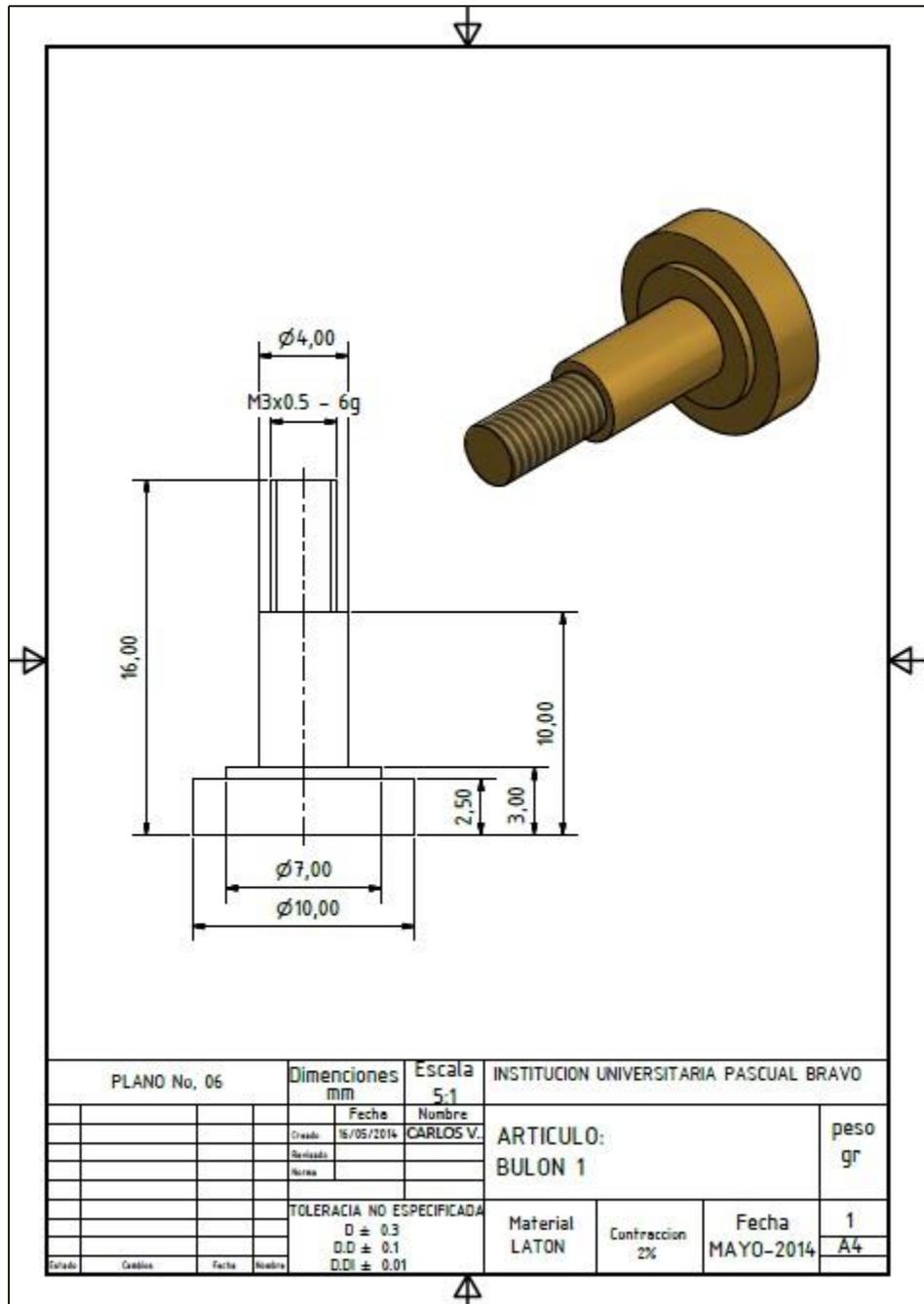
Plano 4 – Varilla roscada



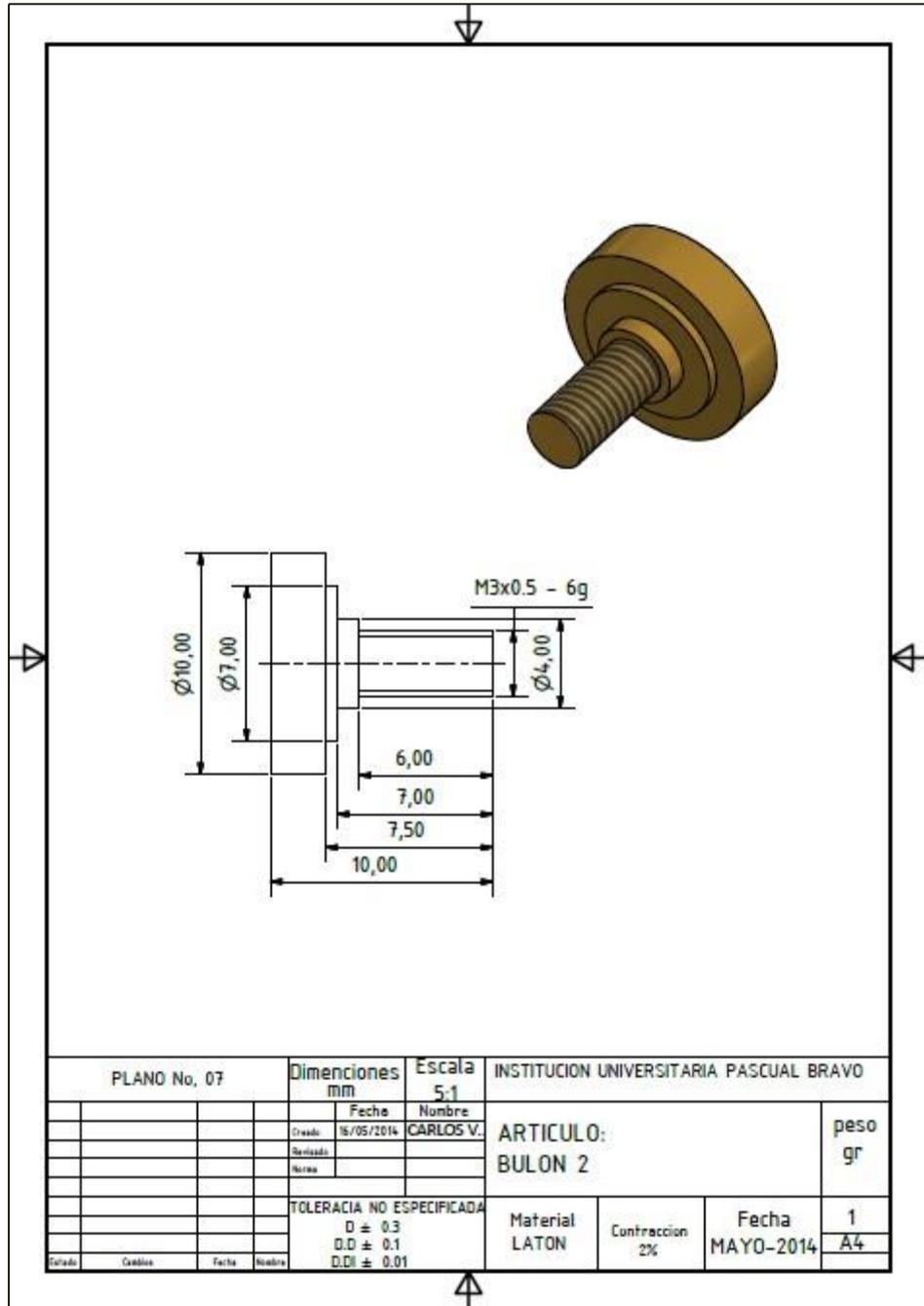
Plano 5 – Empujador 1



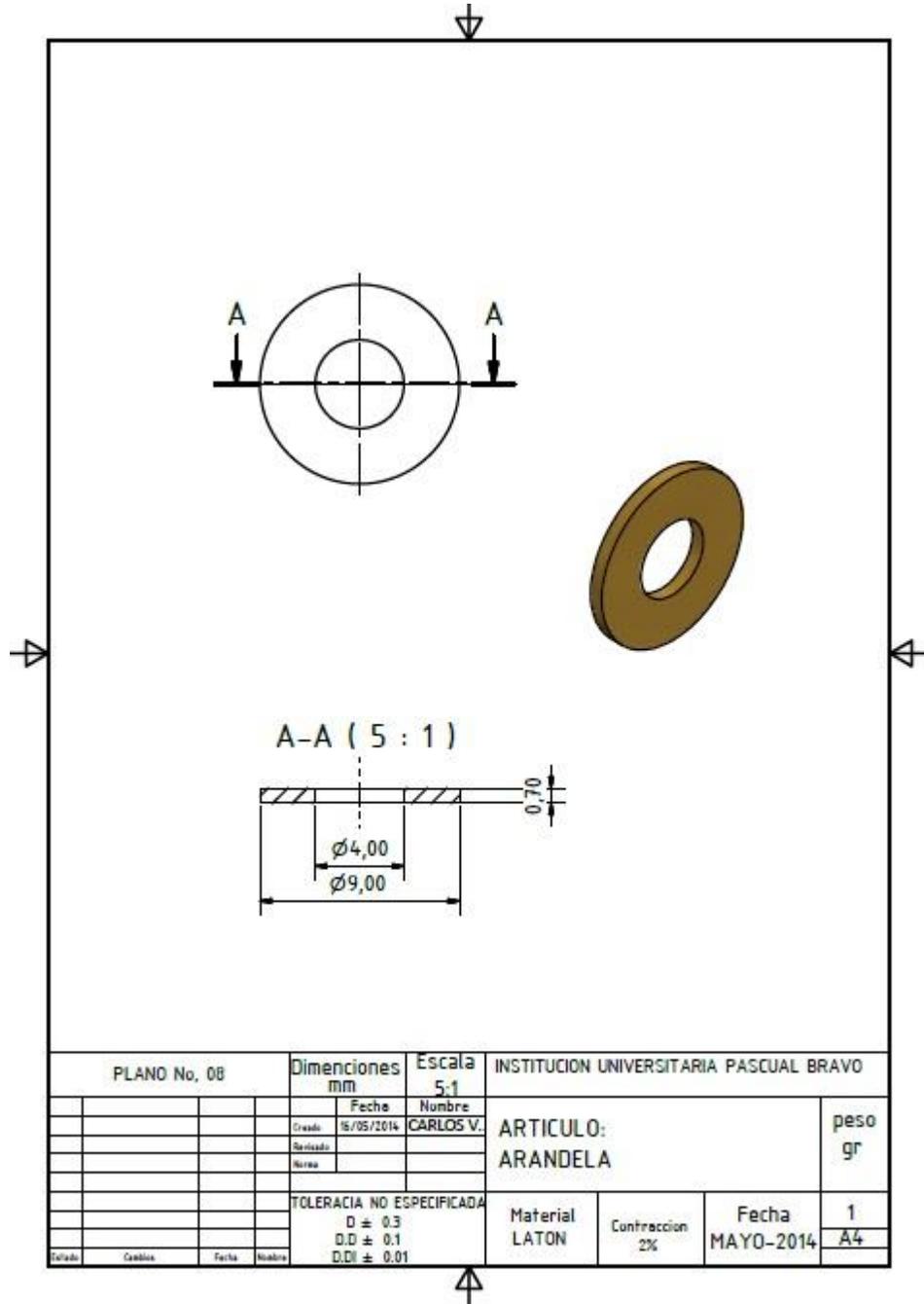
Plano 6 – Bulón 1



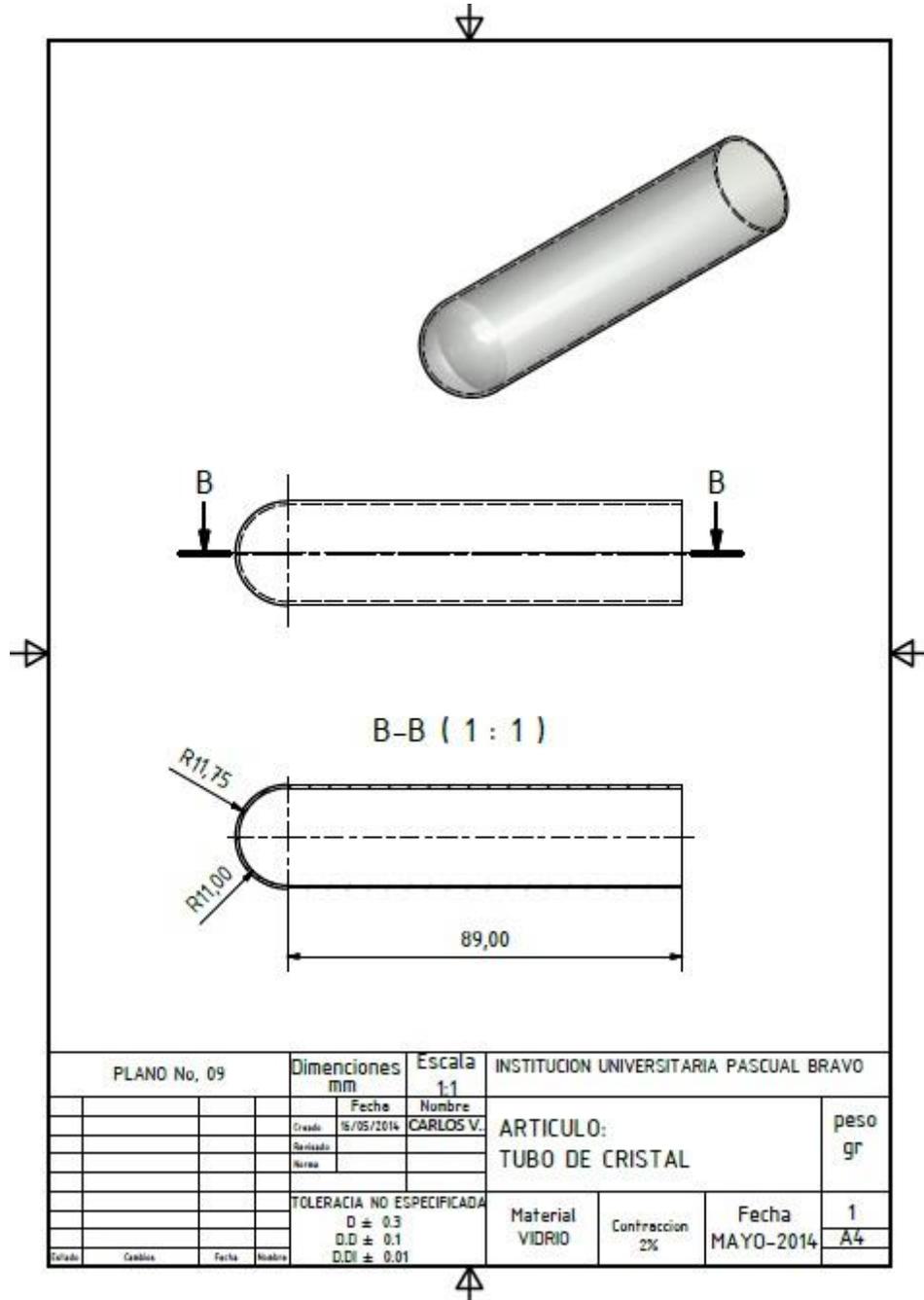
Plano 7 – Bulón 2



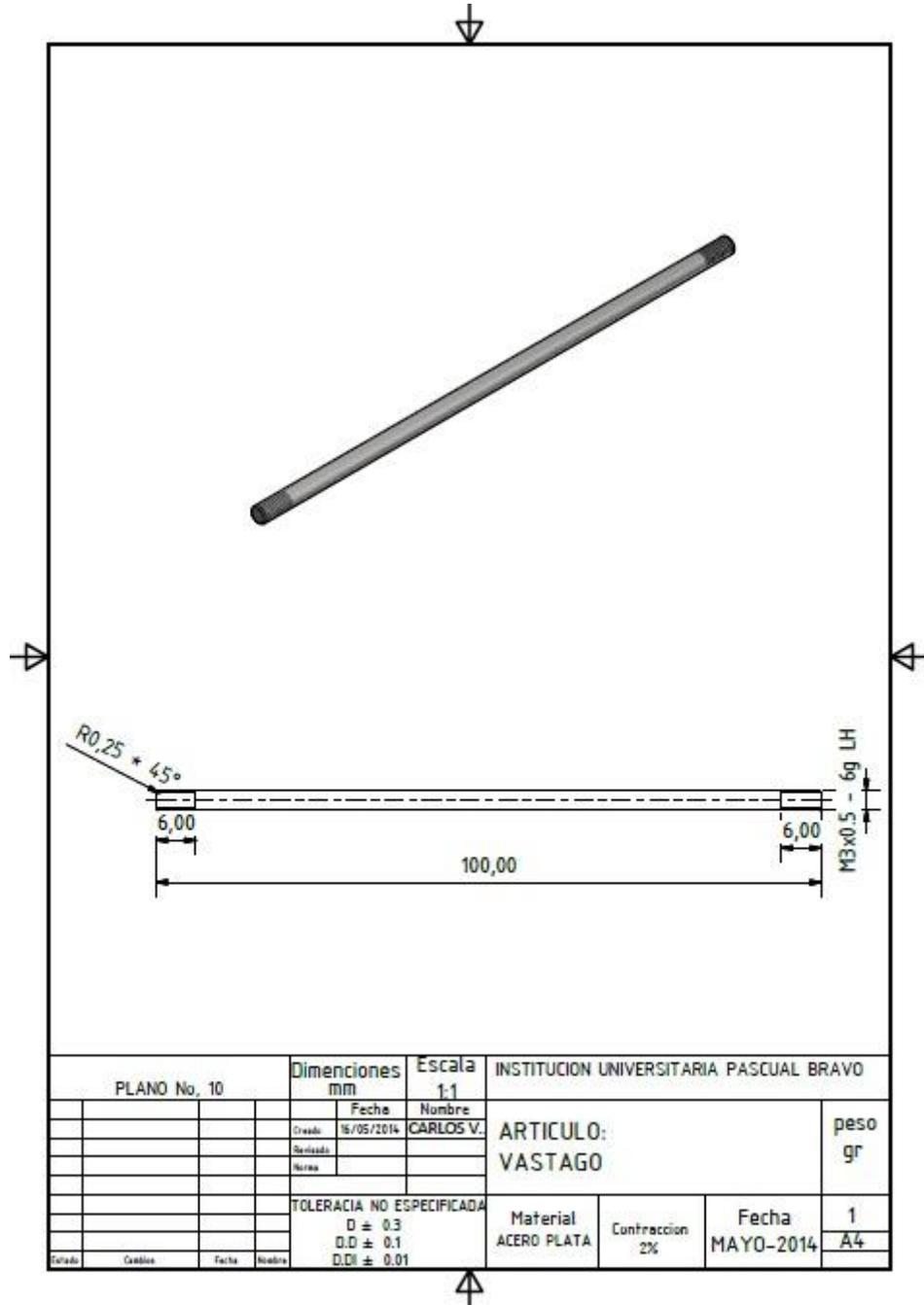
Plano 8 – Arandela



Plano 9 – Tubo de Cristal

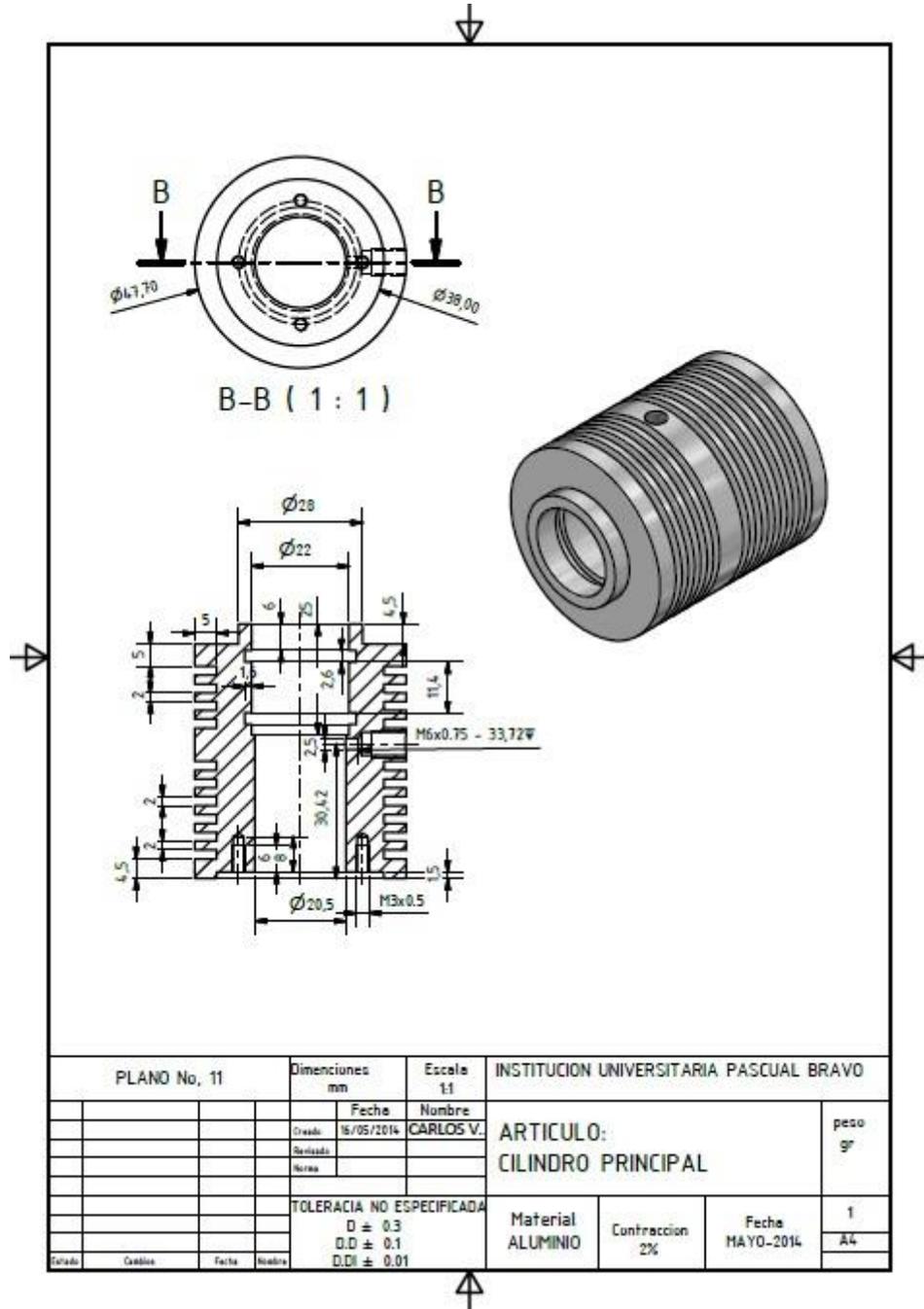


Plano 10 – Vástago

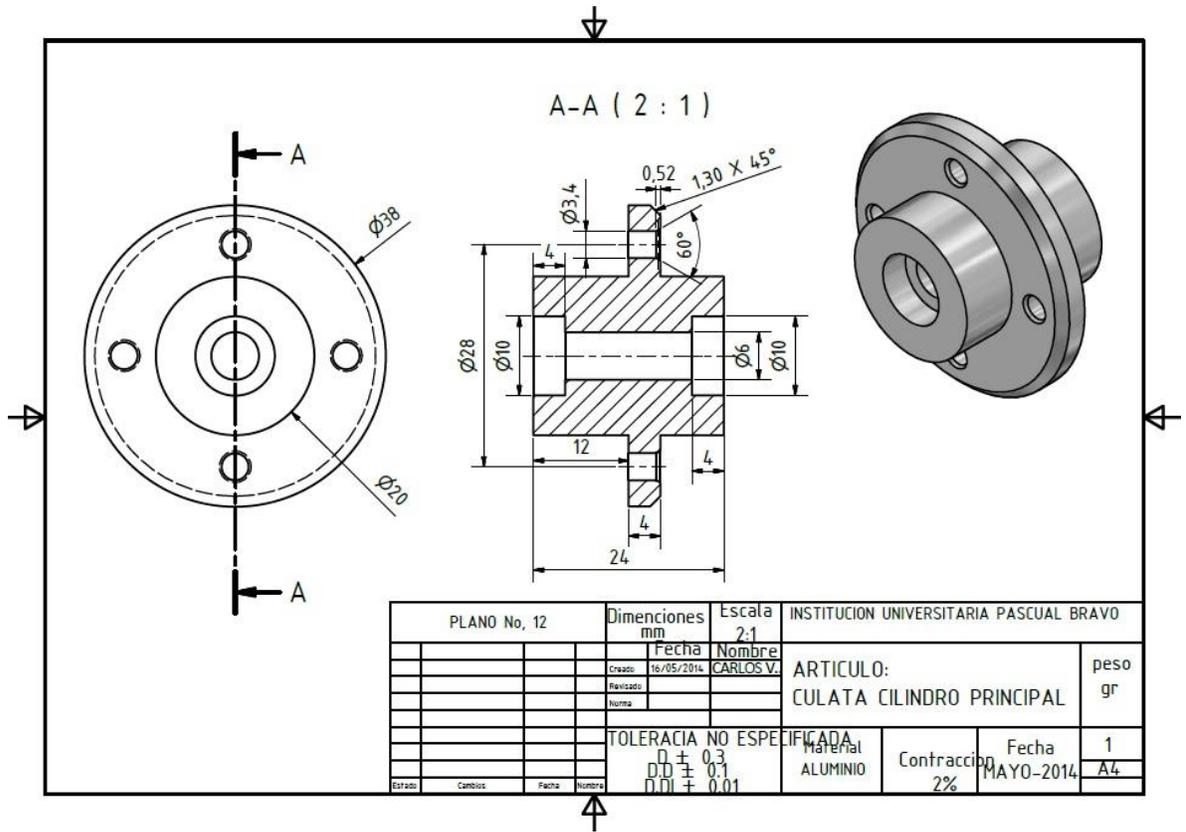


PLANO No. 10		Dimensiones mm	Escala 1:1	INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO	
		Fecha	Nombre	ARTICULO: VASTAGO	peso gr
		Creado 16/05/2014	CARLOS V.		
		Revisado			
		Norma			
		TOLERANCIA NO ESPECIFICADA		Material	Fecha
				ACERO PLATA	MAYO-2014
				Contraccion 2%	1
					A4

Plano 11 – Cilindro principal

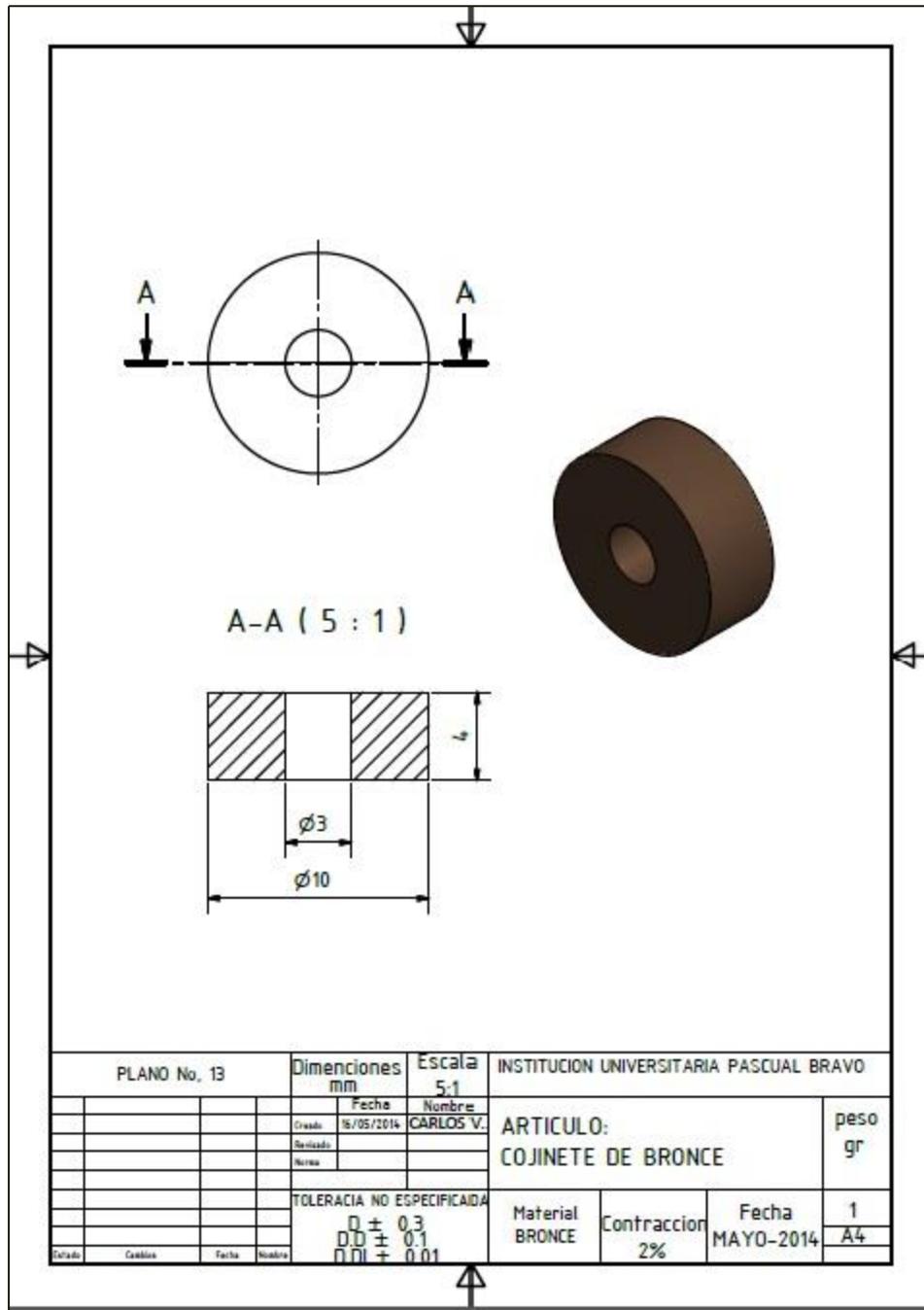


Plano 12 – Culata cilindro principal

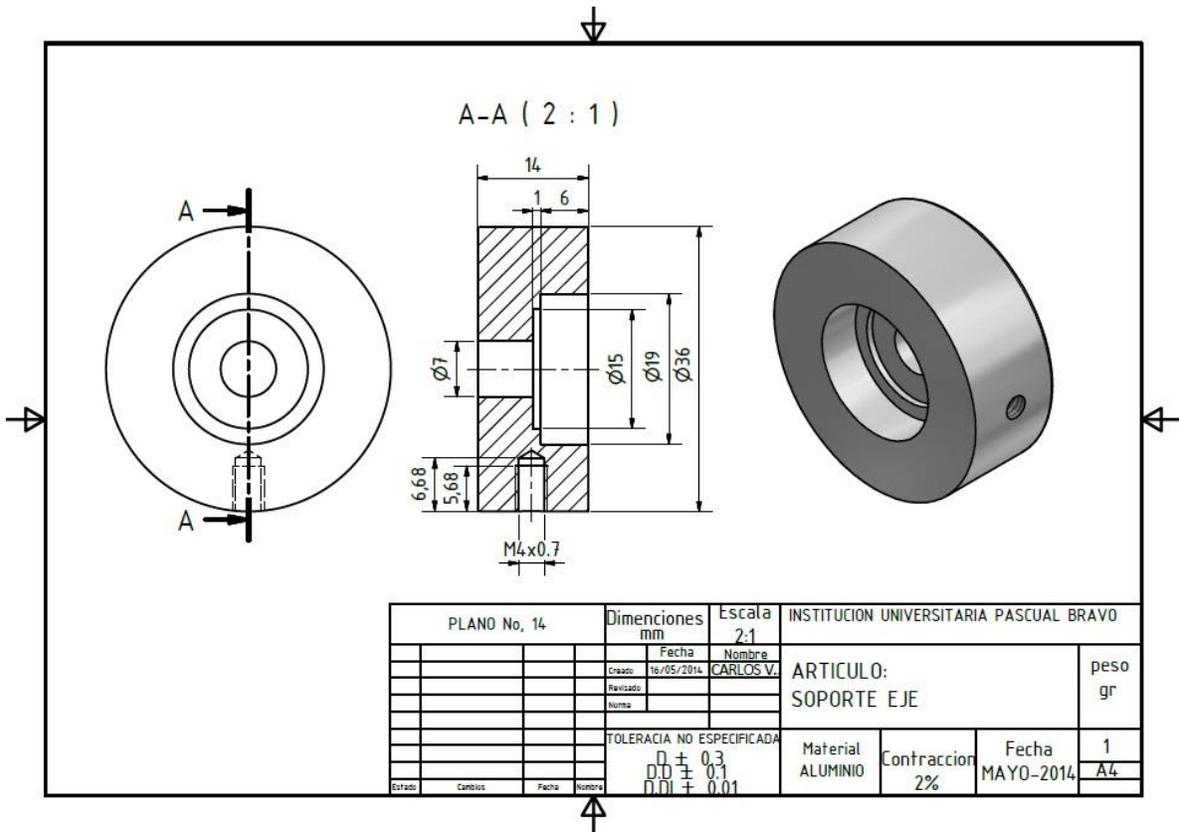


PLANO No, 12		Dimensiones mm	Escala 2:1	INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO	
		Fecha	Nombre		
		Creado 16/05/2014	CARLOS V.	ARTICULO:	
		Revisado		CULATA CILINDRO PRINCIPAL	
		Norma		peso	
				gr	
		TOLERANCIA NO ESPECIFICADA			
		$D \pm 0.3$	MATERIAL	Contracción	Fecha
		$DD \pm 0.1$	ALUMINIO	2%	MAYO-2014
		$DDI \pm 0.01$			1
Estado	Cambios	Fecha	Nombre		A4

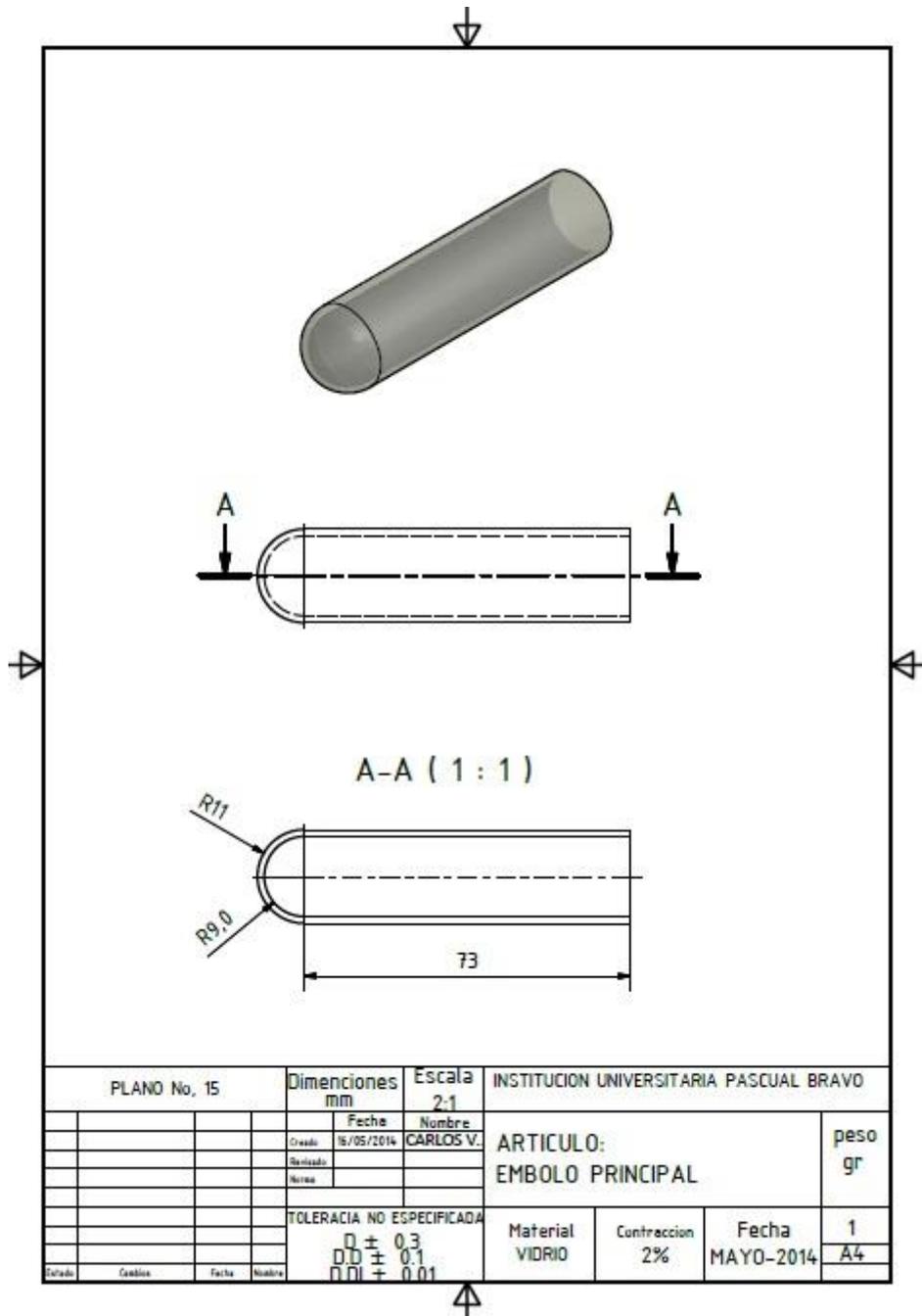
Plano 13 – Cojinete de bronce



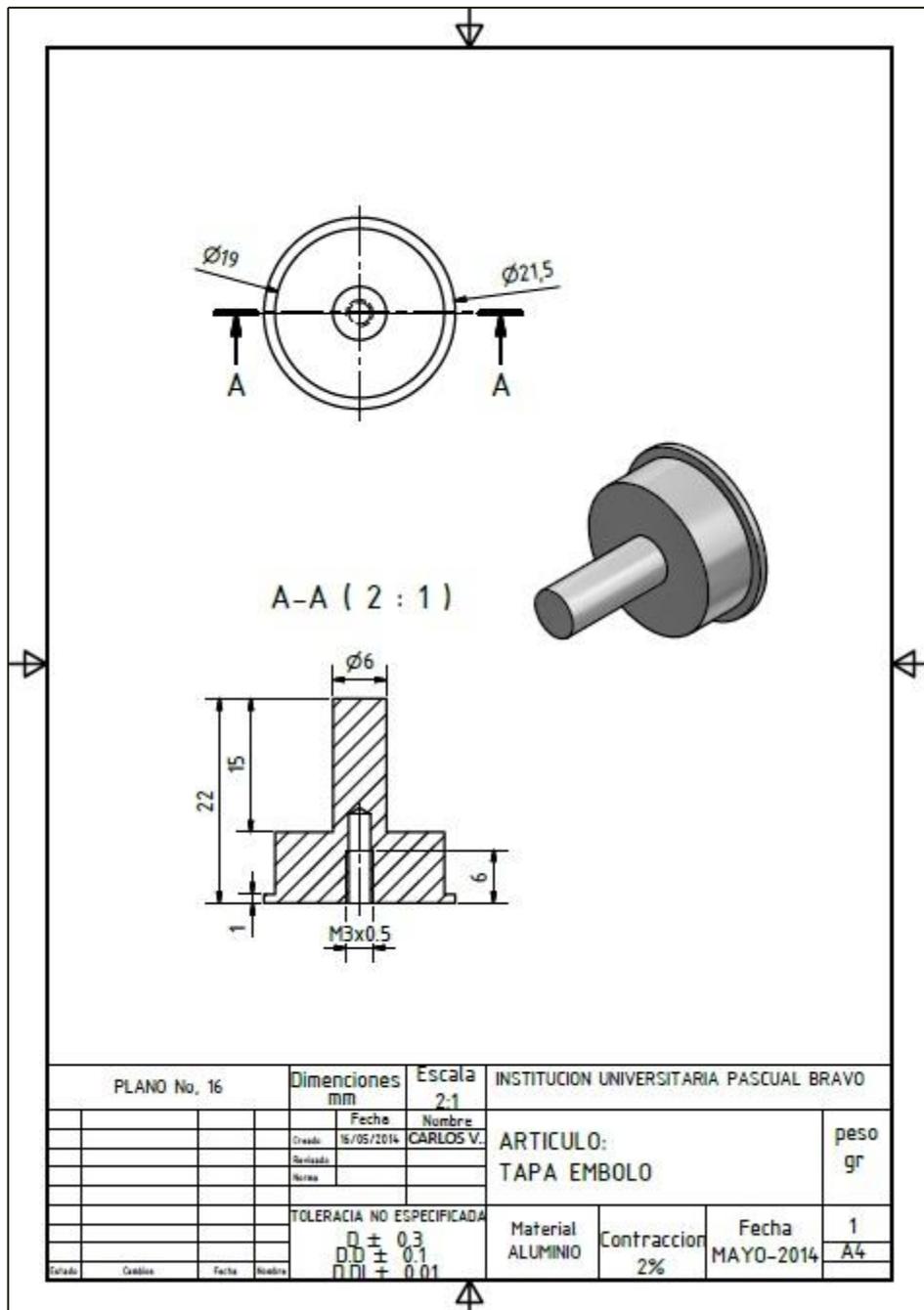
Plano 14 – Soporte eje



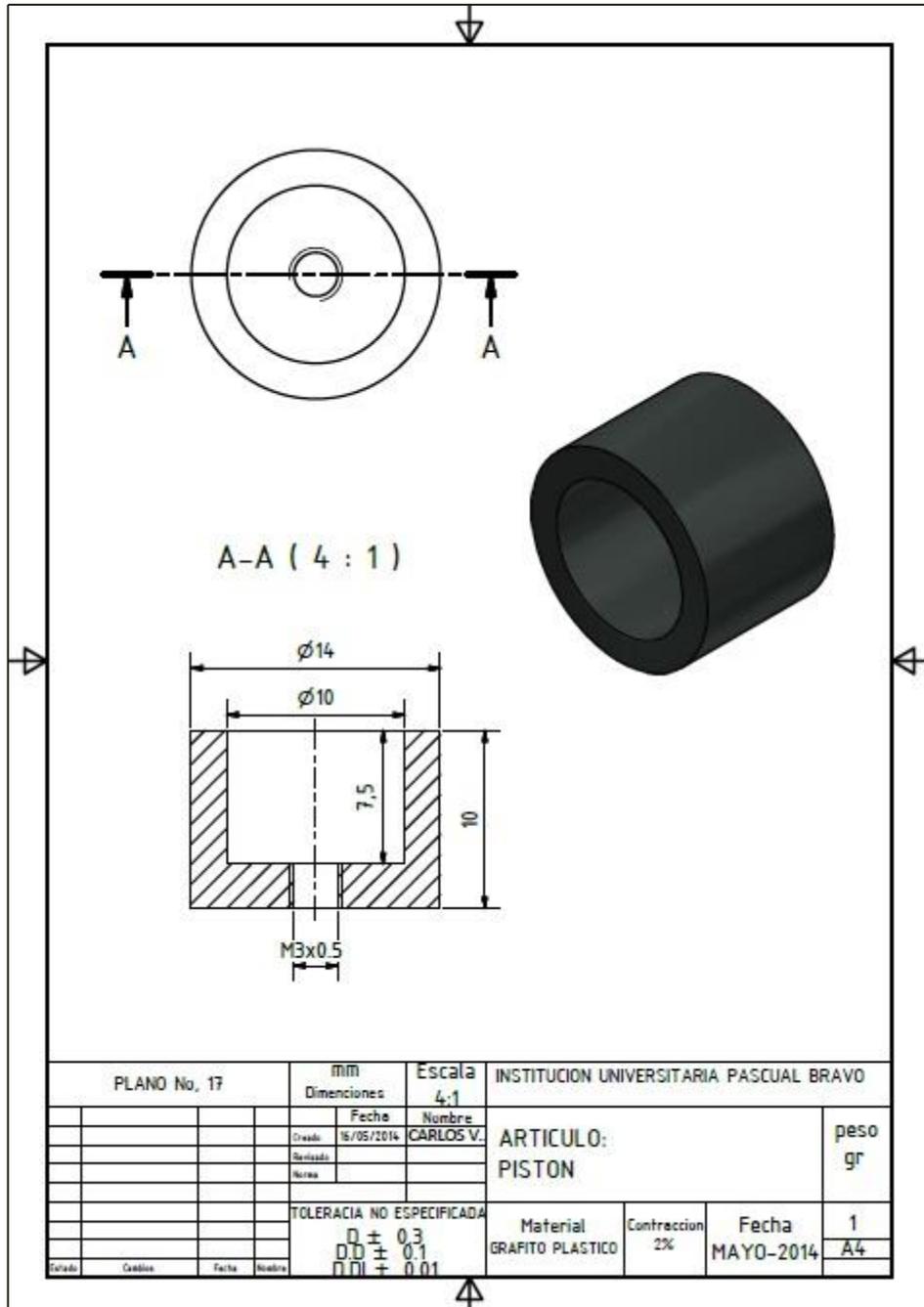
Plano 15 – Embolo principal



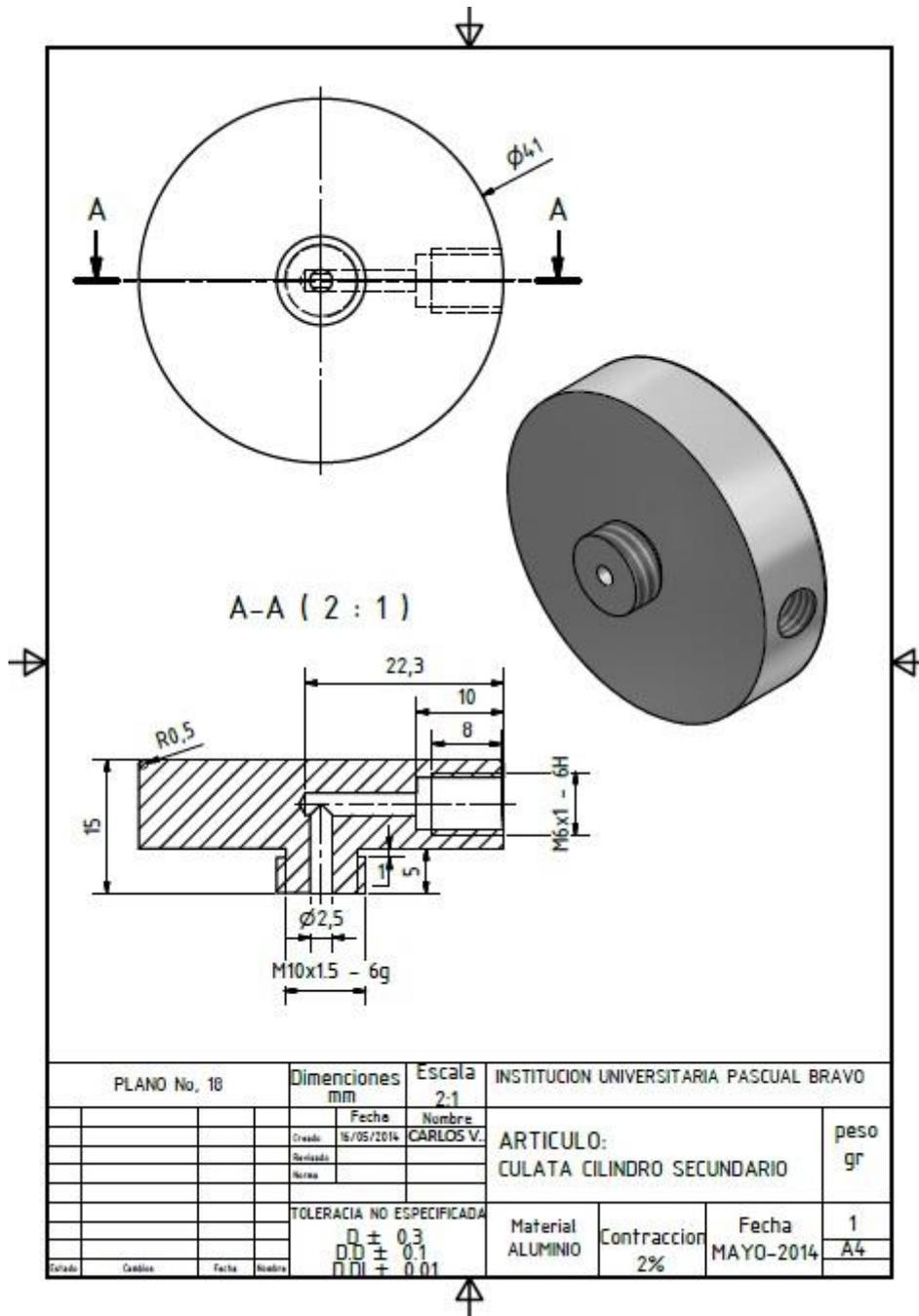
Plano 16 – Tapa émbolo



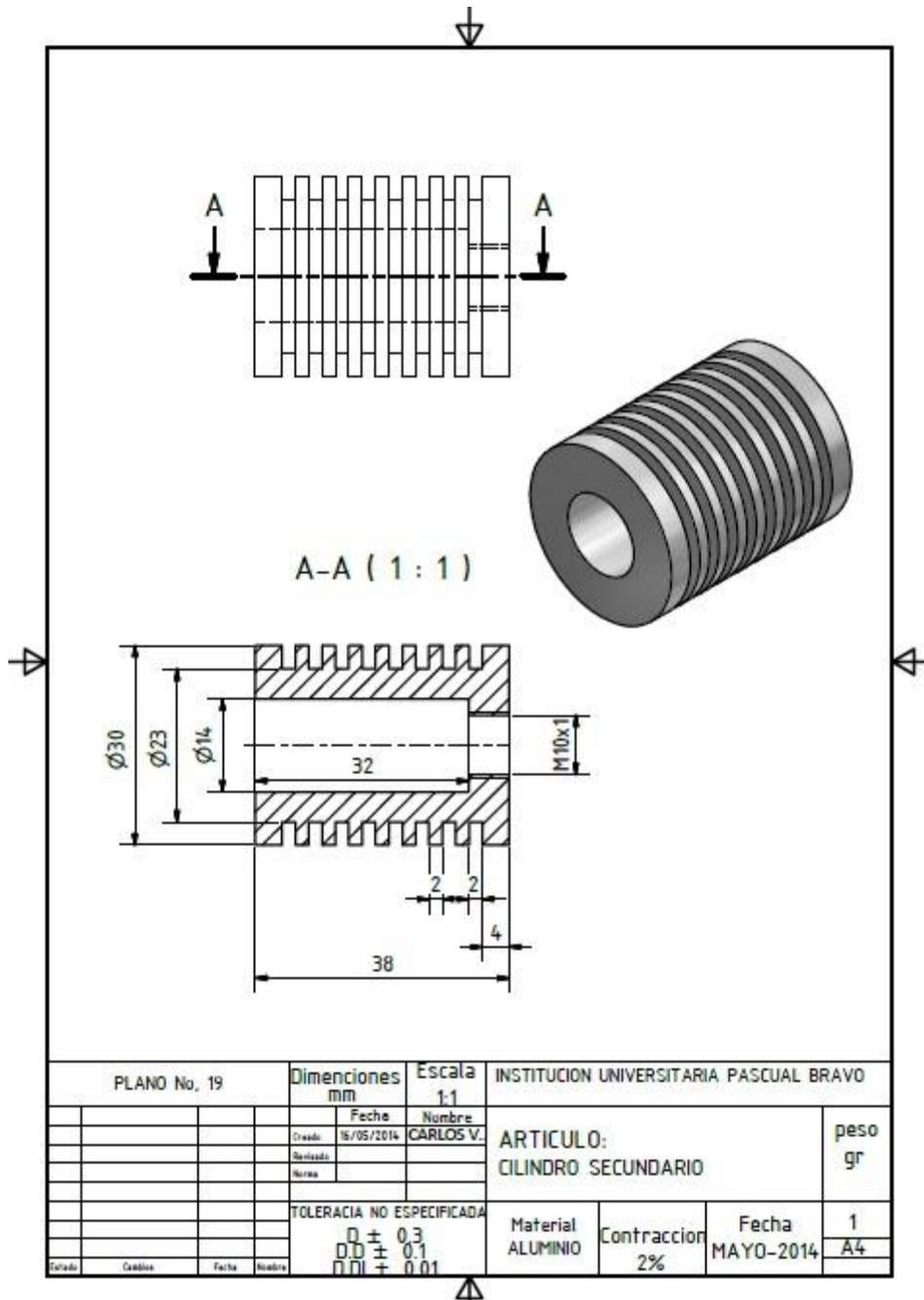
Plano 17 – Piston



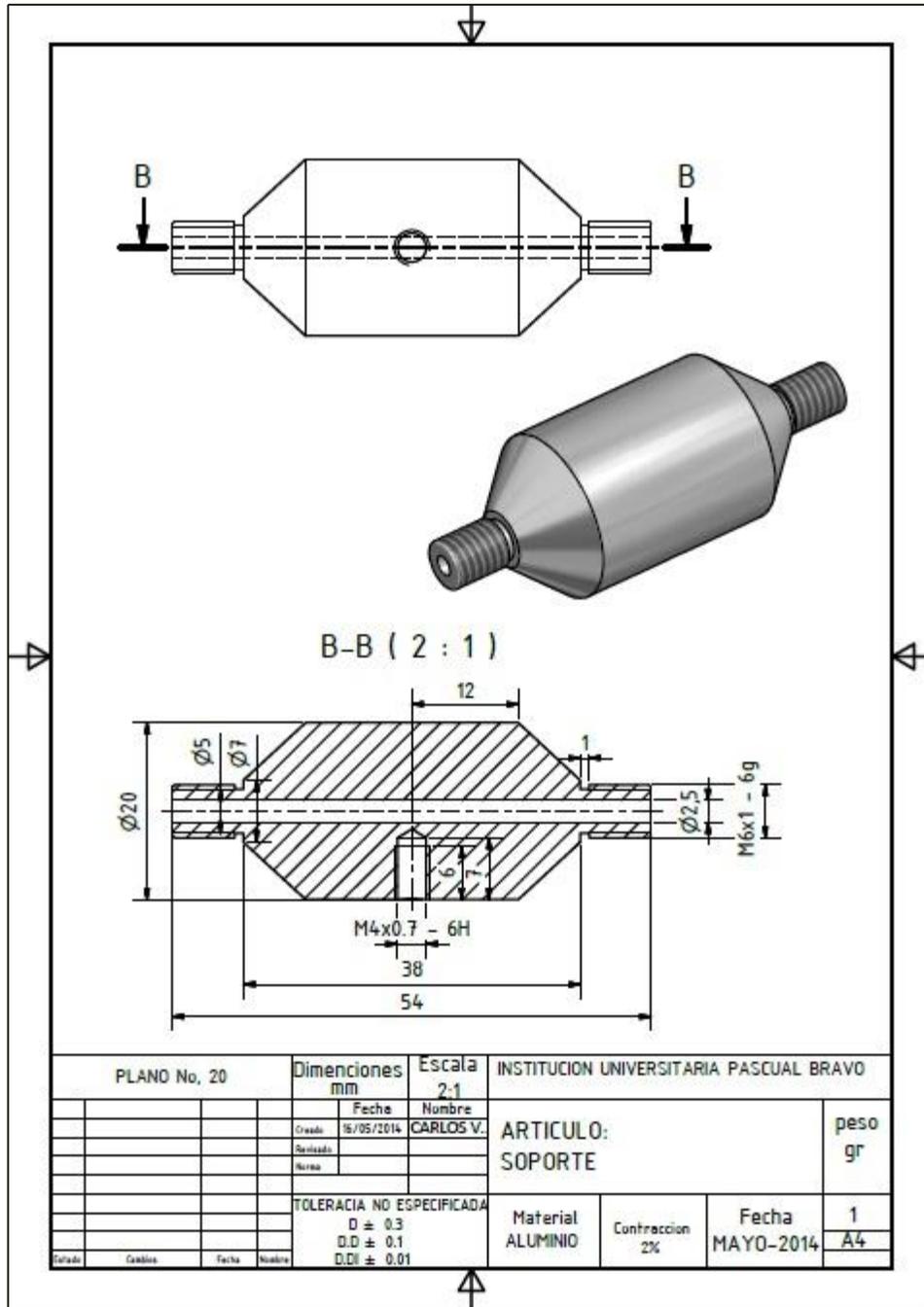
Plano 18 – Culata cilindro secundario



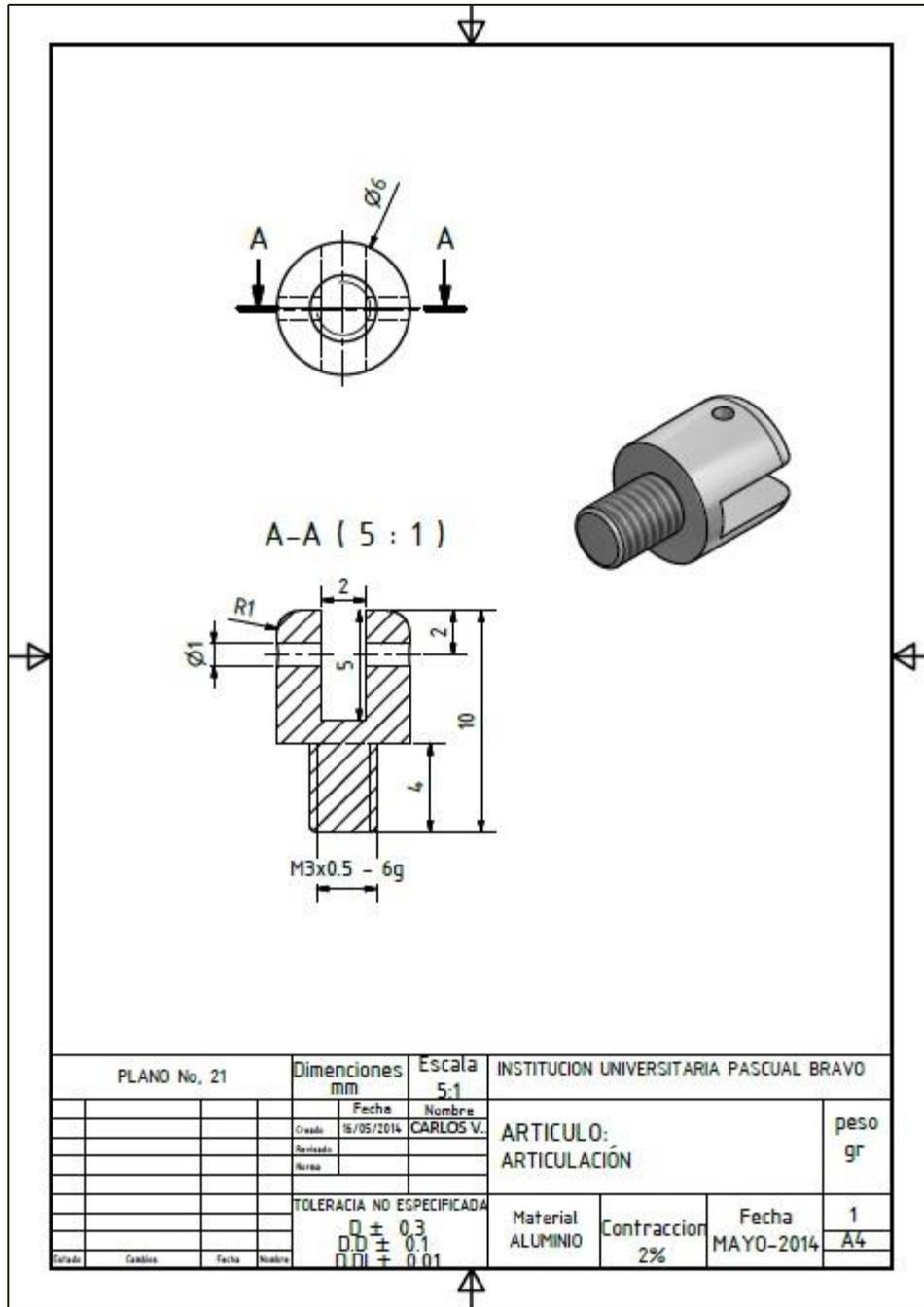
Plano 19 – Cilindro secundario



Plano 20 – Soporte

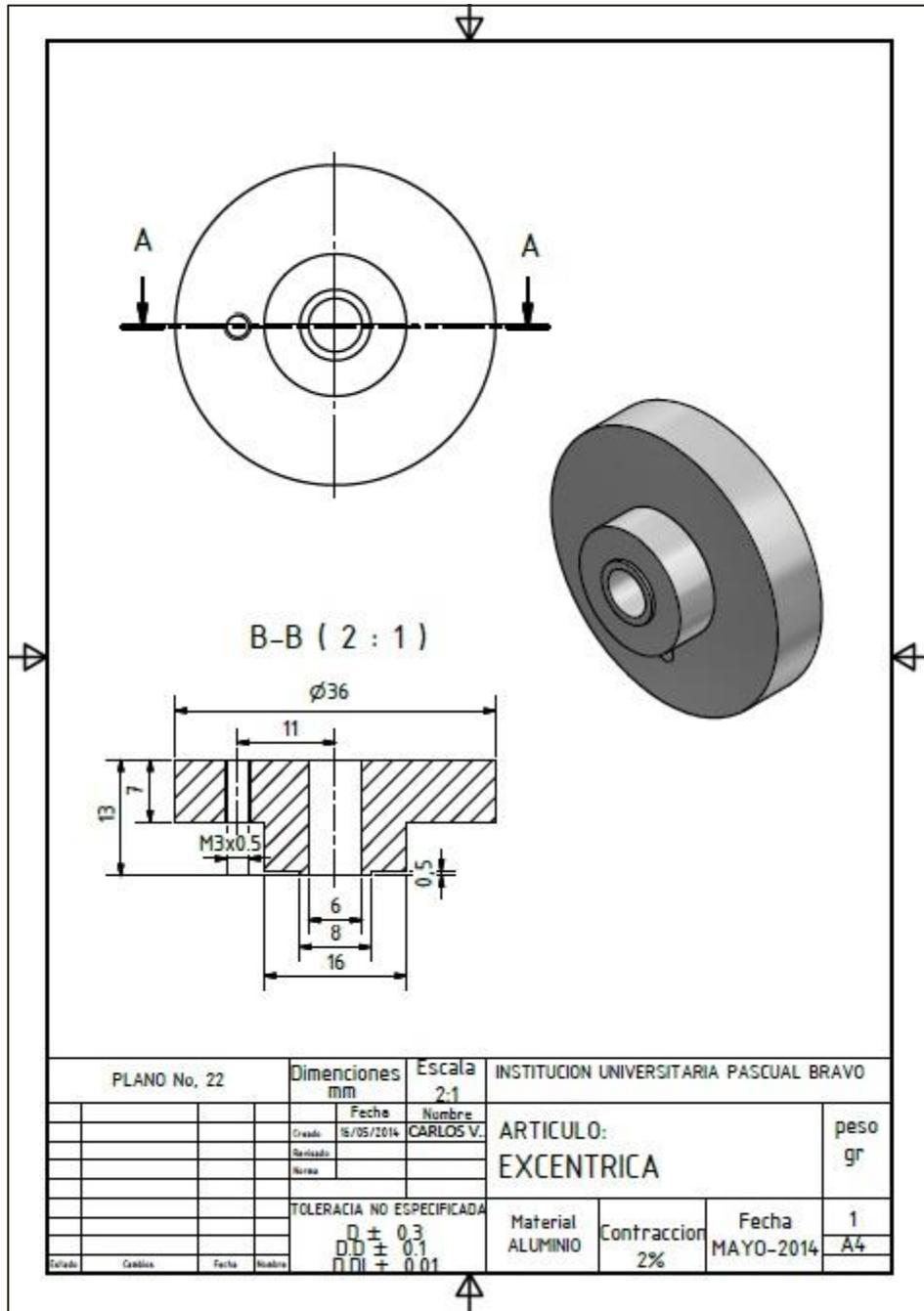


Plano 21 – Articulación

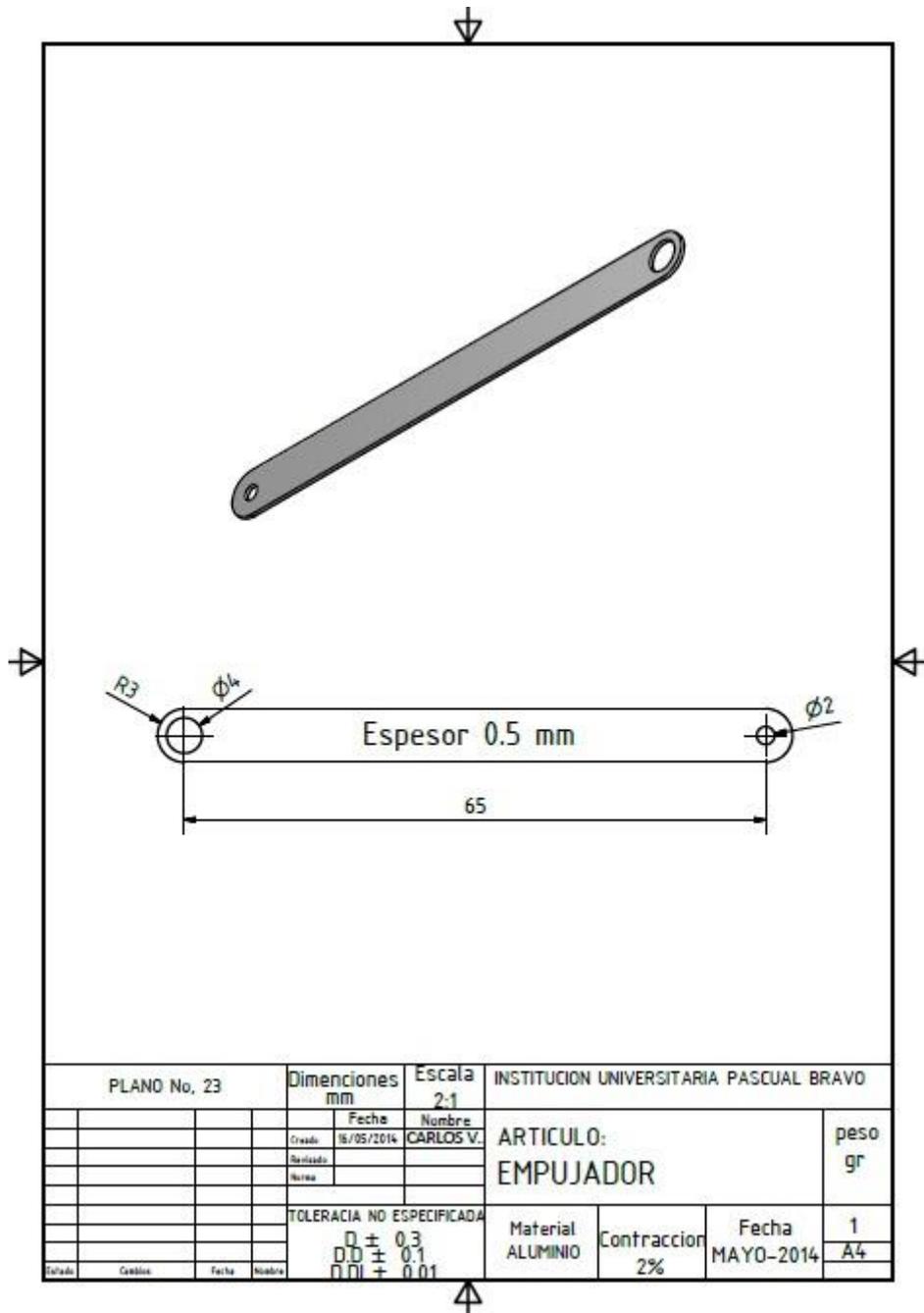


PLANO No. 21		Dimensiones mm	Escala 5:1	INSTITUCION UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO		
		Fecha	Nombre	ARTICULO: ARTICULACIÓN		peso gr
		Creado 16/05/2014	CARLOS V.			
		Revisado				
		Norma				
TOLERANCIA NO ESPECIFICADA				Material	Contraccion	Fecha
0 ± 0.3				ALUMINIO	2%	1
0.0 ± 0.1						A4
0.01 ± 0.01						

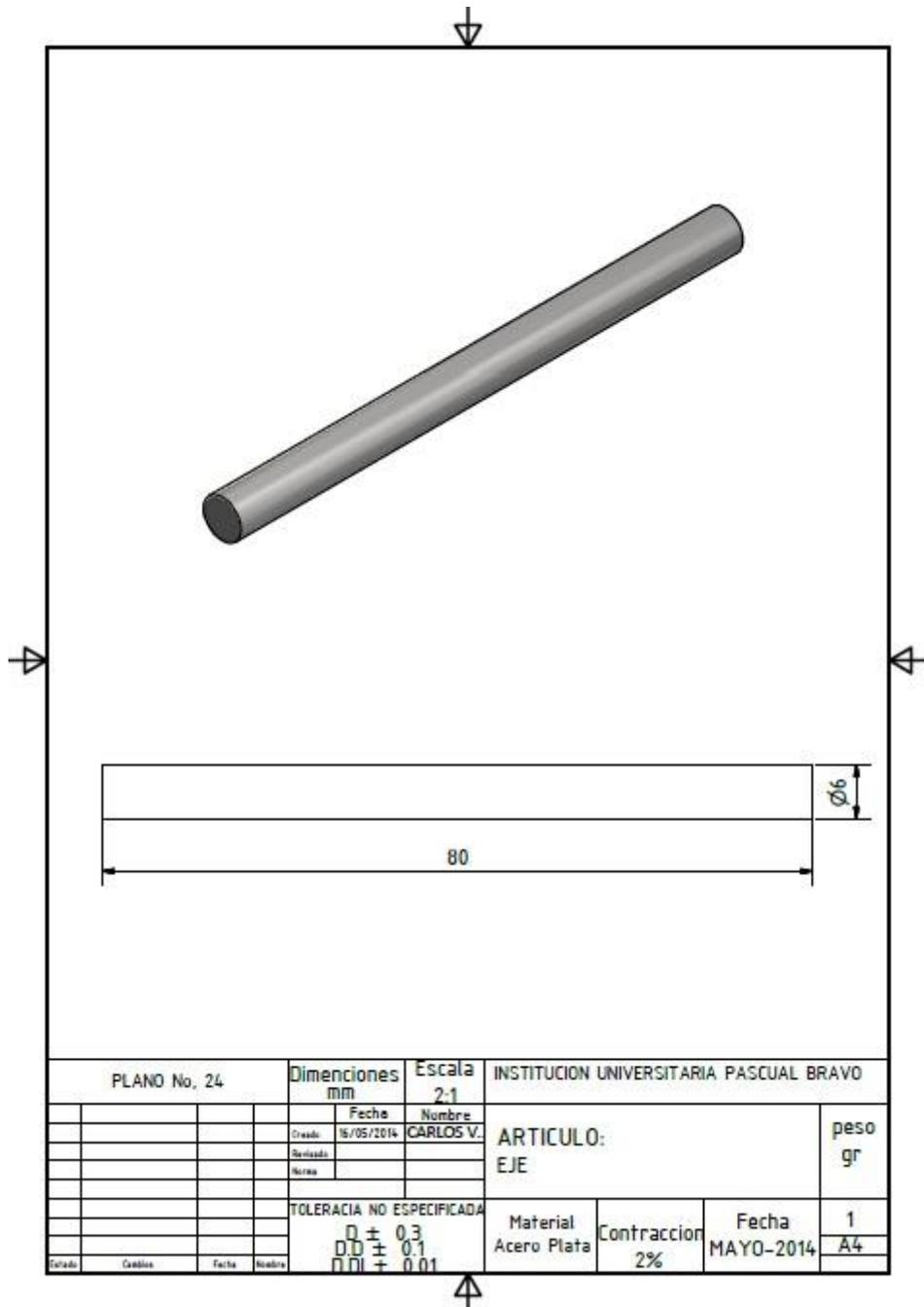
Plano 22 – Excéntrica



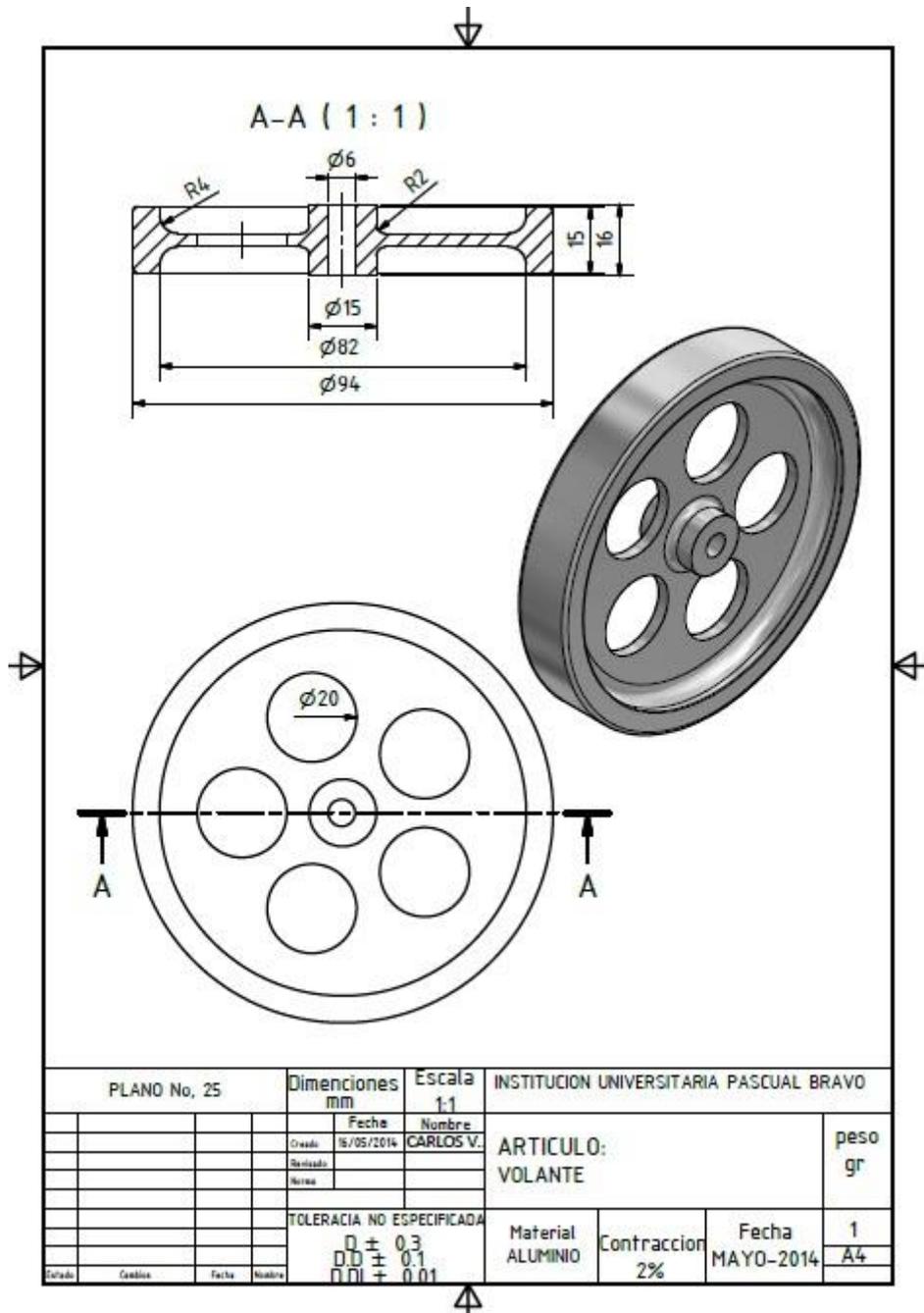
Plano 23 – Empujador 2



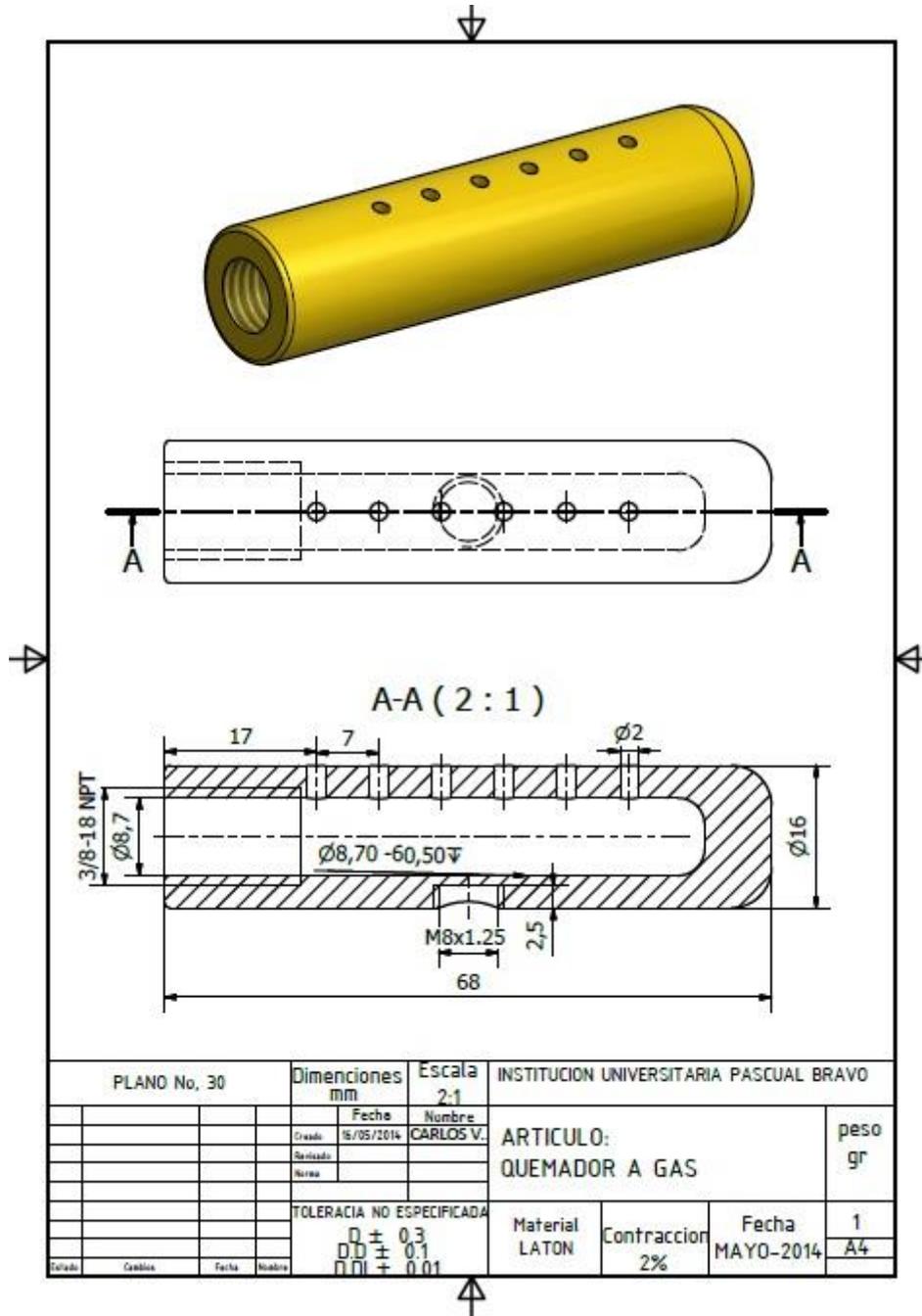
Plano 24 – Eje



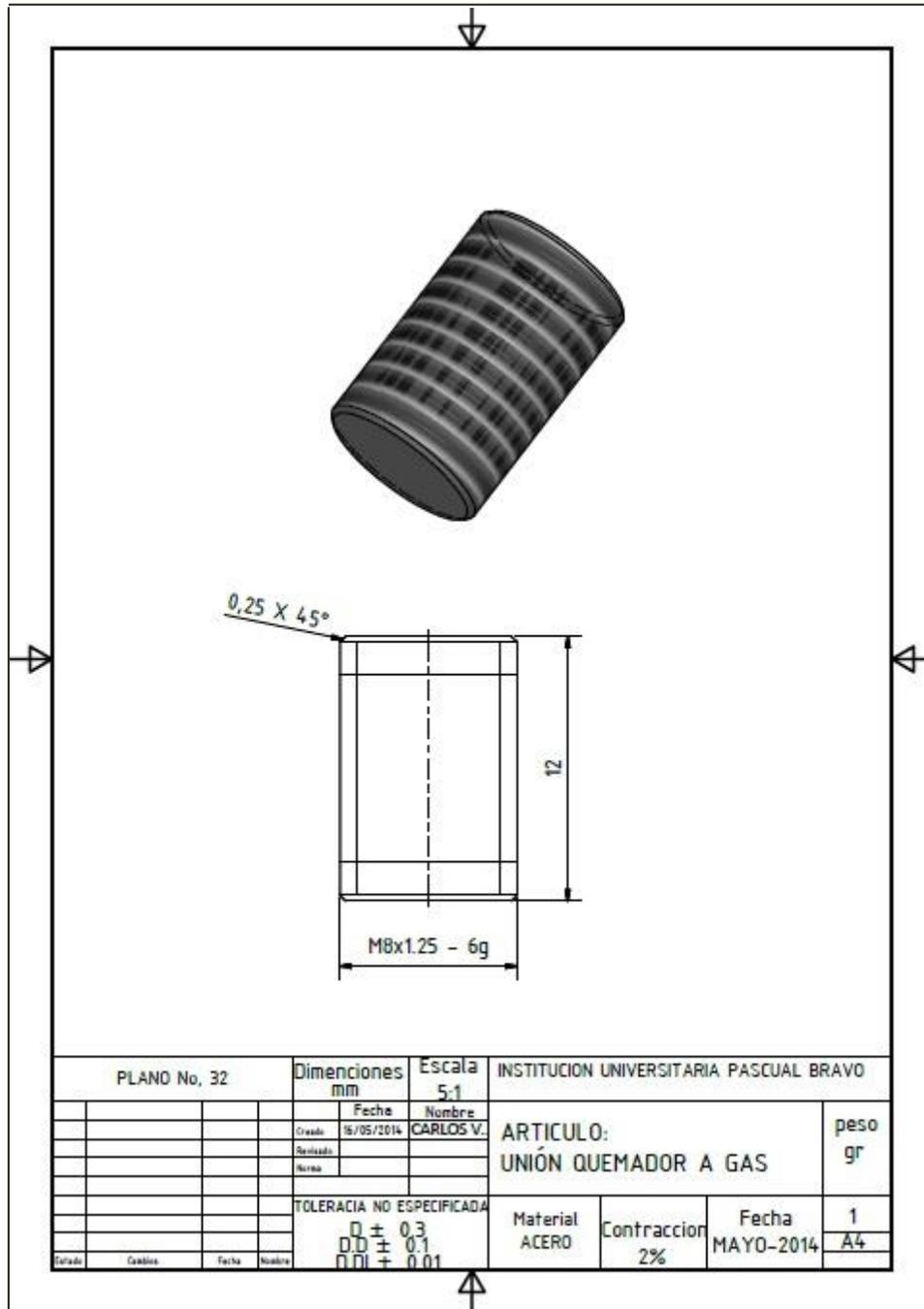
Plano 25 – Volante



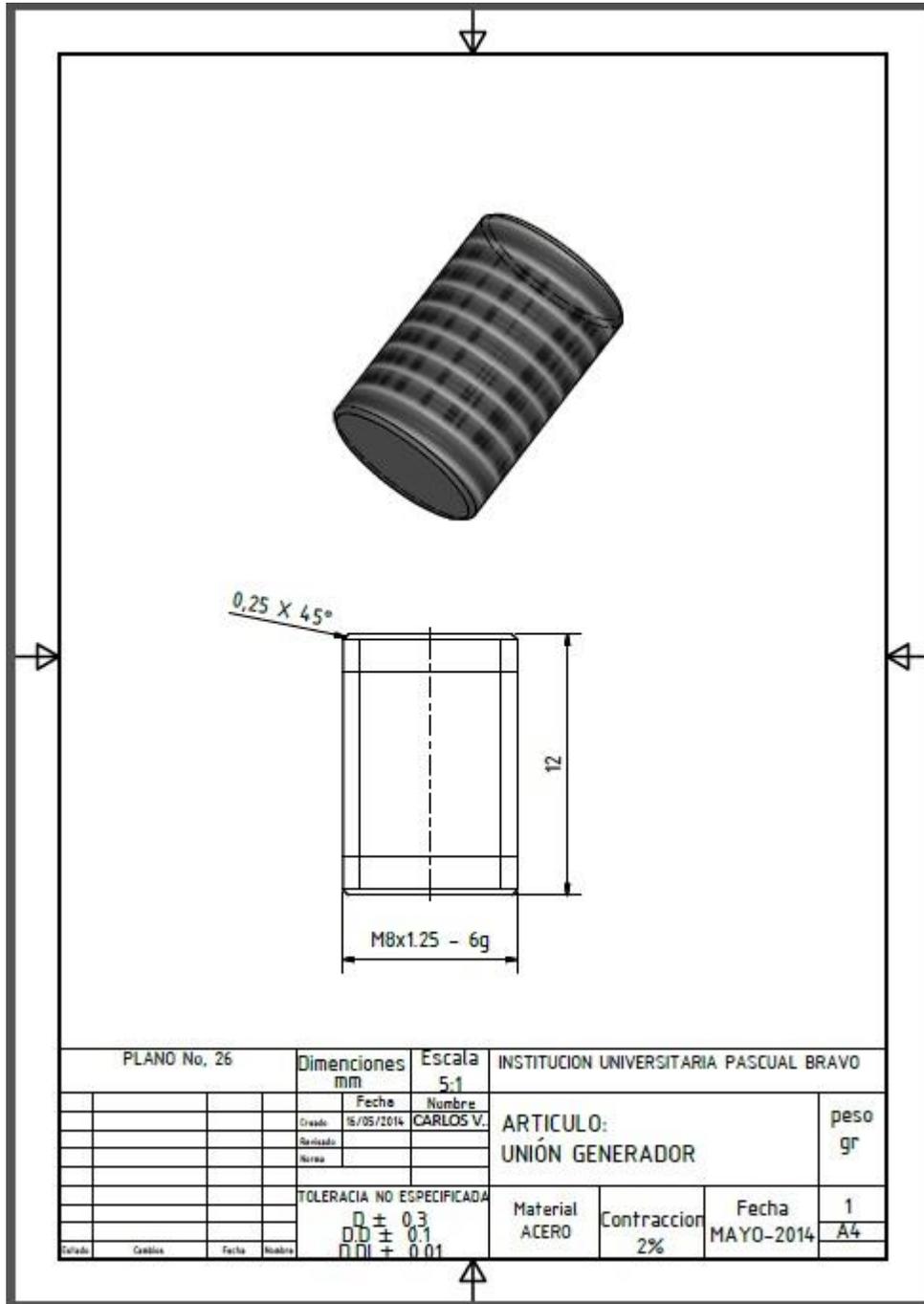
Plano 26 – Quemador de gas



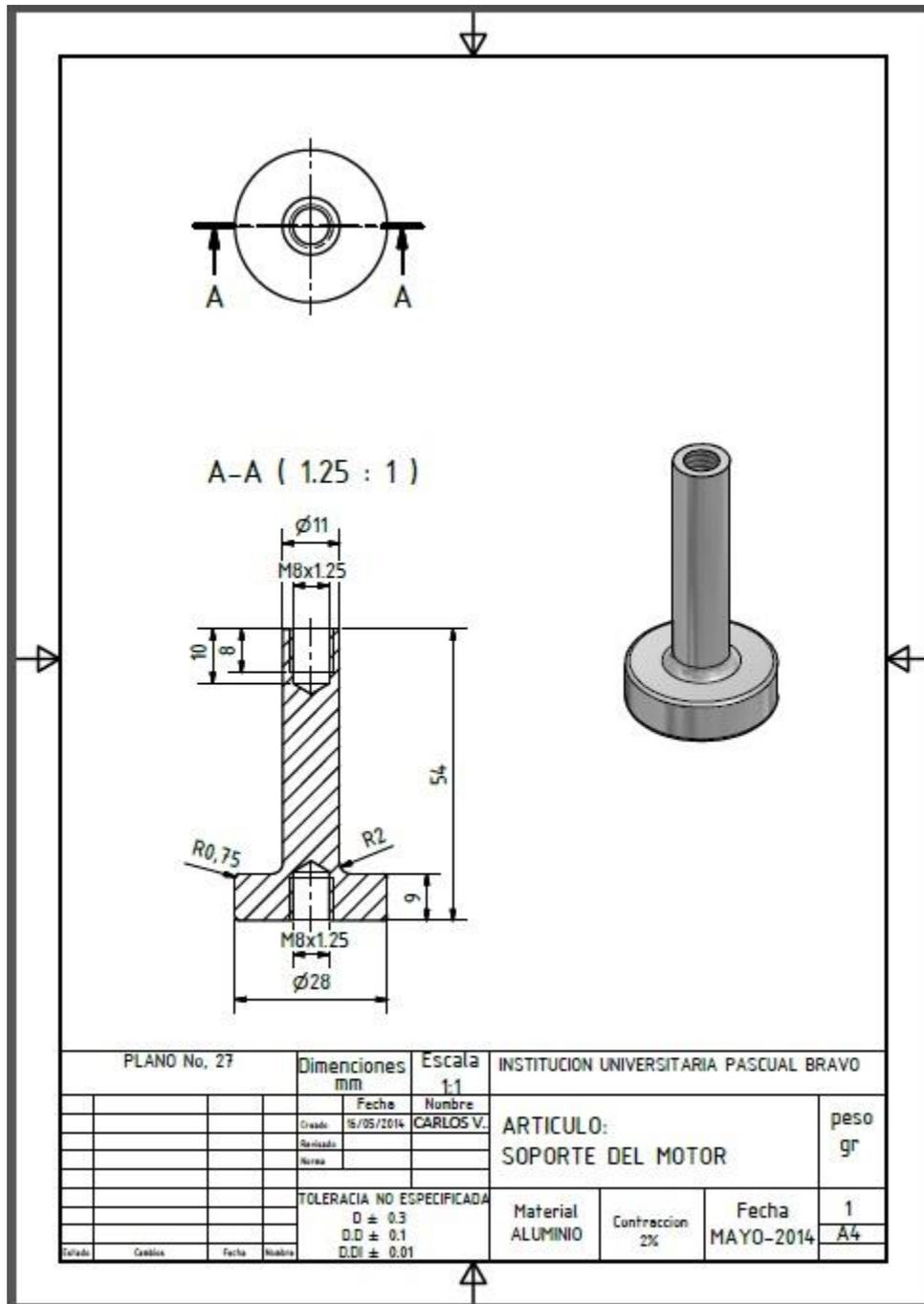
Plano 27 – Unión quemador



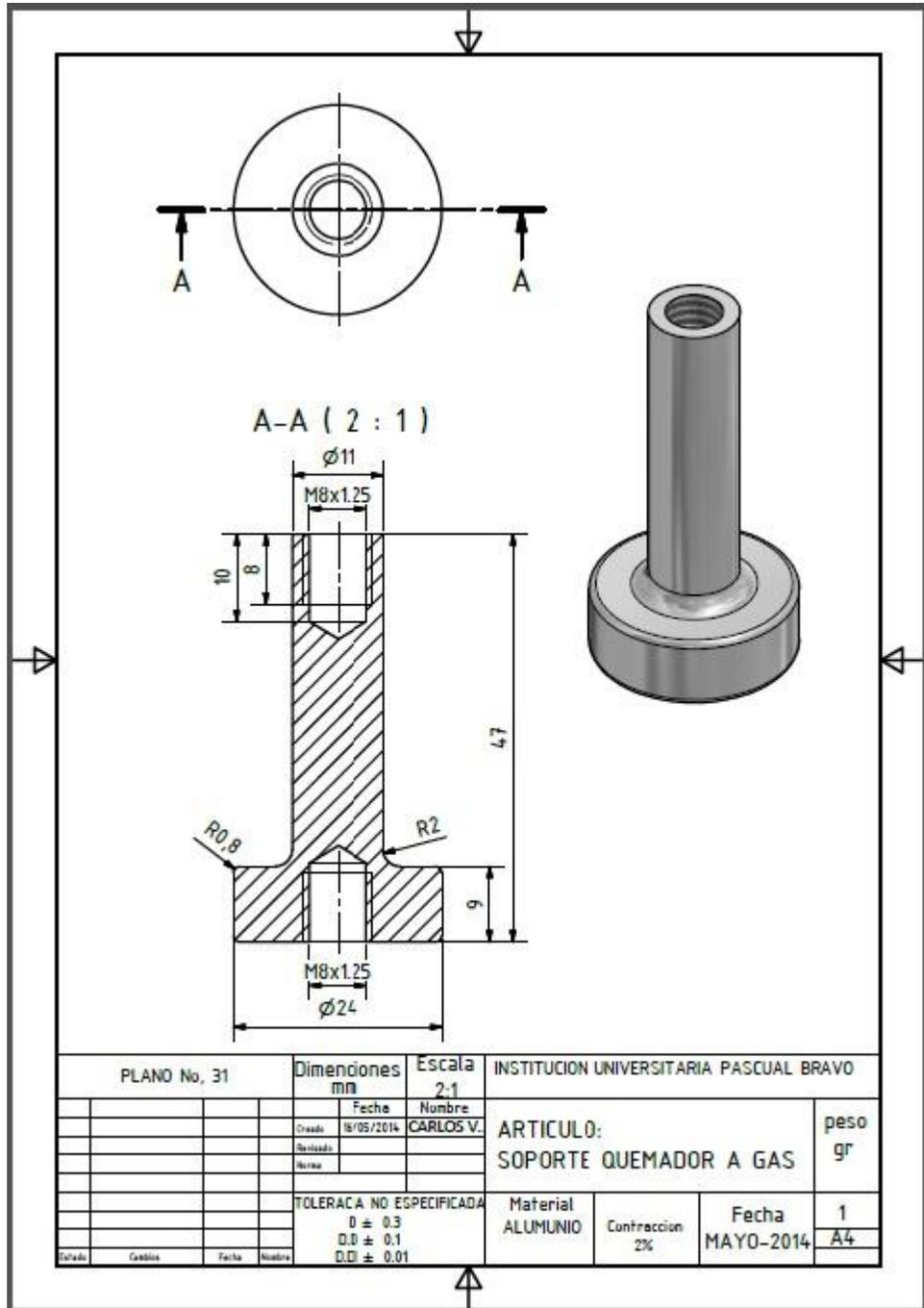
Plano 28 – Unión generador



Plano 29 – Soporte motor



Plano 30 – Soporte quemador



Plano 32 – Ensamble motor Stirling

