

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA BOMBA DE  
DESPLAZAMIENTO POSITIVO**

**JAIRO ANDRES PUENTES CHALA  
DUVAN ALBEIRO DIAZ LIZARAZO**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROYECTO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA BOMBA DE  
DESPLAZAMIENTO POSITIVO**

**JAIRO ANDRES PUENTES CHALA  
DUVAN ALBEIRO DIAZ LIZARAZO**

**Director:  
Ph.D WILLIAMS STEVE HINCAPIE CAMPOS**

**Co-Director:  
Msc. JUAN FELIPE ESCOBAR HUERTAS**

**Modalidad: Proyecto de grado**

**Línea de investigación: Turbomáquinas, mecanismos, diseño  
Tema: Prototipo de enseñanza**

**FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PROYECTO DE GRADO  
BOGOTÁ D.C.  
2020**

**HOJA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Director de proyecto**  
**Ph.D Williams Steve Hincapié Campos**

---

**Co-Director de proyecto**  
**Msc. Juan Felipe Escobar Huertas**

**Bogotá, Julio 2020**

## CONTENIDO

1. Resumen	7
2. Introducción	8
3. Objetivos	9
3.1 Objetivo general	9
3.1.1 Objetivos específicos	9
4. Marco teórico	10
4.1 Turbomáquinas	10
4.1.1 Clasificación de bombas mecánicas	10
4.1.2 Cabezas de presión	12
4.1.3 Bombas de desplazamiento positivo y la industria petrolera	12
4.2 Bombas reciprocantes	14
4.3 Volantes de inercia	16
4.4 Válvula check	17
4.5 Fluido de trabajo	18
4.6 Motor eléctrico	18
4.7 Lámpara estroboscópica	19
5. Ecuaciones	20
6. Desarrollo del proyecto	22
6.1 Proceso de fabricación	22
6.2 Tabulación de cálculos	25
6.3 Graficas de cálculos	28
6.3.1 Grafica de velocidad lineal en m/s para el mecanismo	29
6.3.2 Grafica de aceleración en $m/s^2$ para el mecanismo	30
6.3.3 Grafica de fuerzas en N para el mecanismo	31
7. Resultados	32
7.1 Prototipo	32
7.2 Planos del prototipo	33
8. Conclusiones	48
9. Bibliografía	49
10. Presupuesto del prototipo	51
11. Anexos	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación general de bombas	10
Figura 2. Bombas en la industria petrolera	14
Figura 3. Bomba petrolera y sus partes principales	15
Figura 4. Volante en un eje motriz	17
Figura 5. Válvula check	17
Figura 6. Aceite semi sintético	18
Figura 7. Motor eléctrico	18
Figura 8. Lámpara estroboscópica	19
Figura 9. Proceso de armado	23
Figura 10. Bomba y válvula check	23
Figura 11. Proyector cinematográfico	24
Figura 12. Motor y simulación CAD	24
Figura 13. Puntos de análisis en el prototipo	25
Figura 14. Angulo $\theta$ entre C, B y E	26
Figura 15. Masa del cabezal y vástago de la bomba	27
Figura 16. Velocidad lineal en m/s del mecanismo	29
Figura 17. Aceleración en $m/s^2$ del mecanismo	30
Figura 18. Fuerzas en N del mecanismo	31
Figura 19. Montaje final	32
Figura 20. Lista de partes del prototipo	62
Figura 21. Placa de presentación	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas tipos de bombas	11
Tabla 2. Tipos de petróleo	13
Tabla 3. Partes principales de una bomba petrolera	16
Tabla 4. Valores iniciales del prototipo	23
Tabla 5. Tabla de cálculos	25
Tabla 6. Listado de planos	31
Tabla 7. Presupuesto del prototipo	51

## 1. Resumen

Debido a que uno de los procesos de enseñanza y aprendizaje de la ingeniería mecánica consta de entender los diversos mecanismos de montaje y suministro de las diferentes máquinas que podamos encontrar en la industria, entre estas: las bombas mecánicas de desplazamiento positivo, y en la actualidad la universidad Fundación Universitaria Los Libertadores, no cuenta con un dispositivo didáctico de enseñanza donde se evidencie el funcionamiento real de estas. Se pretende realizar un prototipo que cumpla con los criterios de diseño de una bomba reciprocante de extracción de petróleo, en el cual se pueda evidenciar su funcionamiento real como alternativa pedagógica de enseñanza, así afianzar las competencias y conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería mecánica logrando captar la atención de los estudiantes y profesores de la institución.

En el documento se evidencia el proceso de cálculos y ejecución de armado, incluyendo fotografías, consideraciones de mejoras y planos del prototipo. El material empleado en el vástago de la bomba, en este caso bronce, permite el uso de líquidos derivados del petróleo, generando una experiencia más real, además de presentar la posibilidad de realizar futuros proyectos con fluidos abrasivos.

El prototipo de enseñanza simula satisfactoriamente el funcionamiento real de una bomba reciprocante de extracción de petróleo, funcionando con líquidos derivados del petróleo, autocebante, un flujo pulsante y un caudal de 100 ml/min.

De esta manera se pretende dejar huella en los espacios académicos y didácticos de la institución para el crecimiento profesional de los futuros estudiantes de ingeniería mecánica.

## 2. Introducción

Las bombas mecánicas son componentes que permiten extraer, elevar o impulsar líquidos de un lugar a otro, capaz de transformar la potencia mecánica de entrada en una potencia hidráulica útil de salida, en forma de presión o caudal. Dependiendo de su principio de funcionamiento pueden clasificarse como: bombas cinéticas entre las que están las centrifugas, efectos especiales y turbinas regenerativas, y las bombas de desplazamiento positivo como las reciprocantes y las rotativas. Aunque físicamente son diferentes, en esencia, todas dependen de un fluido para su funcionamiento, bien sea para desplazarlo de un lugar a otro, aumentar su presión o usarlo como impulso y aprovecharlo como energía. Industrialmente presentan muchas aplicaciones, incluyendo el sector petróleo y gas petroquímica, farmacéutico, alimenticio, etc.

Las bombas han evolucionado, conforme las necesidades lo hayan requerido. Actualmente la selección más conveniente de un tipo de bomba depende del tipo de fluido y las características de la industria, por esto las bombas tendrán capacidades y características específicas acorde al tipo de sustancia con el que se deba trabajar.

La industria petrolera es un sector estratégico donde se combinan métodos científicos y prácticos para extraer, explotar, transportar, y tratar los hidrocarburos. Además es un campo que está continuamente innovando para realizar mejoras en sus procesos.

Teniendo en cuenta los criterios de ingeniería y acudiendo a las necesidades de afianzar el conocimiento de los estudiantes, se ve la necesidad de realizar un modelo de enseñanza para que los futuros compañeros cuenten con este tipo de mecanismos y puedan observar, mejorar y profundizar el aprendizaje en esta área.

Este prototipo será fabricado con base de un modelo de bomba reciprocante de extracción de petróleo, por lo que no solo es aplicable para máquinas hidráulicas. Su movimiento oscilante permitirá el estudio de otras competencias como lo son mecanismos, estática y dinámica.

Finalmente se realizará un análisis en tiempo real, simulando el proceso de extracción de petróleo bajo el principio de funcionamiento de una bomba de desplazamiento positivo realizando una práctica y el cálculo correspondiente de velocidades y aceleraciones ya que son parámetros indispensables para determinar la mejor combinación y rendimiento de una bomba.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Diseñar y construir un prototipo de enseñanza de una bomba de desplazamiento positivo tipo reciprocante.

#### **3.1.1 Objetivos específicos**

- Establecer los planos de montaje correspondientes al prototipo.
- Calcular la estructura, velocidades y aceleraciones del mecanismo.
- Fabricar y realizar el montaje de una bomba de extracción petrolera como prototipo de enseñanza.

## 4. Marco teórico

### 4.1 Turbo máquinas

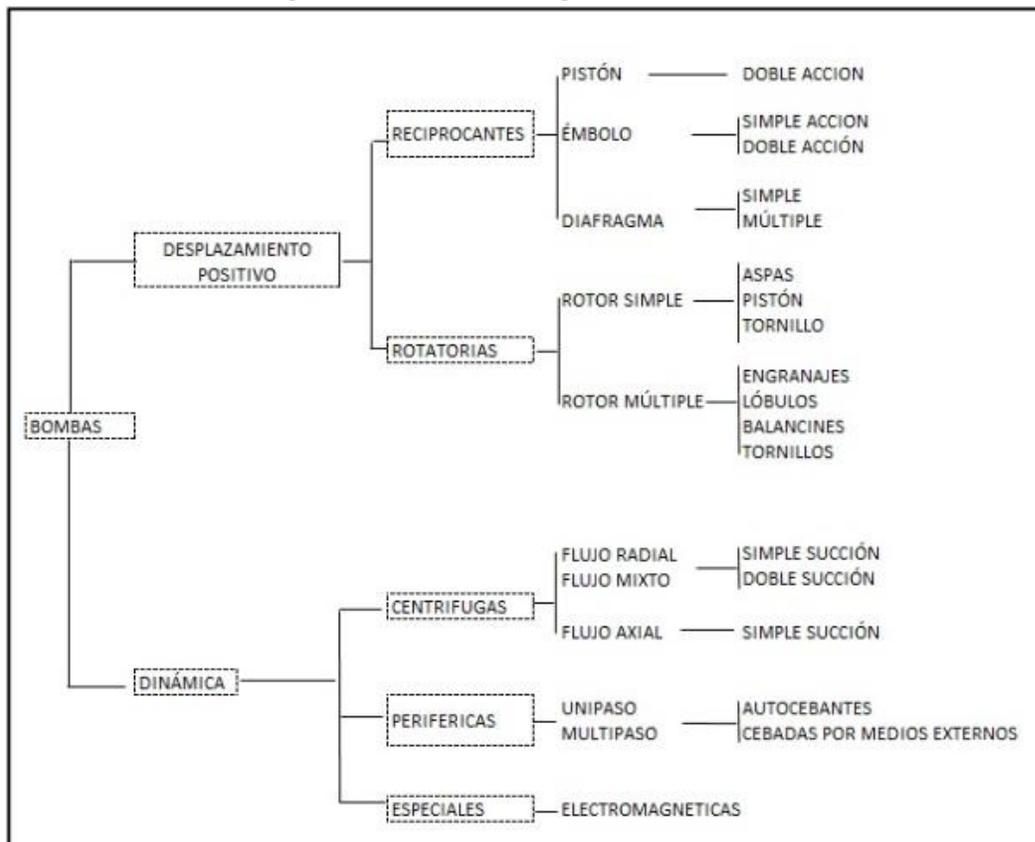
Son dispositivos mecánicos que manejan fluidos, aprovechándolos para transformarlo en energía y en movimiento rotativo. Se clasifican en turbo máquinas generadoras y turbo máquinas motoras.

Las turbo máquinas como las bombas o los ventiladores, absorben la energía mecánica y la transfiere al fluido, mientras que las turbo máquinas motoras aprovechan la energía del fluido y la convierte en energía mecánica.

#### 4.1.1 Clasificación de bombas mecánicas

Los equipos de bombeo aprovechan la energía mecánica suministrada externamente bien sea por un motor eléctrico o térmico, para transferirla al fluido en forma de presión, caudal o velocidad. Los diferentes tipos de proceso, requieren diferentes tipos de bombas. Estas se clasifican en dos grandes grupos: Las bombas dinámicas y las bombas de desplazamiento positivo, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1. Clasificación general de bombas



Fuente. Propia

En las bombas centrífugas, la energía cinética del fluido se aumenta mediante un impulsor giratorio, que todavía en el interior de la bomba se transforma en energía de presión. Estas bombas son de tipo centrífugo y utilizan un flujo axial, radial o mixto (simple succión, doble succión). Mientras que, en las bombas de desplazamiento positivo, el líquido es introducido y confinado en cierto espacio de la bomba, donde se le transfiere energía, siendo desplazado hasta la zona de expulsión.

En el transcurso de los siglos se han diseñado numerosas bombas de desplazamiento positivo, en todos los diseños, el fluido se aspira dentro de un volumen en expansión y luego se expulsa cuando ese volumen se contrae, pero el mecanismo que provoca que cambie el volumen es muy diferente entre los diversos diseños. Las bombas de desplazamiento positivo son ideales cuando se necesita alta presión, como en el bombeo de líquidos viscosos o mezclas, lodos o suspensiones espesas, y donde se necesita medir o despachar cantidades de líquido precisas, como en las aplicaciones médicas.

(Cengel Y, y Cimbala J, 2010, p.777)

En la siguiente Tabla 1, se observan las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de bombas.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de bombas

TIPO DE BOMBA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Dinámica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Flujo continuo.</li> <li>● Operación silenciosa.</li> <li>● Fácil control de flujo.</li> <li>● Construcción simple.</li> <li>● Bajo costo de mantenimiento.</li> <li>● Puede manejar sólidos suspendidos.</li> <li>● Manejo de líquidos corrosivos.</li> <li>● Ausencia de válvulas en el cuerpo de la bomba.</li> <li>● Posibilidad de acoplamiento directo a la bomba.</li> <li>● Pueden operar a más de 4000 rpm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Limitaciones en la viscosidad del líquido manejado.</li> <li>● Requiere cebado.</li> <li>● No puede manejar líquidos con más del 5% de gases en volumen.</li> <li>● Una bomba de una sola etapa no puede proporcionar una presión elevada.</li> <li>● Solamente pueden operar con elevado rendimiento en un intervalo limitado de condiciones (caudal-presión).</li> </ul>
<b>Desplazamiento positivo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Amplio rango de presiones y viscosidad.</li> <li>● Autocebantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● No maneja sólidos en suspensión.</li> <li>● Eficiencia volumétrica baja.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pueden manejar líquidos con alto contenido de gases.</li> <li>● Puede alcanzar elevadas presiones, hasta 1400 psi.</li> <li>● Las bombas de pistón o embolo son muy útiles para líquidos muy viscosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Alto nivel de ruido (reciprocantes).</li> <li>● Flujo pulsante (reciprocantes).</li> <li>● Costo elevado (reciprocantes).</li> <li>● Requiere mayor frecuencia de mantenimiento (reciprocantes).</li> <li>● Vida relativamente corta del diafragma y riesgo de rotura (bombas de diafragma).</li> </ul>
--	--	--

Fuente. Propia

Las bombas de desplazamiento positivo ejercen un esfuerzo cortante mucho menor, comparada con una bomba dinámica de presión y caudal similar, razón por la cual son ideales para conducir líquidos sensibles al esfuerzo cortante como la sangre. Garantizando un buen sello, una bomba de desplazamiento, es capaz de generar una presión de vacío importante en su entrada, aun cuando no este cebada o el líquido y/o tubería contenga aire. Su velocidad de funcionamiento es menor a la de una bomba dinámica, sin embargo, prolonga la vida útil de los sellos y aumenta el tiempo medio entre fallas.

Entre las desventajas más importantes de las bombas de desplazamiento positivo están: su alto costo de adquisición y mantenimiento. Requieren alivio de presión o una válvula para atenuarla, ya que generan muy altas presiones en el lado de la descarga, y si su salida se bloquea, podría haber roturas y/o sobrecalentamiento en el motor. Además, este tipo de bomba podría entregar un flujo no continuo “pulsátil” que sería inaceptable en algunos casos.

#### 4.1.2 Cabezas de presión

Una cabeza de presión se refiere a la altura o la carga de una columna de líquido particular, ejercida por la columna de líquido en la base de su contenedor. Se le conoce también como cabeza estática. En el caso de una bomba centrífuga tipo reciprocante la cabeza estática total (TSH) es la suma de la elevación de succión estática (SSL), más la cabeza estática de descarga (SDH).

#### 4.1.3 Bombas de desplazamiento positivo y la industria petrolera

Dentro de la aplicación de la ingeniería se encuentra la extracción de petróleo a través del bombeo mecánico, unos de los métodos más antiguos y versátiles utilizados en los pozos petrolíferos del mundo por su diseño. Su complejidad mecánica en comparación con los otros sistemas de levantamiento artificial, hace que esté expuesto a mayor cantidad de esfuerzos, por tal motivo requiere mayor atención durante su operación.

En la industria petrolera se utilizan bombas o sistemas de bombeo para la extracción y transporte de hidrocarburos. Las bombas de desplazamiento positivo son las más utilizadas, mediante la creación de un desequilibrio de presiones dentro de un entorno cerrado. Este desequilibrio hace que el líquido se desplace de un lugar a otro en un intento de equilibrar la presión. Las bombas de desplazamiento positivo se clasifican en dos tipos: rotatorias y reciprocante. Dentro de los tipos rotatorias podemos encontrar bombas de engranajes y de tornillos.

En la Tabla 2 se presentan los tipos de petróleo según su viscosidad, clasificados por la API (American Petroleum Institute), donde mayor sea la densidad del petróleo, menor será el grado API.

Tabla 2. Tipos de petróleo

TIPOS DE PETRÓLEO SEGÚN SU VISCOSIDAD				
Aceite Crudo	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad grados API	Descripción	Aplicación
Extra pesado	>1000	10	Difícil transporte y difícil extracción	Aceites, parafinas, polímeros y betunes
Pesado	1000 - 920	10,0 - 22,3	Fácil transporte y difícil extracción	Parafinas, polímeros, aceites, combustibles
Mediano	920 - 870	22,3 - 31,1	Fácil transporte y extracción	Combustibles y materias primas para polímeros y parafinas
Ligero	870 - 830	31,1 - 39	Fácil transporte y extracción	Combustibles (diésel, queroseno y gasolina)

Fuente. Propia

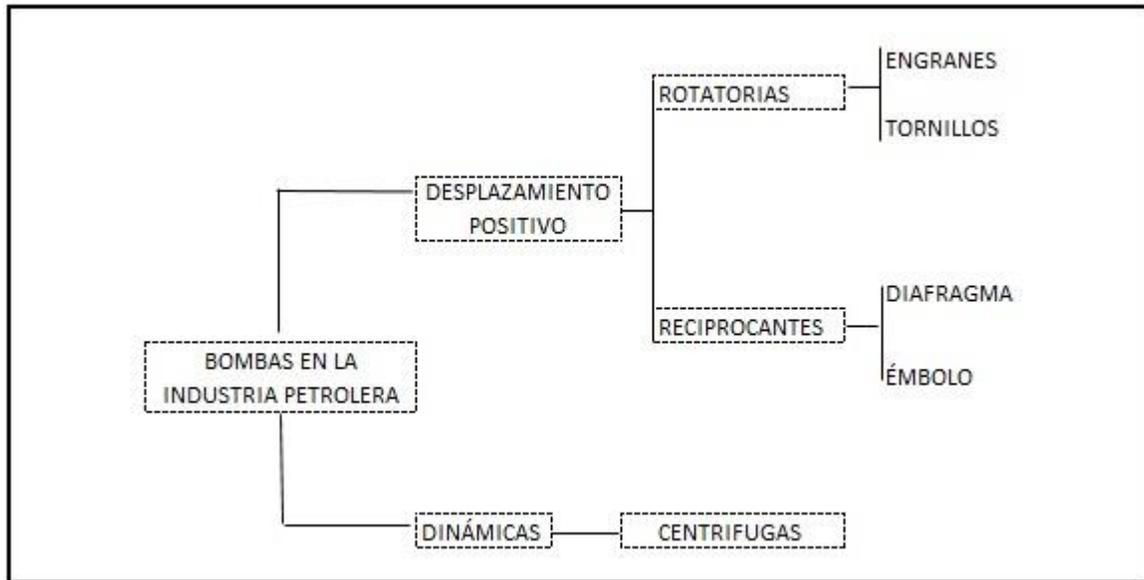
El funcionamiento de las máquinas de desplazamiento positivo no se basa como el de las turbo máquinas en la ecuación Euler, si no en el principio del desplazamiento positivo el cual consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara.

Por lo tanto, en una máquina de desplazamiento positivo el órgano intercambiador de energía no tiene necesariamente movimiento alternativo (embolo), sino que puede tener movimiento rotativo (rotor). Sin embargo, en las máquinas de desplazamiento positivo tanto alternativas como rotativas, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión en una bomba) y disminuye de volumen (impulsión). Por eso, estas máquinas se llaman también máquinas volumétricas. Además, si el elemento transmisor de energía tiene movimiento rotativo, la máquina se llama roto estático para distinguirlas de las roto dinámicas. Una máquina roto estática es una máquina de desplazamiento positivo de movimiento rotativo. El intercambio de energía de fluido se hace siempre en forma de presión, en contra posición a las turbo máquinas.

(Viejo Zubicaray M, 2000, p.132)

En la Figura 2, se muestra una clasificación de las bombas de subsuelo centrífugas y reciprocantes, empleadas en la industria petrolera, las cuales son fabricadas y deben cumplir normas como lo especificado por la API (American Petroleum Institute).

Figura 2. Bombas en la industria petrolera



Fuente. Propia

A continuación, se presentarán generalidades sobre las bombas reciprocantes, teniendo en cuenta que el objetivo principal del proyecto se centra en el cálculo y fabricación de una bomba reciprocante de extracción de petróleo.

## 4.2 Bombas reciprocantes

Estas bombas son unidades de desplazamiento positivo, reciben un volumen determinado de líquido en condiciones casi de succión, lo comprime a la presión de descarga y lo expulsa por la boquilla, esta cantidad definida de líquido es descargada durante el movimiento del pistón o embolo durante su carrera. Estas bombas son ampliamente utilizadas en la industria petrolera ya que son ideales para el trabajo con fluidos muy viscosos, además de su alta eficiencia, fácil mantenimiento, autocebantes y no producen mucho ruido. Existen básicamente dos tipos de bombas reciprocantes, las de acción directa, movidas por vapor y las bombas de potencia.

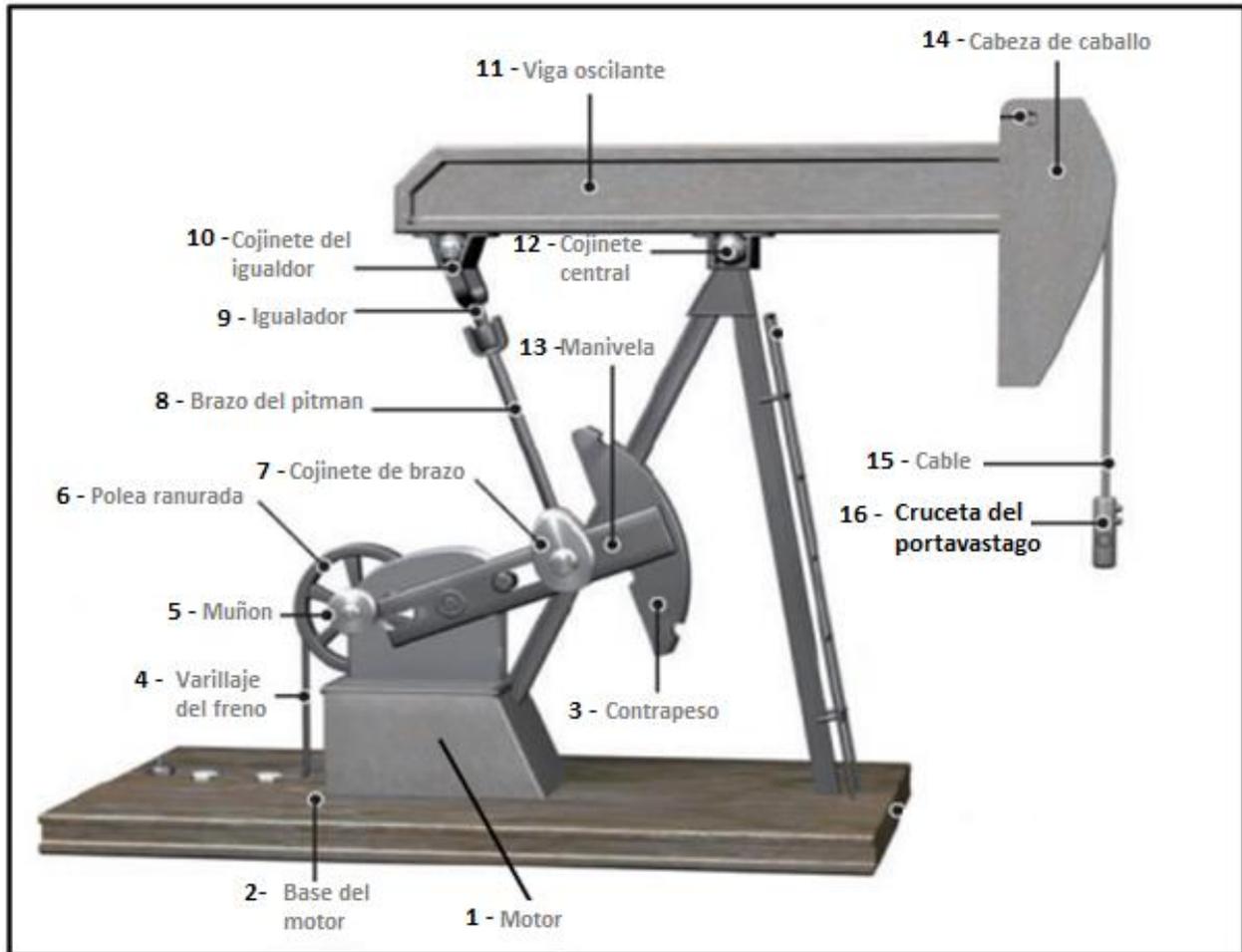
La eficiencia volumétrica en pozos petroleros ya sea reciprocante u otro tipo de bomba, está afectada por la cantidad de gas libre en la admisión de la bomba, es decir, presenta perdidas como cualquier otra. En principio las bombas no están hechas para para manejar gas aunque pueden aceptarlo en mayor o menor cantidad dependiendo de la tecnología que se use en su diseño. Lo ideal para un yacimiento es que se haga una caracterización para

determinar el tipo de suelo y la presión en el fondo del pozo cuando se ha alcanzado un caudal estabilizado. Es decir que su eficiencia está determinada por varias condiciones que generan pérdidas como en cualquier otro sistema de bombeo.

En la actualidad también existen bombas reciprocantes de doble efecto utilizadas para el bombeo de agua en pozos profundos. Se destacan por soportar altas cabezas de presión y donde la profundidad es una variable representativa.

En la Figura 3 y Tabla 3, se aprecia una bomba típica de extracción de petróleo y sus partes principales.

Figura 3. Bomba petrolera y sus partes principales



Fuente. Adaptada de (Dabrowski A, Guelfo T y Sierra T, 2017)

Tabla 3. Partes principales de una bomba petrolera

PARTES PRINCIPALES DE UNA BOMBA PETROLERA	
1	Motor
2	Base motor
3	Contrapeso
4	Varillaje del freno
5	Muñón
6	Polea ranurada
7	Cojinete de brazo
8	Brazo del pitman
9	Igualador
10	Cojinete del igualador
11	Viga oscilante
12	Cojinete central
13	Manivela
14	Cabeza de caballo
15	Cable
16	Cruceta del porta vástago

Fuente. Propia

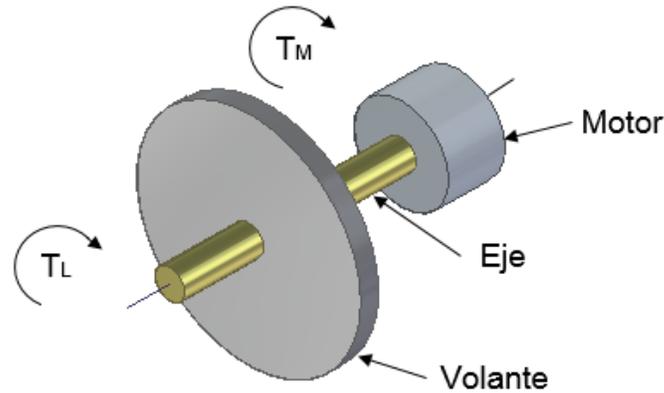
### 4.3 Volantes de inercia

Disponer de un motor acorde con las especificaciones de demanda del pico del sistema, sería enormemente ineficiente, ya que la mayor parte del tiempo estará subutilizado. Razón por la cual se requiere de un componente en el sistema capaz de almacenar energía cinética y suministrarla para evitar el agarrotamiento del equipo. Condición que sucede en unas posiciones o ángulos específicos donde el mecanismo no funcionaría.

Los volantes de inercia son componentes introducidos a una cadena cinemática, con el fin de aumentar la inercia de la cadena para vencer una demanda de energía externa. Estos volantes cuentan con cierta capacidad de acumular la energía suficiente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Este aumento de energía cinética, permite intercambios de energía rápidos y elevados modificando la velocidad y fuerzas ejercidas.

En la Figura 4 se muestra la inclusión de un volante en forma de disco al eje de un motor. El motor suministra un par de torsión de magnitud  $T_M$ , lo más constante posible, sin embargo la carga del mecanismo requiere un par de torsión  $T_L$ , que varía con el tiempo o la posición del equipo. El volante instalado proporciona la energía cinética necesaria para cumplir con la necesidad.

Figura 4. Volante en un eje motriz



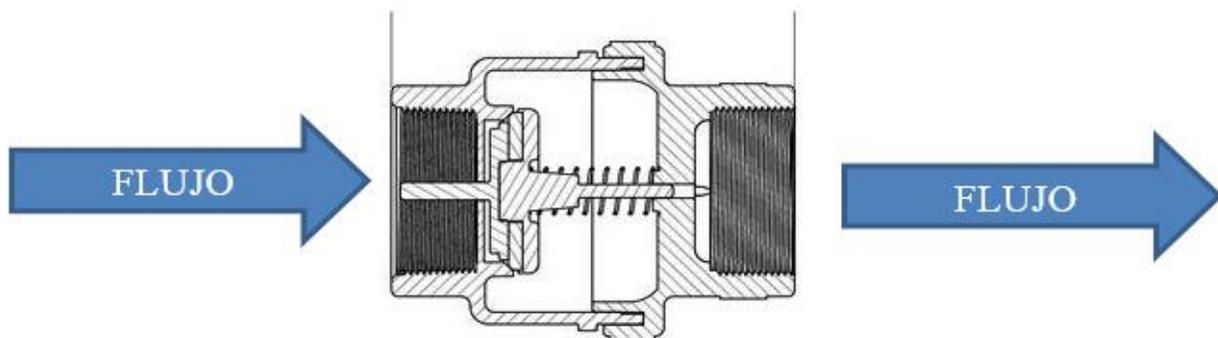
Fuente. Propia

#### 4.4 Válvula check

Las válvulas de retención, conocidas también como válvulas unidireccionales, válvulas check o válvulas uniflujo, cierran completamente el paso de un fluido en circulación al mismo tiempo que permiten el fluido libre en el lado contrario (Ver Figura 5). Su principal uso se da en tuberías que están unidas a sistemas de bombeo para impedir que la bomba trabaje en vacío.

Existen muchos tipos de válvula check dentro de las cuales, las más comunes son: de bola, de doble plato o doble puerta, asistidas por resortes y boquillas. Cada una es especial para diferente situación o instalación, es muy importante consultar cual es la más recomendada para nuestro sistema.

Figura 5. Válvula check



Fuente. Adaptada de (Quima, 2018) <https://quima.com/blogs/blog/que-es-una-valvula-check>

## 4.5 Fluido de trabajo

Dentro de la amplia diversidad de fluidos derivados de los hidrocarburos y de los aceites utilizados en la industria, el fluido a utilizar en el proceso de extracción de nuestra bomba, es un aceite semi sintético **10w40**, utilizado ampliamente para la lubricación la caja de velocidades de motocicletas. Este aceite, es una mezcla de aceite mineral (derivado del petróleo crudo refinado), y aceite sintético (elaborado en laboratorio con diferentes productos químicos).

Figura 6. Aceite semi sintético



Fuente. <https://experienciasdeunmotero.wordpress.com>

Sus propiedades y aditivos hacen que este tipo de aceites cumplan varias funciones, dentro de las principales se encuentran lubricar, refrigerar, prevenir la oxidación, y sellas las juntas entre las superficies de contacto.

## 4.6 Motor eléctrico

Es el encargado de suministrar la potencia necesaria a la unidad de bombeo para la extracción del fluido del pozo. Los motores utilizados en este tipo de unidades son de combustión o eléctrico. Ambos motores son empleados en estas unidades junto con su caja reductora. El motor eléctrico representa un bajo coste inicial y reduce los costos de mantenimiento. El motor de combustión tiene un control de velocidad más flexible.

Figura 7. Motor eléctrico



Fuente. <https://new.abb.com>

## 4.7 Lámpara estroboscópica

Este tipo de lámpara genera destellos, que dependiendo de la cantidad que pueda generar por minuto, permiten la visualización "congelada" del movimiento de máquinas rotativas o reciprocantes, facilitando así su inspección sin tener que detenerlas. Algunos modelos incluyen un sensor óptico remoto que permite iniciar fácilmente la lámpara de destello, y que también posibilita el uso del estroboscopio como tacómetro. La TKRS 20, ver Figura 8. Lámpara estroboscópica, es ideal para velocidades de 30 a 300 000 rpm.

Figura 8. Lámpara estroboscópica



Fuente. <https://mapro.skf.com>

## 5. Ecuaciones

La cinemática de cuerpo rígido establece las relaciones entre el tiempo, posición, velocidad y aceleración de partículas que forman un sólido rígido. Estas relaciones permiten calcular las variables de velocidad y aceleración en un instante determinado.

Velocidad angular a partir de rpm:

$$\omega = 2\pi * rpm \quad [1]$$

Velocidad angular de B respecto a A:

$$\omega_{BA} = \frac{v_A}{r_{A/IC}} \quad [2]$$

Velocidad angular de C respecto a B:

$$\omega_{CB} = \frac{\omega_{BA} * r_{B/IC}}{r_{C/B}} \quad [3]$$

Magnitud de velocidad:

$$v = \omega * r \quad [4]$$

donde:

v = Velocidad

$\omega$  = Velocidad angular

r = Producto cruz radio de interés

El centro instantáneo permite crear un punto de referencia anexo entre dos puntos de análisis facilitando la ejecución de las ecuaciones de velocidad.

Respecto a B:

$$r_{B/IC} = \frac{A/B}{\text{Sen } \theta} \quad [5]$$

Respecto a A:

$$r_{A/IC} = \frac{A/B}{\text{Tan } \theta} \quad [6]$$

Conociendo el valor de velocidad en el punto A, su respectiva aceleración en el instante determinado se establece con:

$$a = \omega^2 * r_{A/B} \quad [7]$$

donde:

$\omega$  = Velocidad angular

$r$  = Producto cruz radio de interés

Conociendo la aceleración y la masa de los componentes que intervienen en el punto de análisis, la fuerza a la que se está expuesto se obtiene con la segunda Ley de Newton.

$$F = m * a \quad [8]$$

donde:

F = Fuerza

m = Masa

a = Aceleración

## 6. Desarrollo del proyecto

Las bombas reciprocantes son el grupo de bombas ampliamente más utilizadas en la industria petrolera por su bajo costo y las prestaciones que ofrece. La mayor parte del petróleo es usado como materia prima para la obtención de combustibles, sin embargo, dependiendo de su composición se pueden producir distintos productos derivados, entre los que están el plástico, asfalto, detergentes, fertilizantes, telas sintéticas, entre otros.

Este tipo de bomba hace parte de nuestra forma de vida, de los objetos que utilizamos, por esto es seleccionada para el desarrollo del proyecto, ya que además se ajusta a los requerimientos de un prototipo de enseñanza; su tipo de trabajo permite el estudio de varias competencias como lo son máquinas hidráulicas, mecanismos, estática y dinámica.

Este proyecto se desarrolló en cinco etapas o fases:

- Fase uno: contemplar la necesidad y la adecuación del espacio destinado para la instalación de los componentes del prototipo.
- Fase dos: búsqueda y selección de los elementos requeridos, de fácil adquisición en el comercio o en lo posible componentes reciclados.
- Fase tres: ejecución de los correspondientes cálculos teóricos de la estructura, velocidades y aceleraciones.
- Fase cuatro: integración, montaje e instalación de los componentes y sistemas del prototipo.
- Fase cinco: pruebas de funcionabilidad, fallos y mejoras de la máquina para su presentación y entrega.

### 6.1 Proceso de fabricación

La ejecución del prototipo se realiza con base a videos encontrados en la web, uno de estos, publicado en <https://www.youtube.com/watch?v=yqFjRAfc0dY> por el canal Muy Fácil De Hacer, especifica los materiales, dimensiones y proceso de armado de una maqueta de una bomba reciprocante extractora de petróleo. Los materiales sugeridos en el video son madera, una jeringa plástica y silicona para unir todas las partes, sin embargo por facilidad de adquisición y disponibilidad de equipos, el prototipo es fabricado con material reciclado de ornamentación, como lo es tubo rectangular empleado en puertas, platinas y perfiles T utilizados en rejas, incluso un disco de metal macizo coloquialmente conocido como “tejo” hace parte del proyecto. En la Figura 8. Proceso de armado se aprecia el uso de algunos de estos materiales.

Se conservan algunas de las dimensiones propuestas como la altura del trípode o la distancia hasta el punto de extracción, pero algunas otras fueron modificadas durante el armado como el punto central del balancín o se agregaron componentes no descritos en el video. Dimensiones descritas en los planos anexos. Ver sección 7.2 Planos del prototipo.

Figura 9. Proceso de armado



Fuente. Propia

Una de las modificaciones que se realiza es la fabricación de la bomba en material bronce y no con una jeringa como se presenta en el video. Esta modificación permite la realización de futuros proyectos con fluidos abrasivos, como rocas, incrustaciones o lodos, presentes en el crudo; brindando una experiencia más cercana a la realidad.

Se agrega una válvula check, elaborada a partir de un tejo (Figura 10), al cual se le realizan unos ductos de diferente diámetro conectados perpendicularmente; allí contienen unas esferas una para cada ducto, las cuales simulan el principio de funcionamiento de una válvula de bola, permitiendo la succión del fluido en la parte inferior del “tejo” y expulsarlo por la parte superior. Disposición y dimensiones presentes en los planos anexos. Ver sección 7.2 Planos del prototipo.

Figura 10. Bomba y válvula check



Fuente. Propia

El motor adecuado al prototipo fue encontrado en una estantería de electrónica, razón por la cual no se cuenta con información técnica del mismo. Según información brindada por el proveedor, este pertenecía a un antiguo proyector cinematográfico (Figura 11).

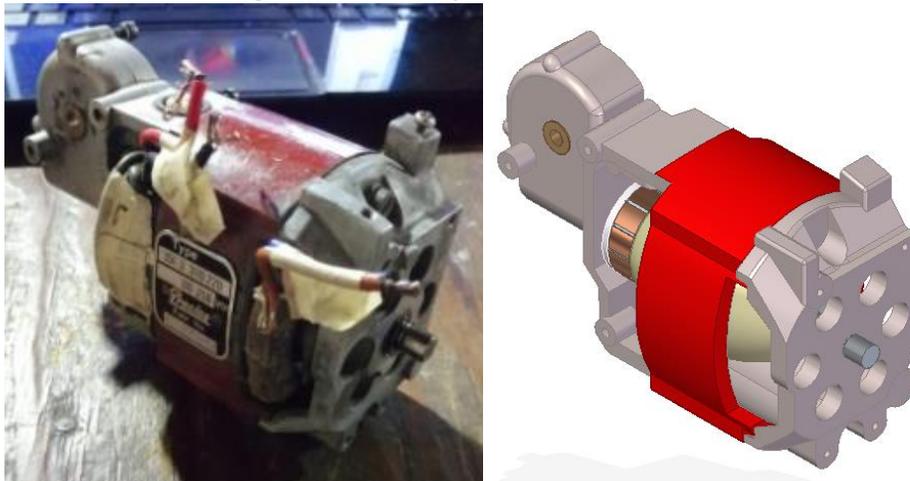
Figura 11. Proyector cinematográfico



Fuente. <https://museubadalona.cat>

Solo se dispone de los datos presentes en la placa. Incorporado, este motor cuenta con un reductor y transmisión de velocidad perpendicular al eje motriz. Condición que facilitó su montaje y adecuación para la transmisión del movimiento al sistema. Figura 12. Motor y simulación CAD.

Figura 12. Motor y simulación CAD

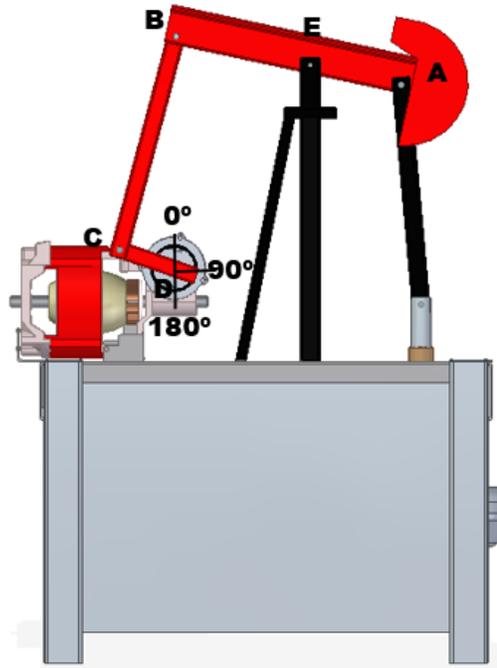


Fuente. Propia

## 6.2 Tabulación de cálculos

El punto de interés del prototipo es el punto A, o el vástago de la bomba. Punto donde se requiere hallar la velocidad lineal, aceleración y fuerzas al que se está expuesto. Para esto es necesario seguir una cadena cinemática, definidos como D; C; B; E y A, además de establecer los ángulos de referencia en la salida del reductor, punto D, (Ver Figura 13. Puntos de análisis en el prototipo).

Figura 13. Puntos de análisis en el prototipo



Fuente. Propia

En la Tabla 4 se muestran los valores iniciales del prototipo, como la velocidad de salida del reductor y las distancias en entre los puntos de análisis.

Tabla 4. Valores iniciales del prototipo

PUNTO	VALOR	UNIDAD
D	253,00	rpm
D / C	0,035	m
C / B	0,15	m
B / E	0,09	m
E / A	0,07	m

Fuente. Propia

El valor de velocidad se obtiene desde un punto conocido, en este caso la salida del reductor (Punto D); valor obtenido con la lámpara estroboscópica, en rpm convertidos a rad/s usando la ecuación 1. Este valor es constante, definido como velocidad angular en el punto D.

$$\omega_D = 26,5 \text{ rad/s.}$$

Continuando con la cadena cinemática, la velocidad en el punto C, se obtiene usando la ecuación 4.  $\omega_D$  multiplicado por la distancia entre el punto D / C, este valor también es constante.

$$V_c = 0,93 \text{ m/s.}$$

Para el punto B, es necesario conocer el ángulo entre C, B y E, definido como  $\theta$  y hallado con un transportador. Cuando los puntos D / C forman un ángulo de  $90^\circ$ ,  $\theta$  es igual a  $70^\circ$ . Como se muestra en la Figura 14. Geométricamente se establece el centro instantáneo de la velocidad cero del punto B / C para el instante mostrado, localizando el punto de intersección de las líneas extendidas perpendicularmente desde  $V_B$  y  $V_C$ .

Figura 14. Angulo  $\theta$  entre C, B y E



Fuente. Propia

La distancia de B respecto al centro instantáneo ( $r_B / I_C$ ) se halla con la ecuación 5, y la distancia de C respecto al centro instantáneo ( $r_C / I_C$ ) se halla con la ecuación 6. Conocidos estos datos, se usa la ecuación 2, para hallar la velocidad angular del punto B / C.

$$r_B / I_C = 0,16 \text{ m}$$

$$r_C / I_C = 0,05 \text{ m}$$

$$\omega_{B/C} = 16,98 \text{ rad/s}$$

Con la ecuación 3 se establece la velocidad angular del punto B / E.

$$\omega_{B/E} = 30,12 \text{ rad/s}$$

Por último la velocidad lineal en el punto A se define con la ecuación 4, multiplicando la velocidad angular del punto B / E por la distancia entre E / A ( $r_{EA}$ ).

$$V_A = 2,11 \text{ m/s}$$

La aceleración en el punto A se halla multiplicando la velocidad angular al cuadrado del punto A por la distancia entre A y E. (Ecuación 7).

$$a_A = -63,52 \text{ m/s}^2$$

Aunque en este documento no se calcularon los volantes de inercia debido a que el motor es capaz de suplir este requerimiento y el balancín mantiene la misma inercia durante todo el movimiento; evitando que el mecanismo se agarrote. El prototipo cuenta con un cabezal que fue tenido en cuenta para el cálculo de la fuerza.

Para esto se ha multiplicado la masa de los componentes del punto A y la aceleración de este punto (Ecuación 8). Estos componentes son el cabezal y el vástago de la bomba, ver Figura 15.

Figura 15. Masa del cabezal y vástago de la bomba



Fuente. Propia

Esta masa es de 120 g, continuando con el uso del SI Sistema Internacional las unidades de esta masa es N, así que se emplean kilogramos, es decir, la masa de los componentes del punto A es igual a 0,12 kg.

$$F(A) = -7,62 \text{ N}$$

Este análisis se realizó en un grado específico de  $90^\circ$  en el punto D, simplificando el tema y no llegar a repetir el procedimiento en cada uno los grados en los que podría estar este

punto. En la Tabla 5. Tabla de cálculos, se muestran los valores obtenidos en cuatro puntos de análisis en el punto D a partir de los cálculos propuestos (Ver sección 5. Cálculos) y el procedimiento realizado anteriormente, estos ángulos de referencia son  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$  y  $0^\circ$ .

Tabla 5. Tabla de cálculos

Posición Radianes	$\pi/2$	$\pi$	$3\pi/2$	$2\pi$
<b>W<sub>BC</sub> (rad/s)</b>	16,98	-16,98	-35,06	10,71
<b>W<sub>BE</sub> (rad/s)</b>	30,12	-30,12	59,33	-20,61
<b>V<sub>A</sub> (m/s)</b>	2,11	-2,11	4,15	-1,44
<b>a<sub>A</sub> (m/s<sup>2</sup>)</b>	-63,52	63,52	-246,44	29,72
<b>F<sub>A</sub> (N)</b>	-7,62	7,62	-29,57	3,57

Fuente. Propia

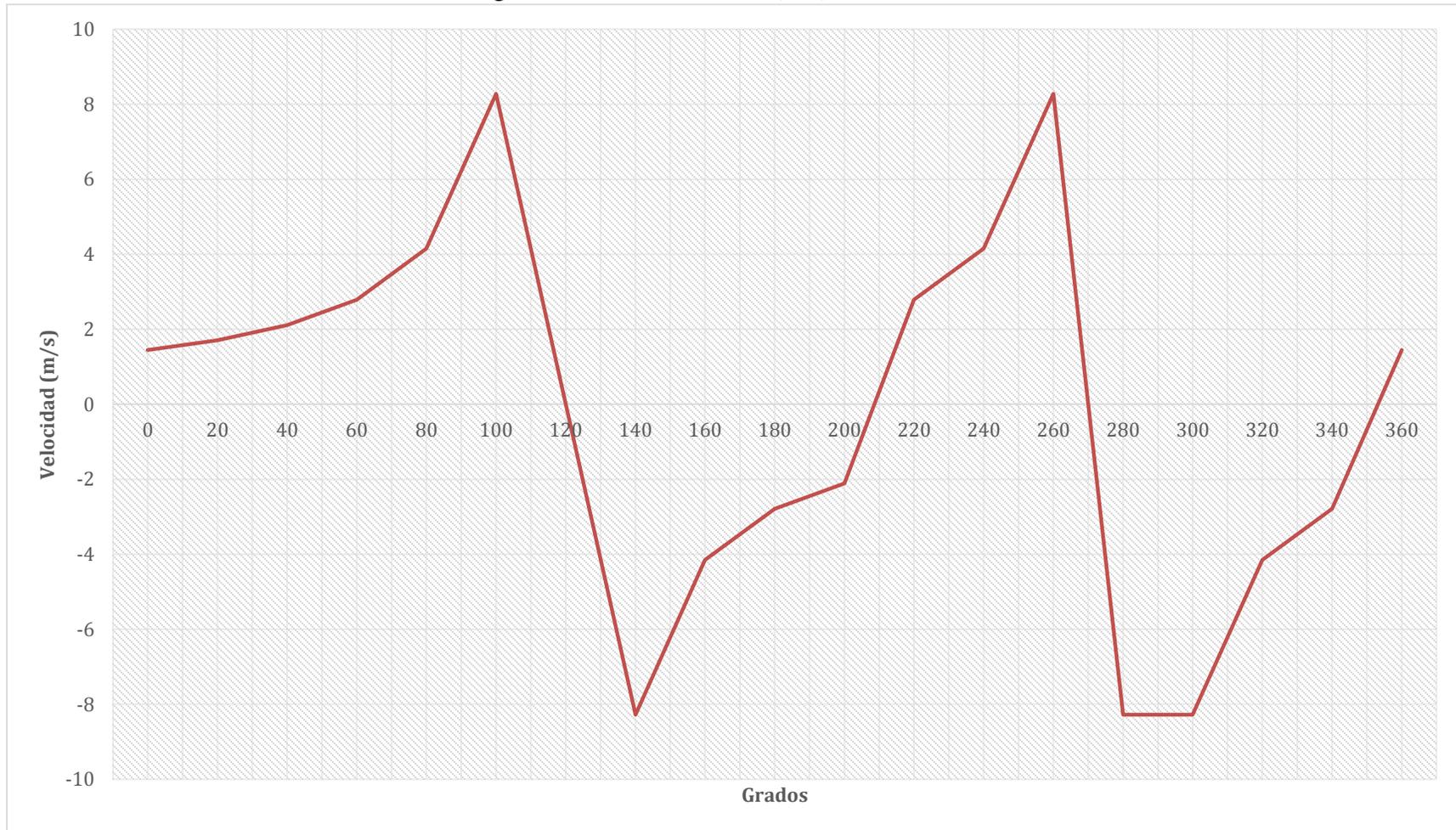
Los valores de velocidad angular en el punto D ( $w_D$ ) y velocidad en el punto C ( $V_C$ ), hallados anteriormente son constantes, ya que corresponden a un punto fijo y no cambian con el tiempo, razón por la cual no se muestran en la tabla de cálculos.

### 6.3 Graficas de cálculos

Las gráficas de velocidad, aceleración y fuerza (Ver Figura 16, 17 y 18 respectivamente), muestran la trayectoria de todo el movimiento en el punto A, teniendo en cuenta la posición en grados en la que se encuentre el punto D / C (Eje X de las gráficas). Permitiendo llenar estos vacíos no presentes en el análisis realizado y la tabla de cálculos.

### 6.3.1 Grafica de velocidad lineal en m/s para el mecanismo

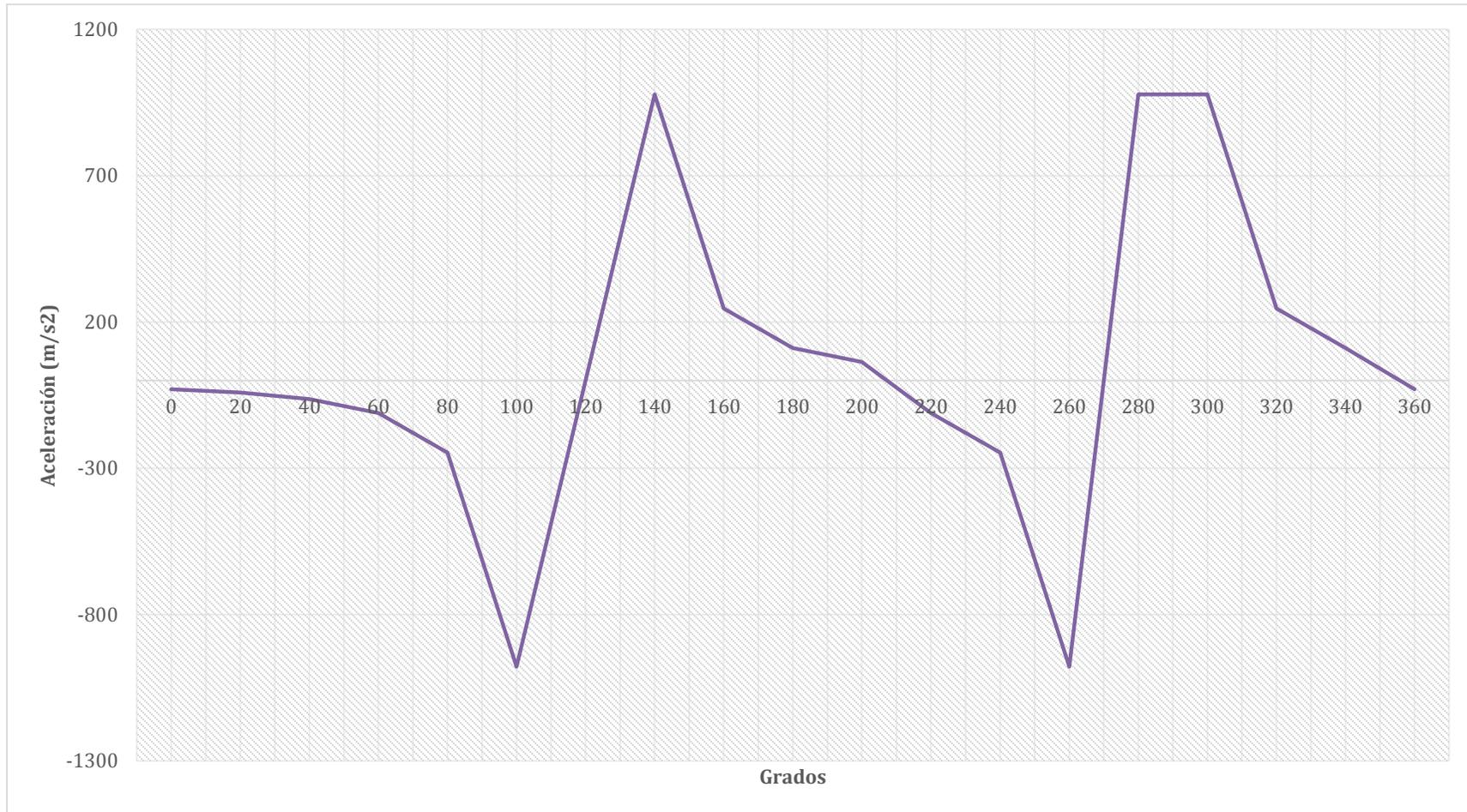
Figura 16. Velocidad lineal (m/s) del mecanismo



Fuente. Propia

### 6.3.2 Grafica de aceleración en $m/s^2$ para el mecanismo

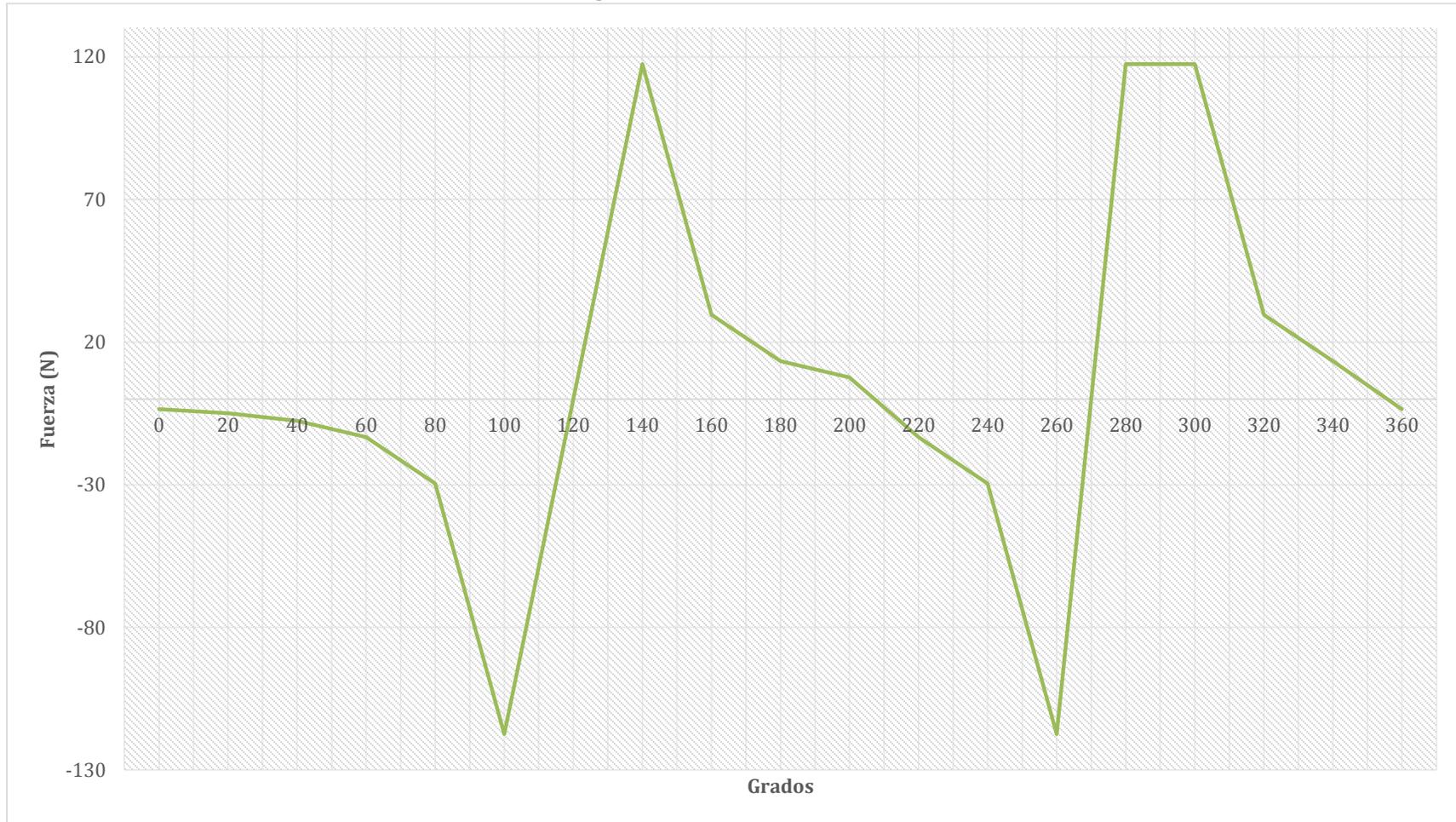
Figura 17. Aceleración ( $m/s^2$ ) del mecanismo



Fuente. Propia

### 6.3.3 Grafica de fuerzas en N para el mecanismo

Figura 18. Fuerzas en N del mecanismo



Fuente. Propia

## 7. Resultados

### 7.1 Prototipo

Al montaje final (Ver Figura 19. Montaje final), se le realizan mejoras estéticas en pintura, se cubren algunas caras abiertas, el motor es cubierto con un accesorio simulando un cuarto de control, se le agrega una lista de partes del prototipo y una placa de presentación. Ver anexos.

El motor cuenta con dos velocidades de operación y una relación 15:1 para la salida del reductor. En la velocidad 1 el motor llega a 3788.6 rpm y en la salida del reductor 253.6 rpm, en la velocidad 2 alcanza los 6338.2 rpm y una salida de 416.9 rpm; estas velocidades son obtenidas gracias a una lámpara estroboscópica y su función de tacómetro, para esto se adhiere cinta reflectiva en los puntos de interés; en este caso en el eje motriz del motor y en su salida. Esta velocidad nos facilita la ejecución de los cálculos establecidos.

La velocidad 1 se acciona de forma directa (posición 1 en el pulsador), mientras que para la velocidad 2 (posición 2 en el pulsador) tiene un regulador de velocidad lo cual permite cambiarla y realizar pruebas en diferentes velocidades.

Figura 19. Montaje final



Fuente. Propia

El prototipo simula satisfactoriamente la acción de una bomba de extracción de petróleo real, es autocebante y funciona con derivados del petróleo, para nuestro caso aceite semi sintético de segunda, empleado en motocicletas.

El caudal se establece con un cronometro y un beaker o vaso precipitado, llegando a 100 ml/min en la velocidad 1 y duplicarlo en la velocidad 2, con 200 ml/min.

## 7.2 Planos del prototipo

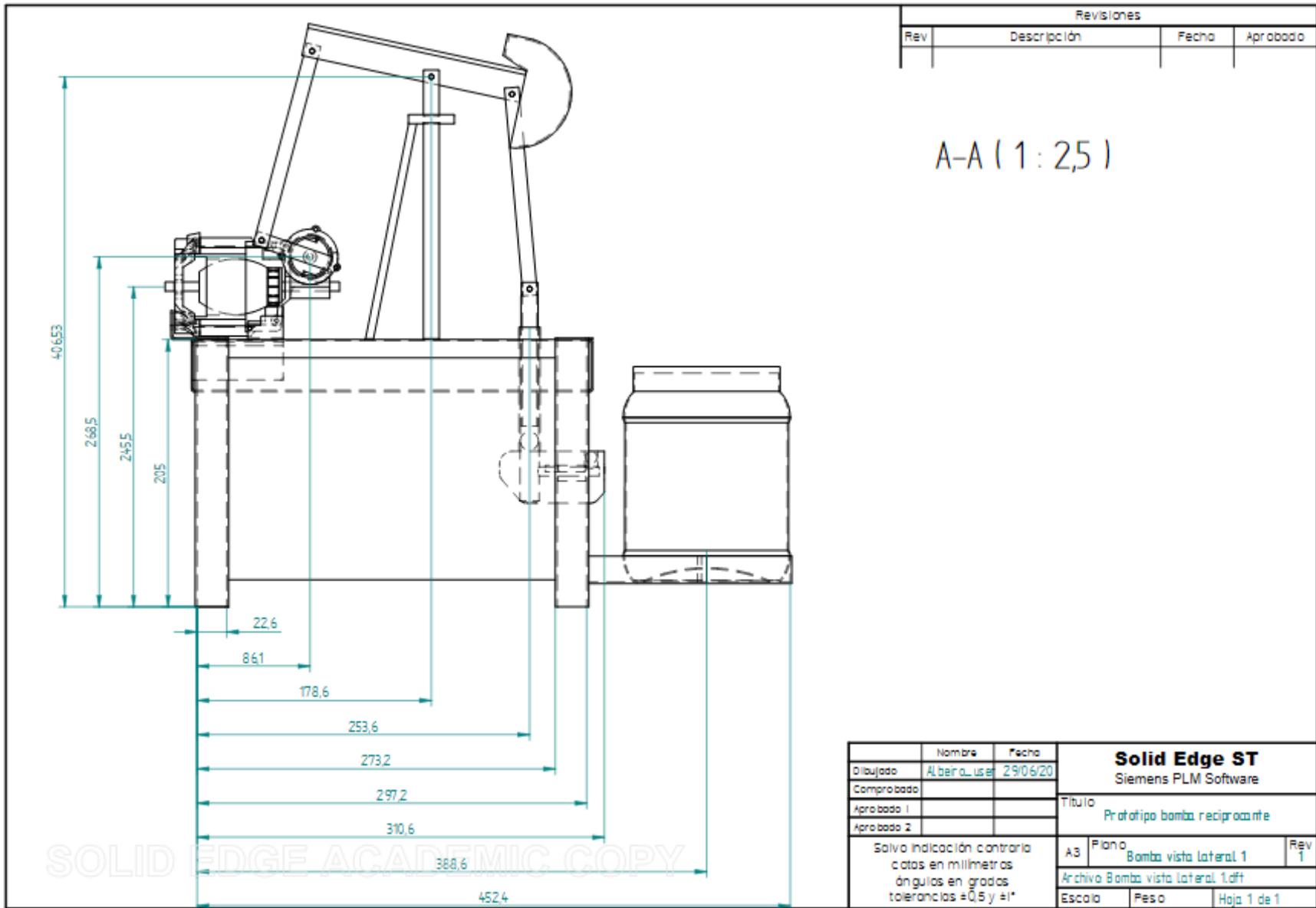
Los planos del prototipo se realizan en el software Solid Edge ST9 versión académica. En la siguiente Tabla 6, se muestra el listado de los planos de diseño del prototipo.

Tabla 6. Listado de planos

PLANO	NOMBRE
Plano 1	Bomba vista lateral 1
Plano 2	Bomba vista lateral 2
Plano 3	Bomba detalle A
Plano 4	Bomba detalle B
Plano 5	Bomba detalle C
Plano 6	Balancín vista lateral 1
Plano 7	Balancín vista lateral 2
Plano 8	Base vista general
Plano 9	Base detalle A
Plano 10	Base detalle B
Plano 11	Base detalle C
Plano 12	Base detalle D
Plano 13	Check vista general
Plano 14	Check detalle A

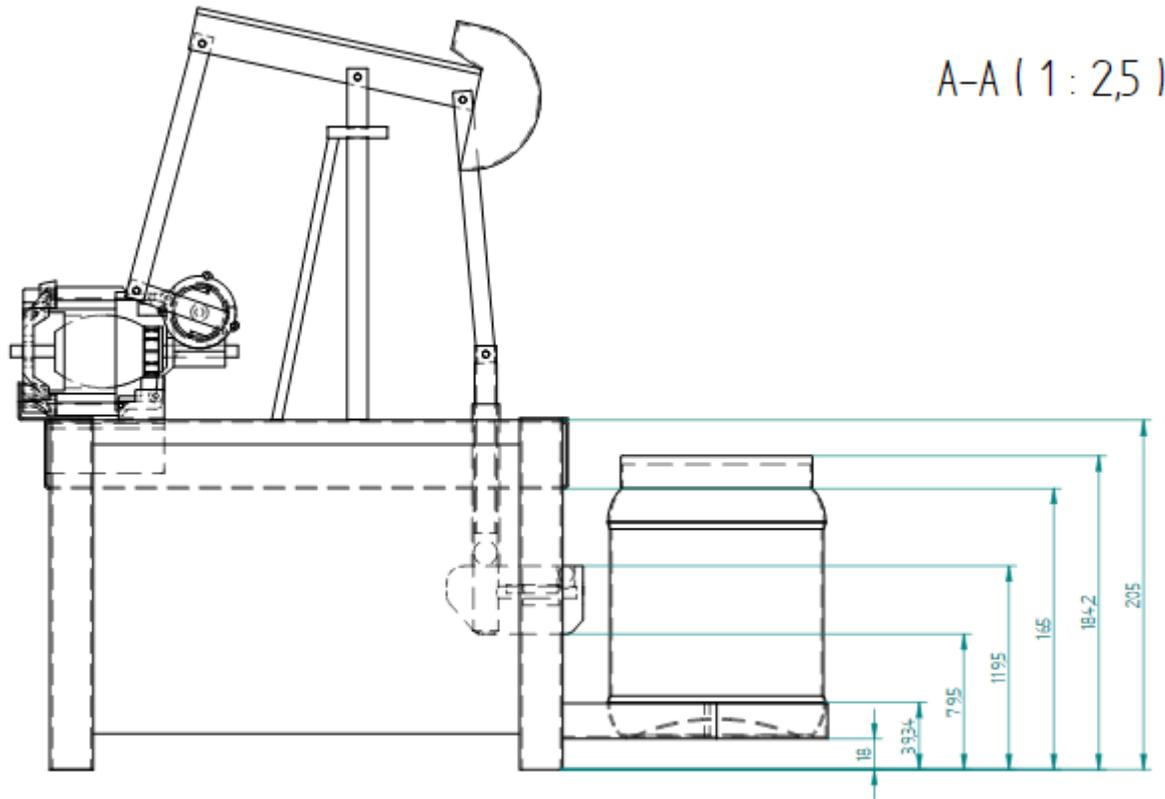
Fuente. Propia

Plano 1. Bomba vista lateral 1



Plano 2. Bomba vista lateral 2

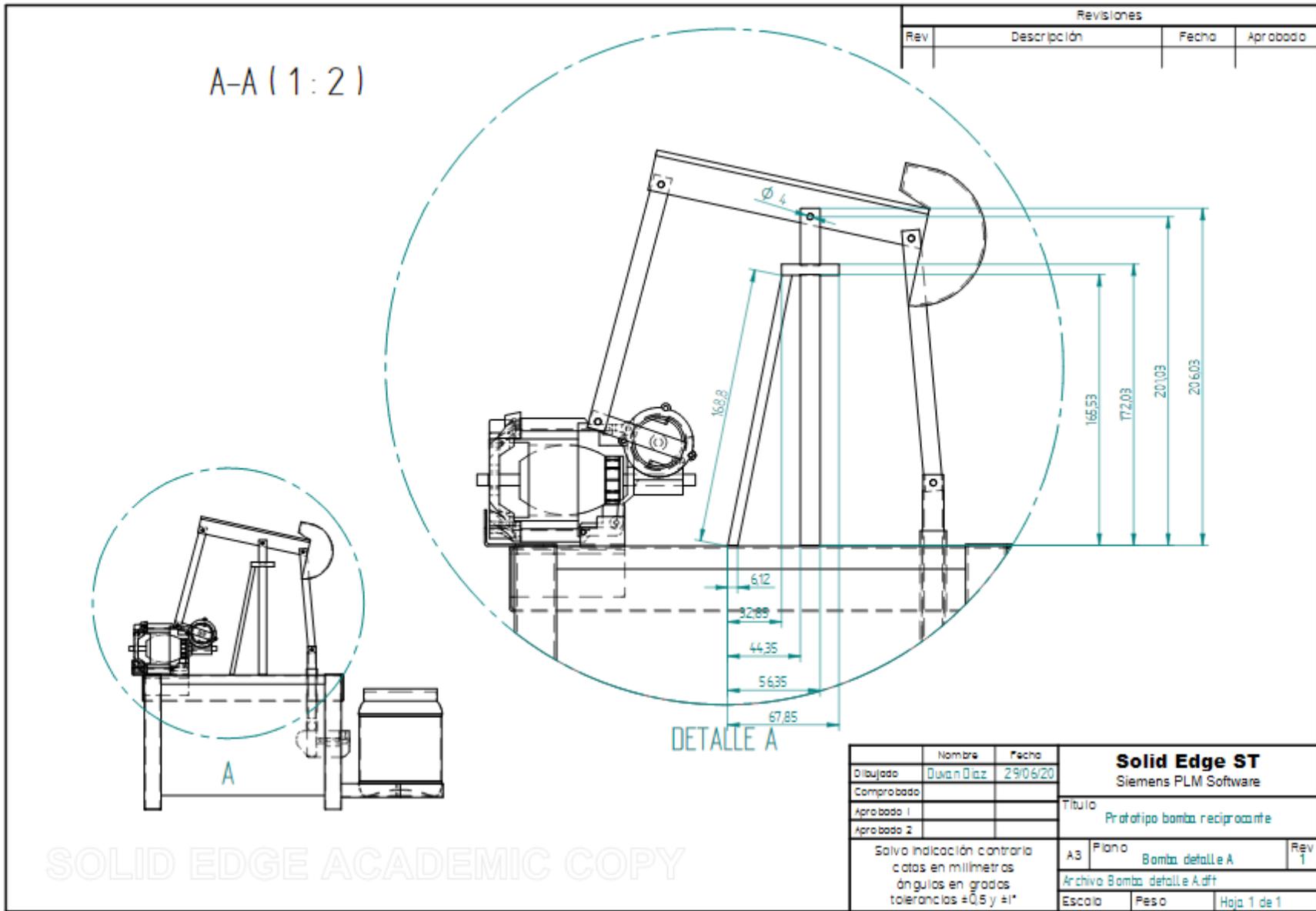
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



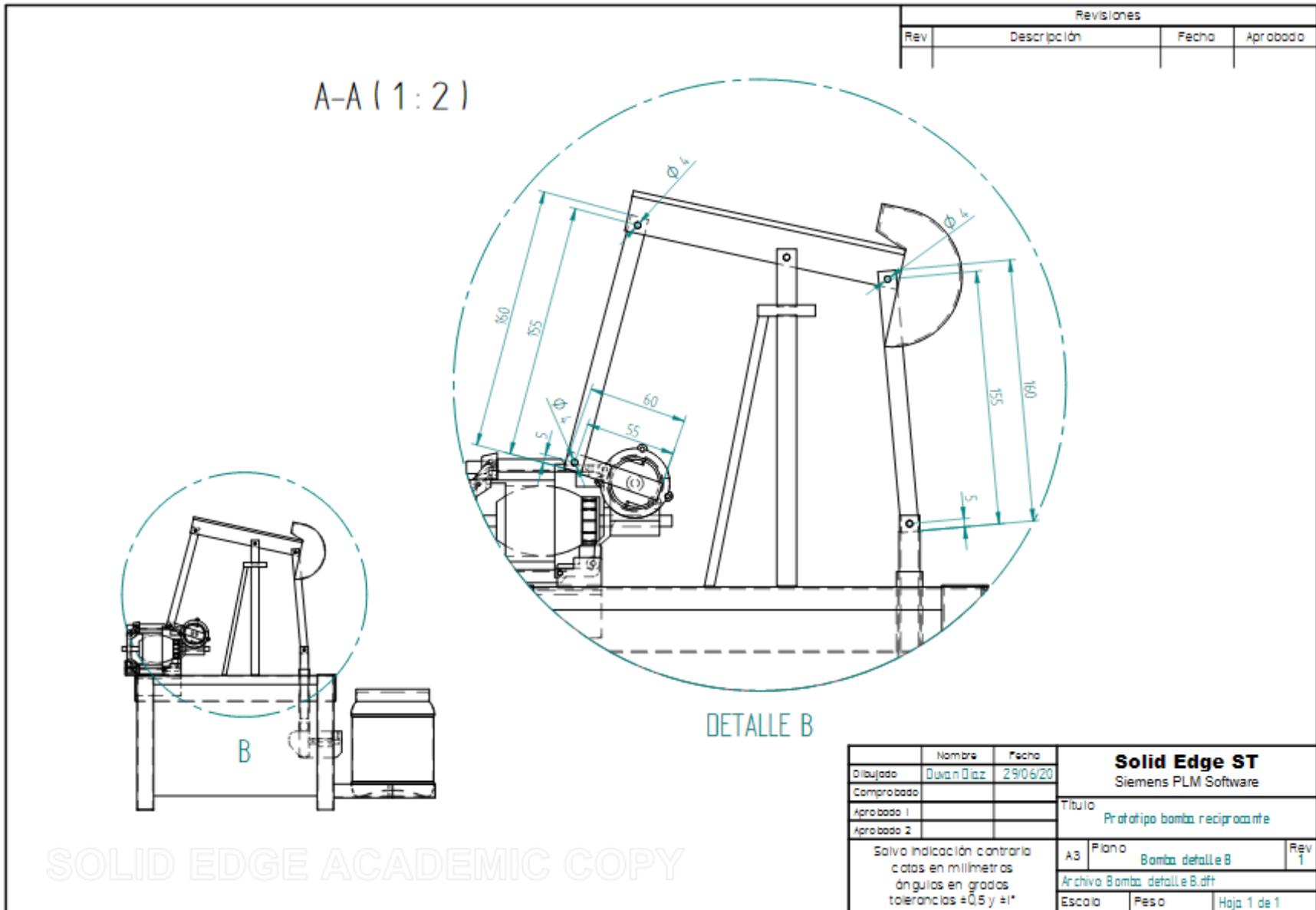
Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Comprobado	Duan Diaz	29/06/20	Siemens PLM Software	
Aprobado 1			Titulo	
Aprobado 2			Prototipo bomba reciprocante	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1*			A3	Rev 1
			Plano Bomba vista lateral 2	
			Archivo Bomba vista lateral 2.dft	
			Escala	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Plano 3. Bomba detalle A



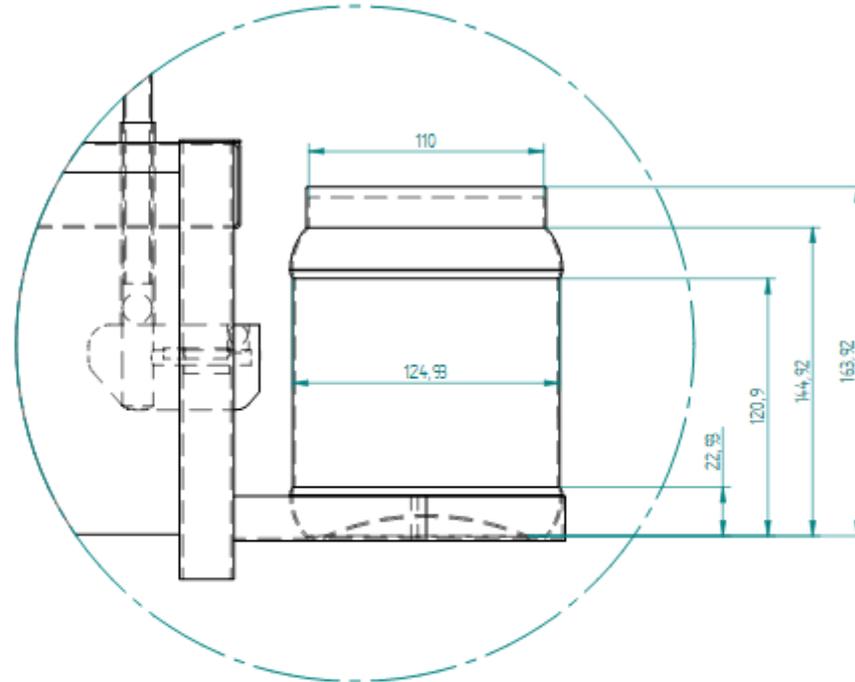
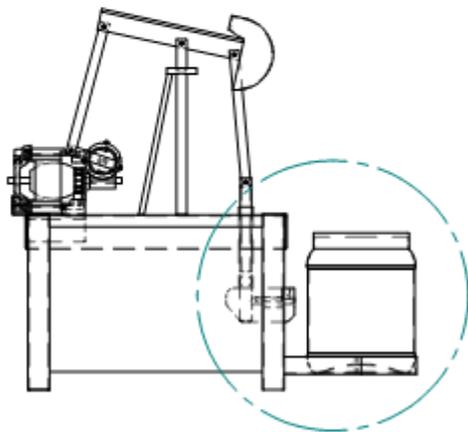
Plano 4. Bomba detalle B



Plano 5. Bomba detalle C

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

A-A (1:2)



DETALLE C

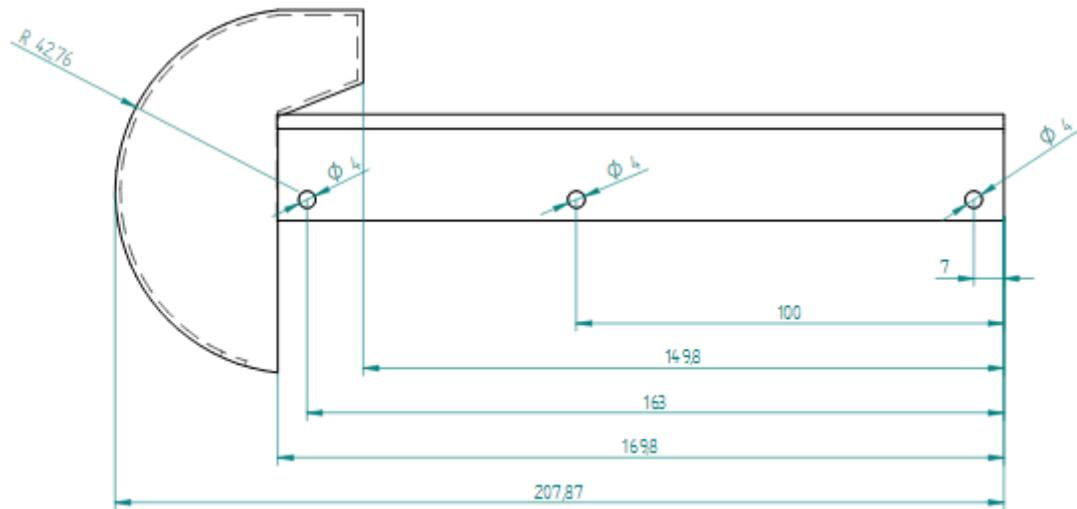
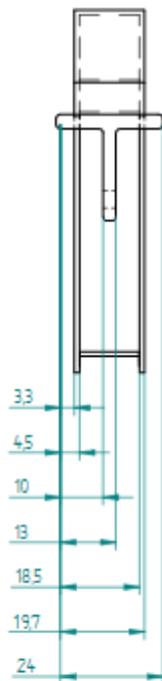
SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Comprobado	Duvan Diaz	29/06/20	Siemens PLM Software	
Aprobado 1			Titulo	
Aprobado 2			Prototipo bomba reciprocante	
Salvo indicación contraria cotos en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1*			A3	Plano Bomba detalle C Rev 1
			Archivo Bomba detalle C.dft	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1	

Plano 6. Balancín vista lateral 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

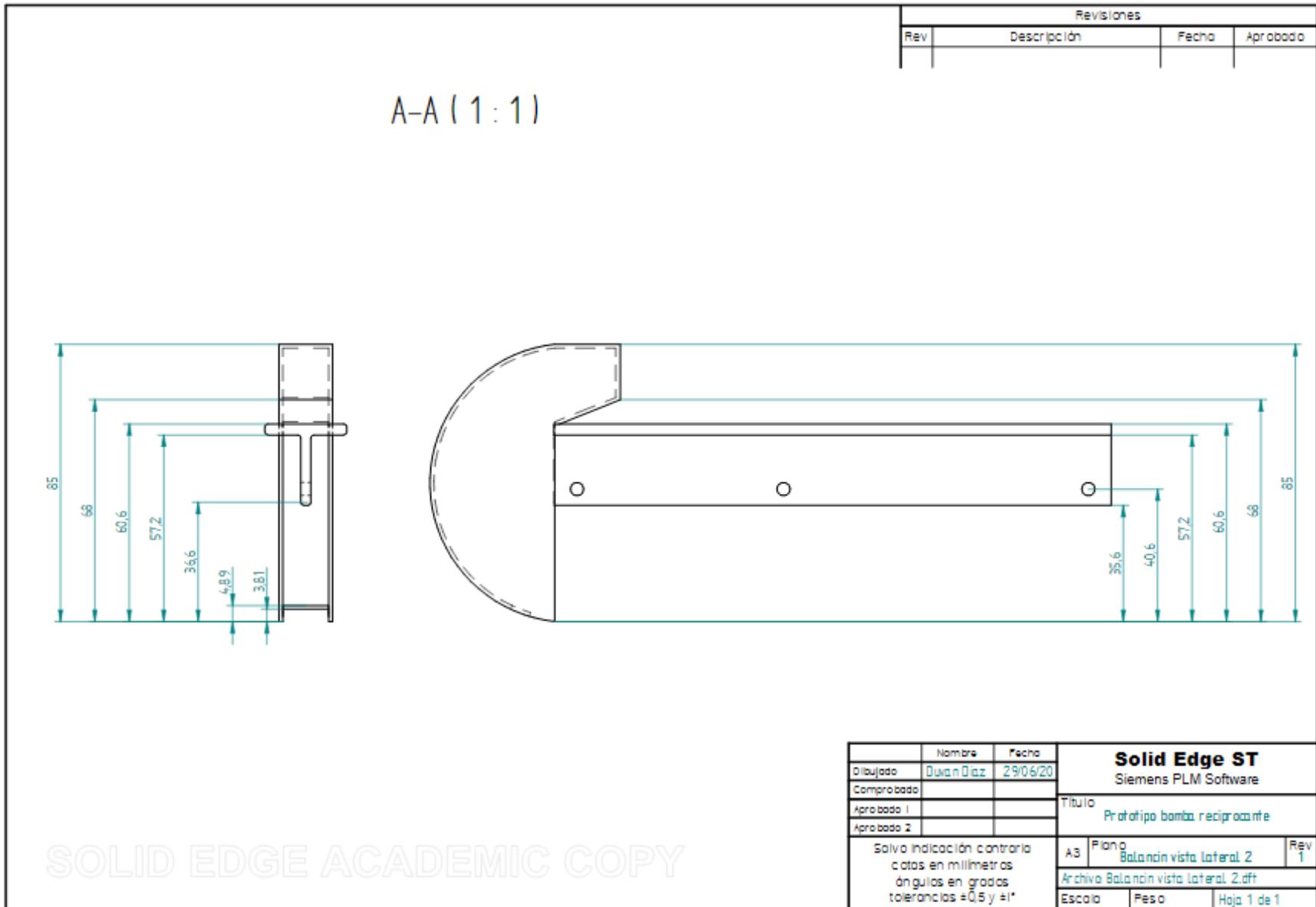
A-A (1:1)



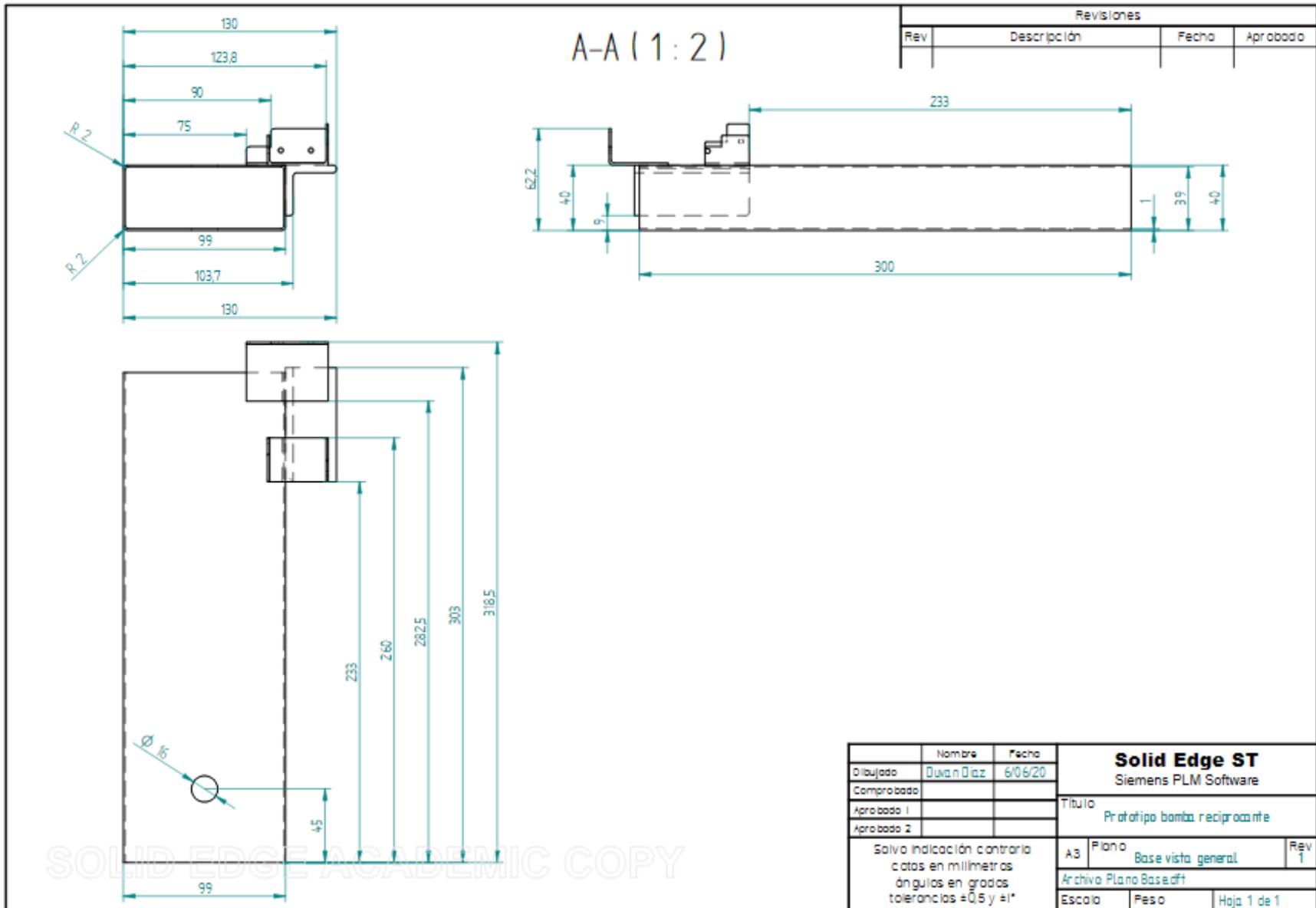
	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Dibujado	Duvan Diaz	29/06/20	Siemens PLM Software	
Comprobado			Título	
Aprobado 1			Prototipo bomba reciprocante	
Aprobado 2			A3	Plano Balancin vista lateral 1
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0.5$ y $\pm 1^{\circ}$				Rev 1
			Archivo Balancin- <del>en</del> lateral.dft	
			Escala	Peso
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Plano 7. Balancín vista lateral 2



Plano 8. Base vista general

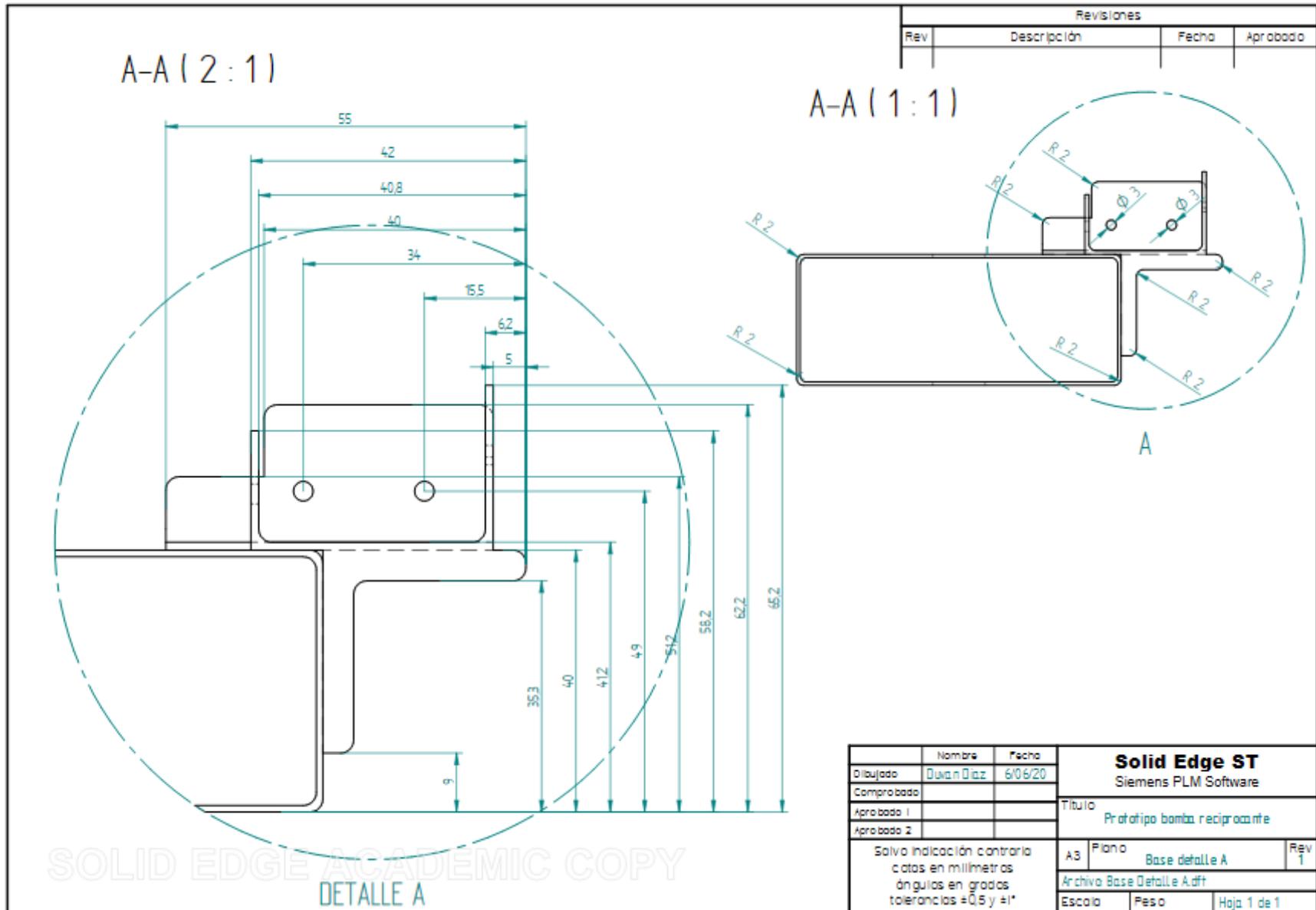


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Comprobado	Duvan Diaz	6/06/20	Siemens PLM Software	
Aprobado 1			Titulo	
Aprobado 2			Prototipo bomba reciprocante	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1*			A3	Plano Base vista general Rev 1
			Archivo: Plano Base.aff	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

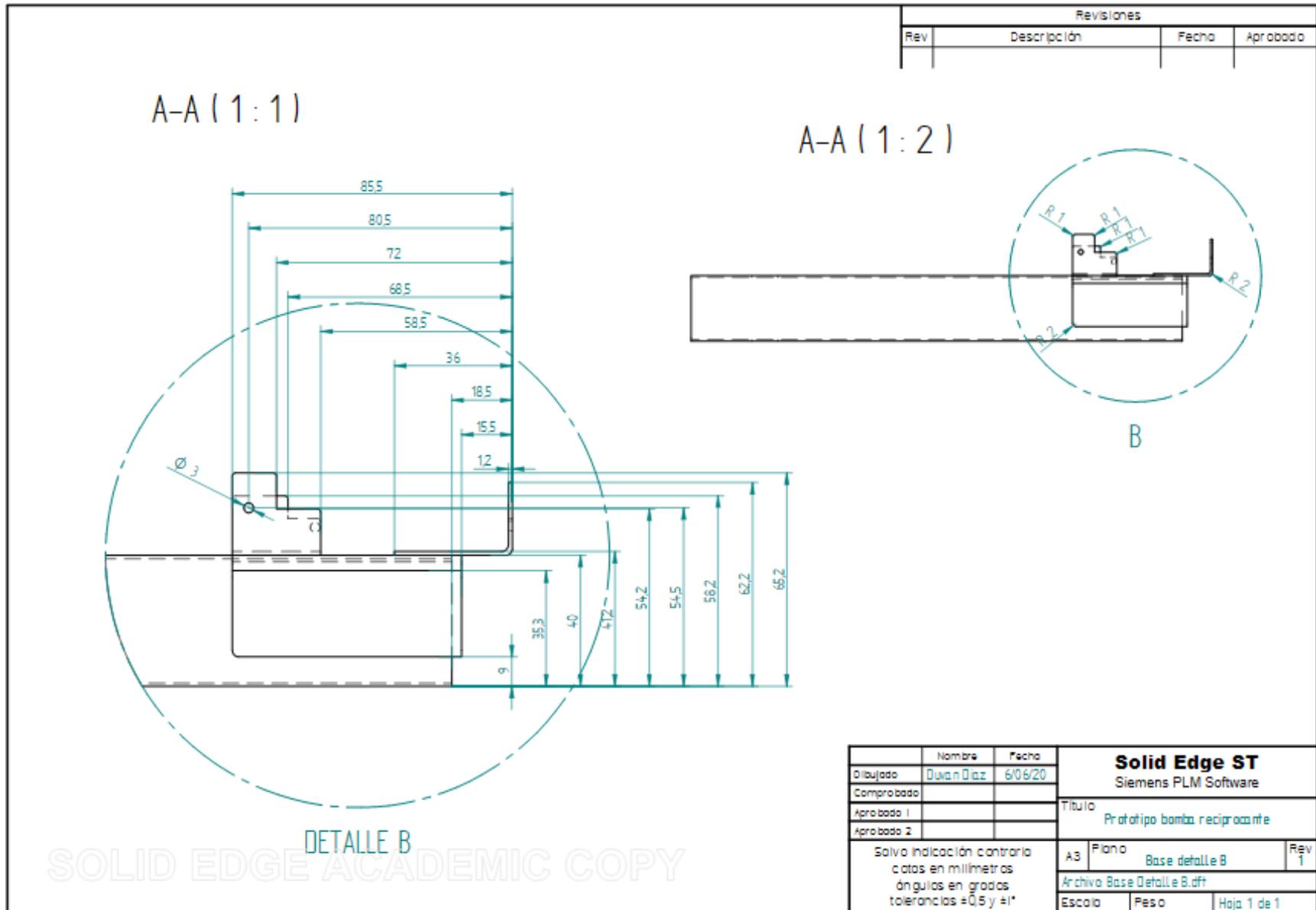
Plano 9. Base detalle A



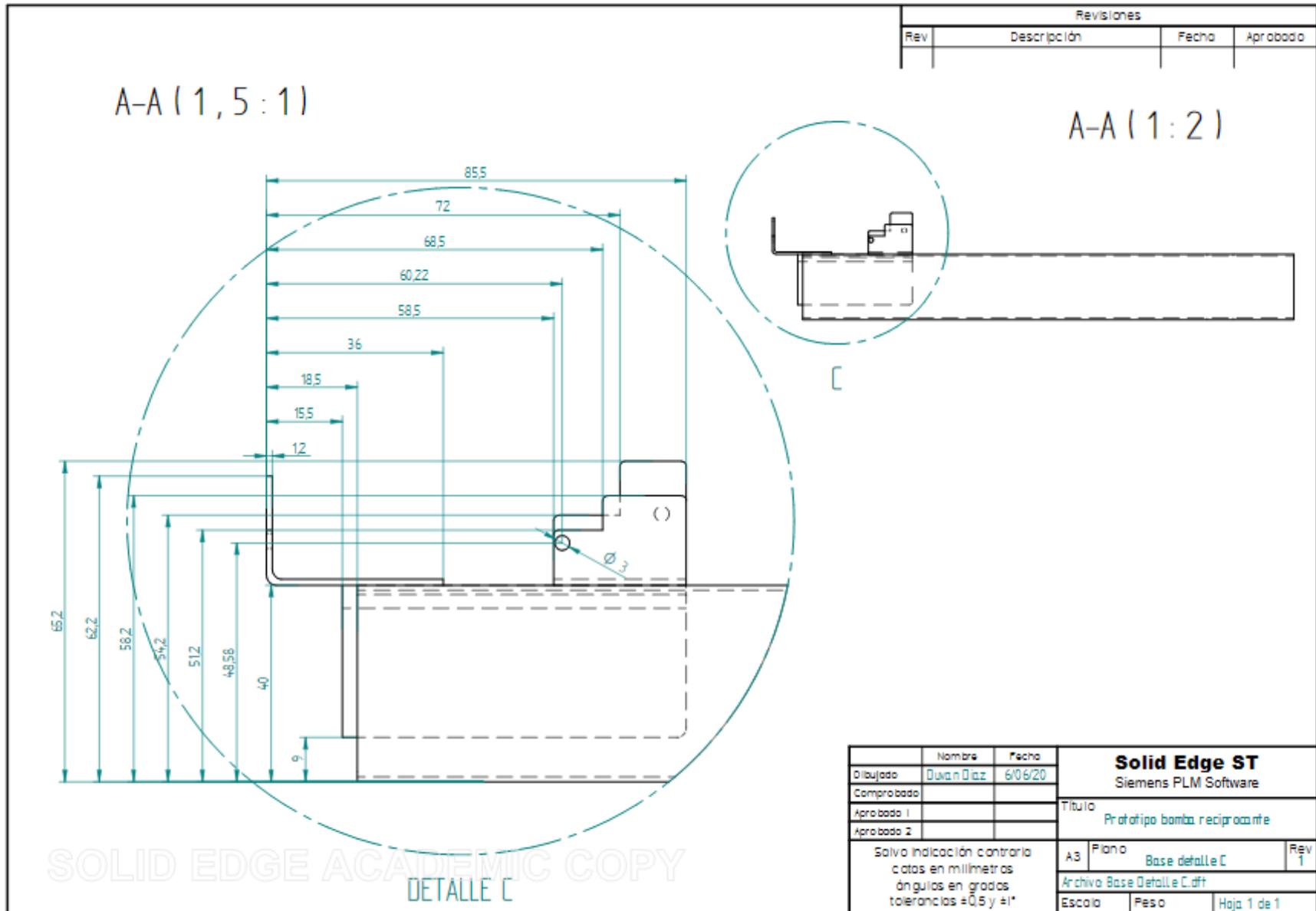
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Comprobado	Duvan Diaz	6/06/20	Siemens PLM Software	
Aprobado 1			Titulo	
Aprobado 2			Prototipo bomba reciprocante	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0.5 y ±1*			A3	Plano
			Base detalle A	
Archivo Base Detalle A.dft			Rev	1
Escola	Peso	Hoja 1 de 1		

Plano 10. Base detalle B



Plano 10. Base detalle C



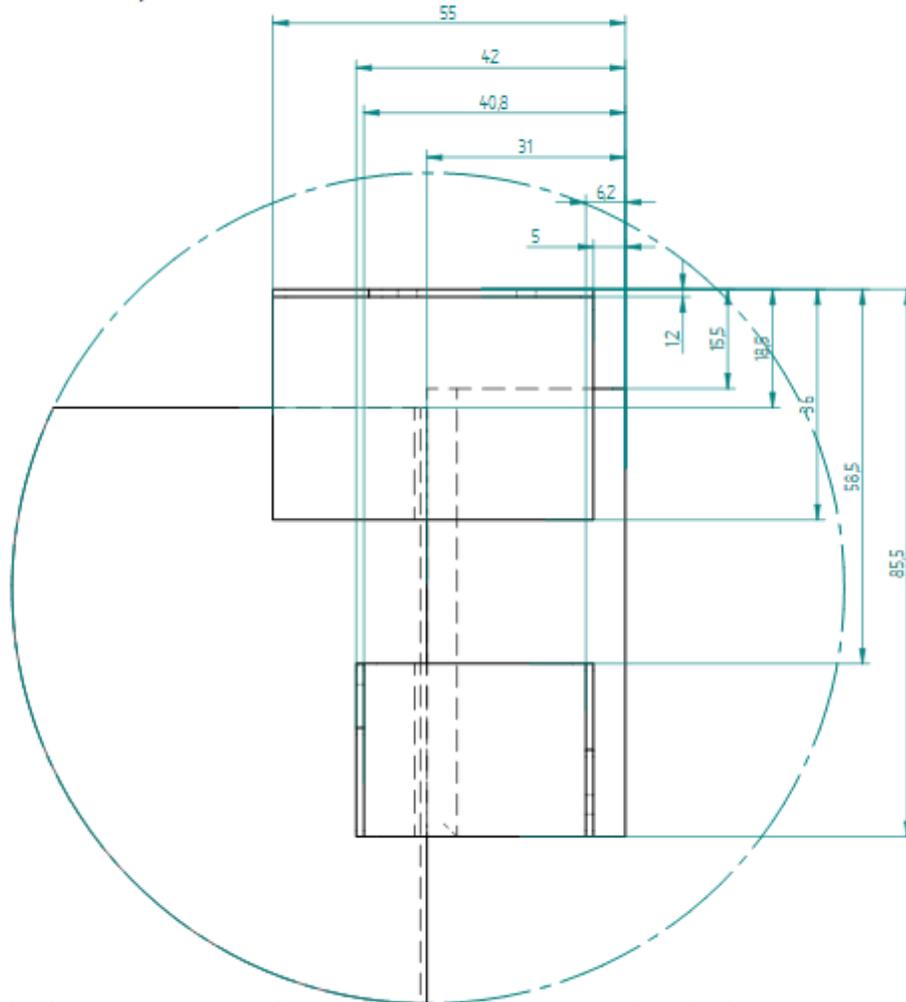
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Comprobado	Duvan Diaz	6/06/20	Siemens PLM Software	
Aprobado 1			Titulo	
Aprobado 2			Prototipo bomba reciprocante	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1*			A3	Plano Base detalle C Rev 1
Archivo Base Detalle C.dft			Escola	Peso
			Hoja 1 de 1	

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Plano 12. Base detalle D

A-A (1,5 : 1)

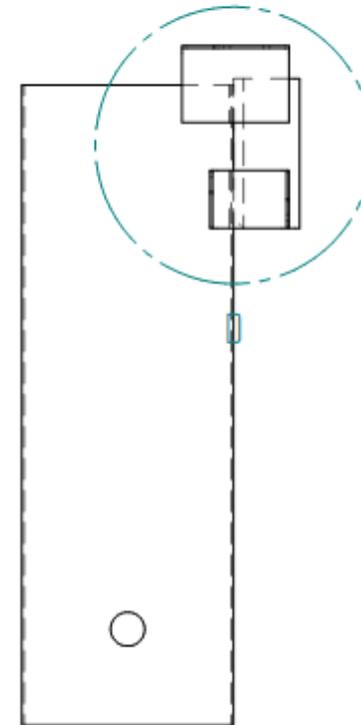


DETALLE D

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

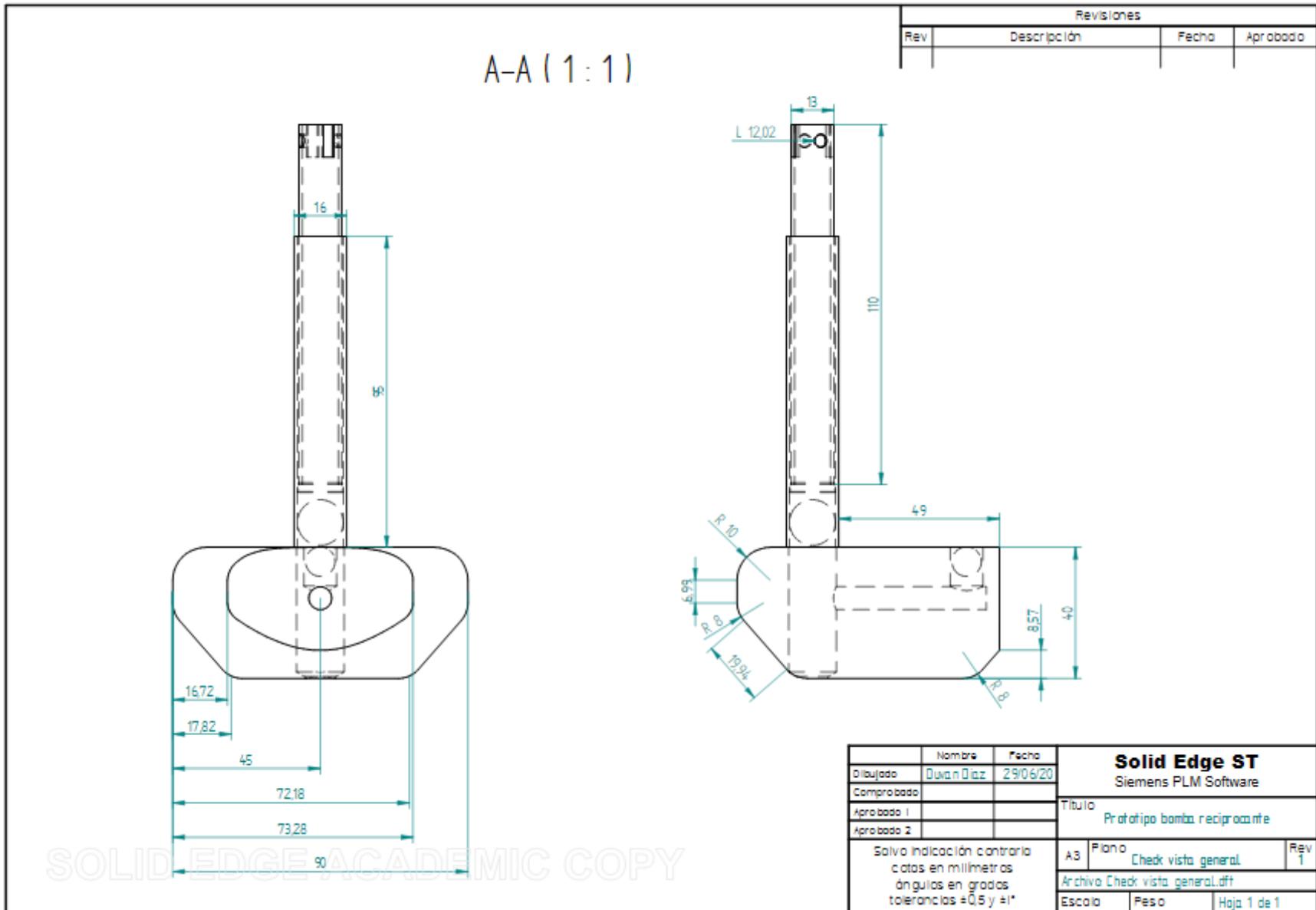
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

A-A (1 : 2)

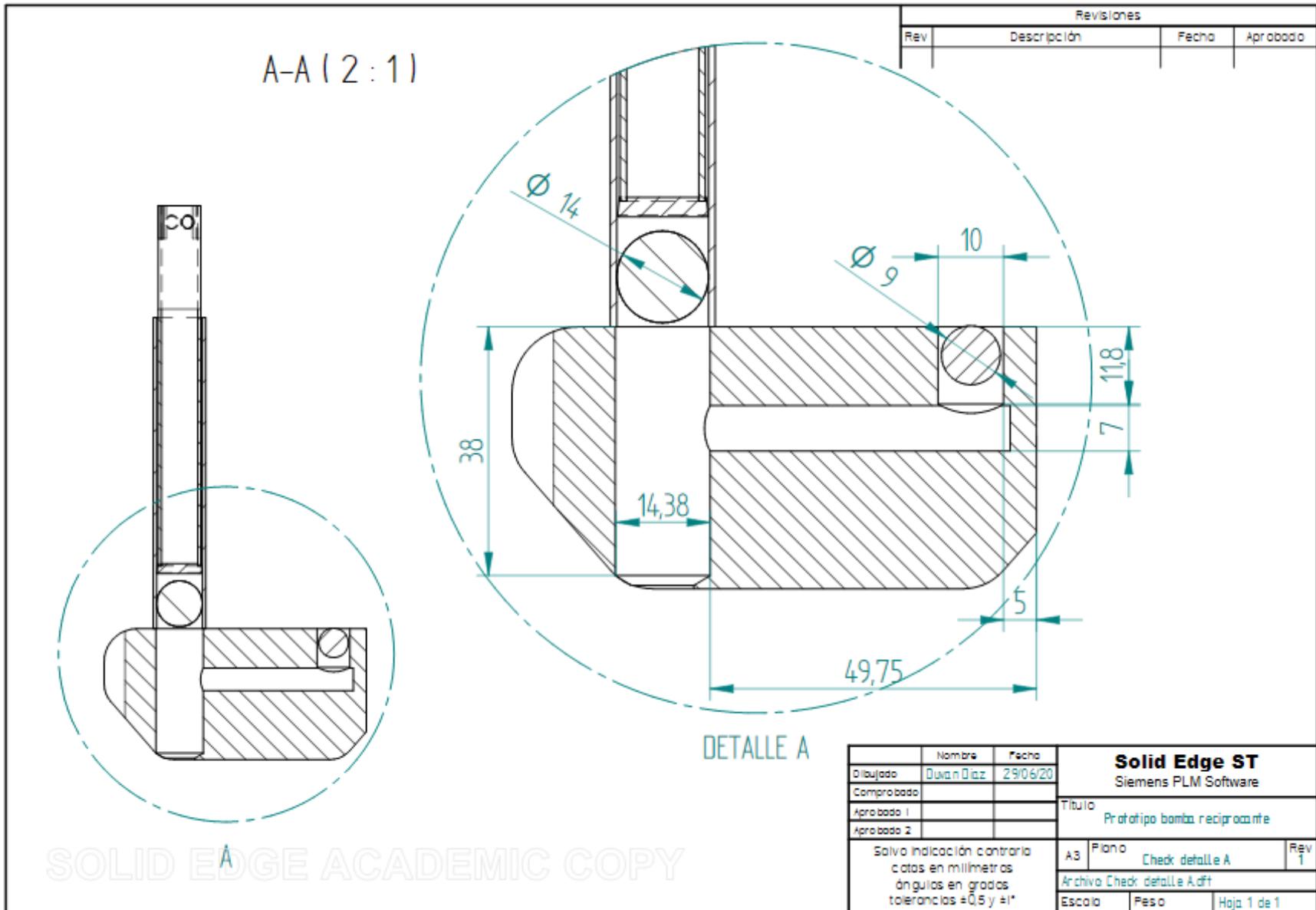


Dibujado	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Comprobado	Duvan Diaz	6/06/20	Siemens PLM Software	
Aprobado 1			Titulo	
Aprobado 2			Prototipo bomba reciprocante	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1*			A3	Plano Base detalle D Rev 1
			Archivo Base Detalle D.dft	
Escala		Peso	Hoja 1 de 1	

Plano 13. Check vista general



Plano 14. Check detalle A



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

## 8. Conclusiones

Se diseñó y construyó un prototipo funcional de una bomba reciprocante usada en la industria petrolera, permitiendo la enseñanza de diferentes competencias como lo son: mecánica de fluidos, diseño y dinámica.

Esta bomba reciprocante permitió la simulación de un proceso real de una bomba de desplazamiento positivo de extracción de petróleo y los materiales empleados para su fabricación permitirán futuras investigaciones del estudio de desgaste en mecanismos reciprocantes.

Los valores de velocidad, aceleración y fuerzas presentes calculados fueron tabulados y graficados permitiendo evidenciar un movimiento sinusoidal en el vástago de la bomba evidenciando por ejemplo que en la posición de  $115^\circ$  en el punto D, presento el máximo valor en velocidad en dirección positiva, mientras que en aceleración en el mismo punto el valor está en dirección negativa.

Se definieron planos de montaje correspondientes permitiendo una posible reproducción futura o reformas al mismo.

## 9. Bibliografía

1. ABB. Soluciones ABB para control y movimiento de bombeo mecánico. Colombia. Recuperado <https://new.abb.com/docs/librariesprovider78/capacitaciones/programa-entrenamiento-colombia/catalogos/soluciones-para-bombeo-mec%C3%A1nico.pdf?sfvrsn=2>
2. Brennen Christopher E. (2011). Hydrodynamics of pumps. Editorial Cambridge University. United States of America.
3. Buitrago Jaime (2014). Diseño, construcción y experimentación de una bomba recíproca de doble efecto. Proyecto de grado. Universidad de los Andes. Bogotá Colombia.
4. Cano Sergio Alejandro. (2014). Anteproyecto máquina petrolera. Bogotá Colombia. Recuperado <https://prezi.com/t6ehxb1ddlk0/proyecto-la-maquina-petrolera/>
5. Cardona Salvador, Clos Daniel. (2001). Teoría de Máquinas, 1 edición. Editorial UPC. Barcelona España.
6. Cengel Yunus A. Cimbala John M. (2010). Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones, 2 edición. Editorial Mc Graw Hill Interamericana editores, S.A de C.V. México.
7. Corredor Julie. (2014). Hoja de cálculo programada para el diseño de una estación de bombeo de agua residual con base de datos de bombas sumergibles. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Bogotá Colombia.
8. Dabrowski Alexander. Guelfo Tomás. Sierra Tomás. (2017). Uso y Aplicaciones de Equipos “Pump Off Controller” en Bombeo Mecánico. Especialización en producción de petróleo y gas natural. ITBA Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Buenos Aires Argentina. Recuperado <https://pdfs.semanticscholar.org/f445/c799074cd6255848f99616c9070970766ccf.pdf>
9. Diaz Pedro. Acevedo Melany. López German. (2012). Bombeo mecánico. Cundinamarca Colombia. Recuperado. <https://es.slideshare.net/gabosocorro/bombeo-mecanico-presentacion>
10. Dulce Fabián. (2008). Desarrollo de un banco de pruebas para bombas recíprocas de desplazamiento positivo. Universidad de los Andes. Bogotá Colombia. Recuperado <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/20383/u336064.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
11. GTS Fran. (2013) ¿Cuál es el mejor aceite para mi moto? Madrid España. Recuperado <https://experienciasdeunmotero.wordpress.com/2013/09/24/cual-es-el-mejor-aceite-para-mi-moto/>
12. Mata Diana. Sistemas de bombeo en la industria petrolera. Colombia. Recuperado [https://www.academia.edu/35005680/SISTEMAS\\_DE\\_BOMBEO\\_EN\\_LA\\_INDUSTRIA\\_PETROLERA](https://www.academia.edu/35005680/SISTEMAS_DE_BOMBEO_EN_LA_INDUSTRIA_PETROLERA)

13. Norton Robert. (2009). Diseño de maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos, 4 edición. Editorial McGraw-Hill/Interamericana editores S.A. de C.V. México D.F.
14. Obando Raúl. (2014). Análisis de factibilidad técnico-económica para el cambio de levantamiento artificial de bombeo electro sumergible a bombeo mecánico convencional en pozos con alto corte de agua y baja producción de petróleo en el bloque Tarapoa. Universidad Tecnológica Equinoccial Facultad. Quito Ecuador.
15. Potter Merle C. Wiggert David C. (1998). Mecánica de fluidos, 2 edición. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. Naucalpan de Juárez México.
16. Prieto Ortiz Juan Luis. Máquinas e instalaciones hidráulicas y eólicas. Editorial Dextra Editorial S.L. Madrid España.
17. Quima. (2018) ¿Qué es una válvula check? México. Recuperado. <https://quima.com/blogs/blog/que-es-una-valvula-check>
18. Ramírez Lizbeth. (2010). Bombas reciprocantes. SENATI. Ayacucho Perú. Recuperado [http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/bombas\\_reciprocantes\\_ramirez.pdf](http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/bombas_reciprocantes_ramirez.pdf)
19. Rey Blas Octavio. (2004). Optimización de operación del sistema de bombeo mecánico de la sección 67 de los campos petroleros. Bucaramanga Colombia. Recuperado <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2004/113536.pdf>
20. Rodríguez Rafael. (2000). Optimización del bombeo mecánico del campo tigre. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil Ecuador.
21. Useche Daniel. (2013). Caracterización de una bomba reciprocante de pistón simple con una válvula de acople flotante. Proyecto de grado. Universidad de los Andes. Bogotá Colombia. Recuperado. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/19719/u671335.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy+%&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
22. Viejo Zubicaray (2000). BOMBAS, Teoría, diseño y aplicaciones, 2 edición. Editorial Limusa, S.A de C.V grupo Noriega editores. Balderas 95, México DF.

## 10. Presupuesto del prototipo

Tabla 7. Presupuesto del prototipo

Proceso	Especificaciones	Costo
Horas de fabricación	50 Horas hombre	\$ 1.200.000,00
Asesoría	Construcción de informe	\$ 1.000.000,00
Piezas metálicas	Estructura	\$ 36.000,00
Motor	Compra	\$ 45.000,00
Componentes eléctricos	Interruptor, resistencia variable, cables	\$ 15.000,00
Armado	Soldadura	\$ 60.000,00
Mecanizado	Perforaciones al disco metálico (tejo)	\$ 30.000,00
Pintura	Pintura esmalte, alquiler de compresor	\$ 50.000,00
Total		\$ 2.436.000,00

Fuente. Propia

## 11. Anexos

### 11.1 PRACTICAS DE LABORATORIO

#### 1. Especificaciones

Este prototipo de enseñanza es una herramienta didáctica para simular un proceso real de una bomba de desplazamiento positivo tipo reciprocante de extracción de petróleo, con el objetivo de conceptualizar procesos y/o comportamientos de este tipo de máquinas, permitiendo que el estudiante aplique competencias como turbo máquinas, dinámica, mecanismos, entre otras, en la ejecución de las diferentes prácticas de laboratorio.

#### 2. Cuidados, recomendaciones de seguridad, instrucciones y precauciones

Este es un mecanismo dinamico, con partes móviles expuestas que podrían generar accidentes si no se tienen las medidas de seguridad mínimas para la manipulación del mismo, a continuación se establecen las precauciones y recomendaciones sugeridas para que la ejecución de las diferentes prácticas con este prototipo de enseñanza sea lo más satisfactorio posible. Garantice que el equipo está completamente detenido, bloqueado eléctricamente y garantice que no es posible que sea energizado por accidente antes de manipular las partes móviles.



1. Absténgase de portar accesorios como anillos, manillas, relojes, collares, y demás elementos que puedan ser atrapados por alguna de las partes del mecanismo.



2. Tenga en cuenta todos los cuidados y precauciones correspondientes para manejo de máquinas rotativas en movimiento.



3. Durante todas las pruebas se debe garantizar que ninguna parte quede suelta; tornillos, abrazaderas, conexiones eléctricas.



4. El equipo debe estar posicionado sobre una base rígida para iniciar las operaciones / pruebas.



5. No encender el prototipo en su máxima velocidad, esta debe ser regulada con el potenciómetro o regulador de velocidad.



6. Por ninguna razón se debe obstaculizar o bloquear la línea de descarga de fluido.



7. Es recomendable el uso de guantes para el contacto con el fluido de trabajo.



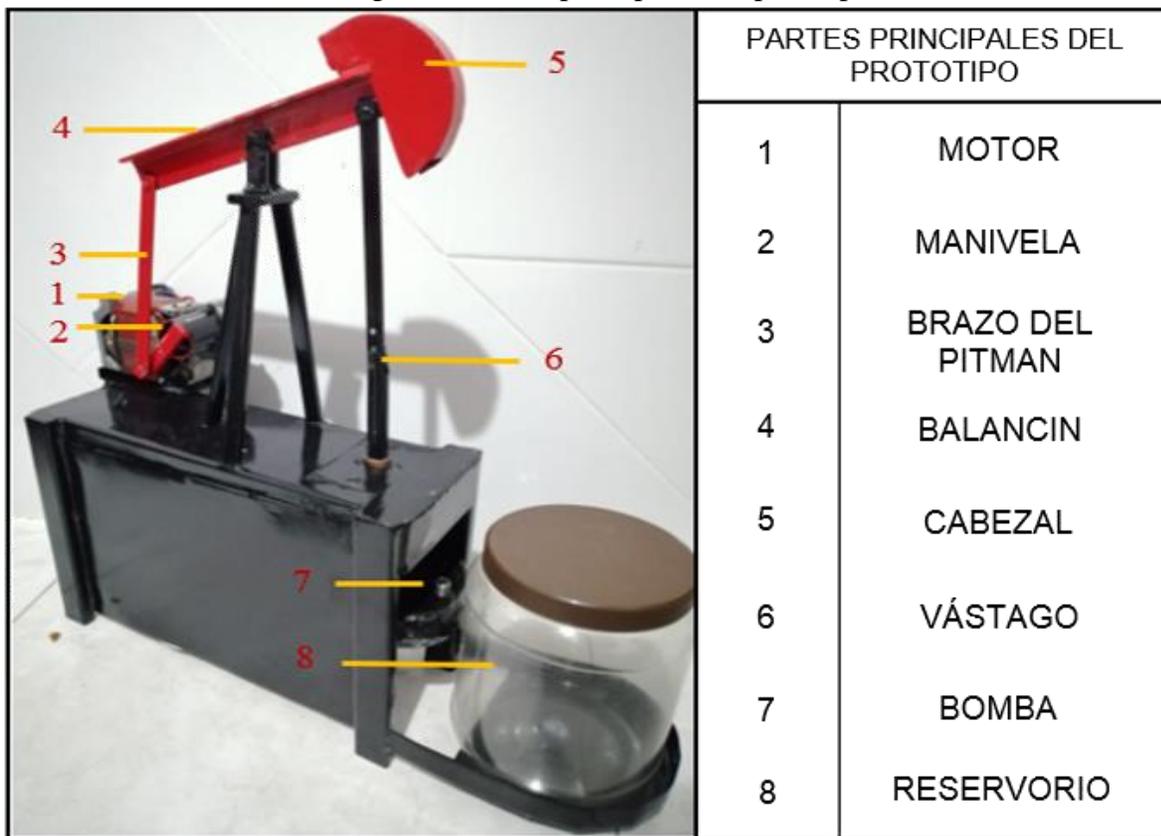
8. El prototipo de enseñanza debe ser limpiado antes y después de cada práctica.

### 3. Partes del prototipo

En la Figura A, se muestran las partes principales que constituyen el prototipo, siendo este, una copia de un mecanismo real de una bomba de desplazamiento positivo tipo reciprocante de extracción de petróleo. La potencia del equipo es generada por un motor eléctrico, capaz de mover el mecanismo sin la necesidad de volantes de inercia para evitar el agarrotamiento, sin embargo el balancín cuenta con un cabezal simulando este volante, componente representativo de este tipo de bombas.

Los materiales de la bomba son resistentes a líquidos abrasivos, permitiendo el estudio de desgaste en estos componentes con diferentes fluidos de trabajo.

Figura A. Partes principales del prototipo



Fuente. Propia

#### 4. Encendido y apagado

En esta sección se describen los procedimientos básicos de conexión del prototipo de enseñanza a una línea monofásica 110 VAC. En cualquier caso de proceso de conexión eléctrica, primero se debe verificar que ninguna conexión este suelta y a menos que se especifique lo contrario, para cada procedimiento se debe leer previamente y proceder con las instrucciones e información de seguridad incluida en la sección 2.



1. Asegurar que el interruptor de encendido este en la posición central (ver Figura B), posición apagado.
2. Conectar la clavija monofásica a la toma de corriente 110 VAC.
3. Velocidad constante de 260 rpm, interruptor de encendido en la posición I (ver Figura B).
4. Velocidad variable desde 100 rpm hasta 410 rpm, interruptor de encendido en la posición II, se aumenta o disminuye con la perilla del potenciómetro o regulador de velocidad (ver Figura B).
5. Para apagar, baje la velocidad del equipo girando la perilla del potenciómetro o regulador de velocidad hacia la izquierda y/o colocar el interruptor de encendido en la posición central (ver Figura B) y desconecte de la toma corriente.

Figura B. Encendido del prototipo



Fuente. Propia

## 5. Prácticas de laboratorio

En este capítulo se describen los procedimientos para la realización de las diferentes prácticas de laboratorio propuestas.

Antes de iniciar cualquiera de los procedimientos descritos en esta sección, siga las instrucciones de seguridad incluidas en el numeral 2.

### 5.1 Cálculos de velocidad, aceleración y fuerzas del mecanismo

- **Objetivo:**

Aplicar las ecuaciones de cinemática y física mecánica en un punto determinado.

- **Alcance:**

Determinar las diferentes magnitudes a las que está expuesto el mecanismo.

- **Materiales, equipos e instrumentos:**

Tabla A. Equipos y materiales necesarios para la práctica

ITEM	Cantidad	Unidad
Prototipo de enseñanza, bomba de desplazamiento positivo tipo reciprocante	1	Und
Flexómetro y/o calibrador	1	Und
Transportador	1	Und

- **Procedimiento:**

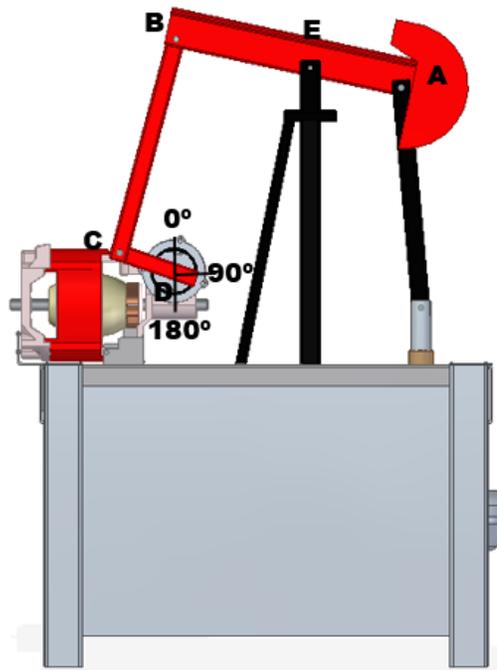
Se deben seguir las indicaciones del proceso y/o del instructor, registrando las mediciones en el respectivo formato.

1. Identifique los puntos de interés mostrados en la Figura A, con un calibrador y/o flexómetro tome y registre los valores solicitados en la Tabla B.
2. Con la ayuda de un transportador, establezca los grados entre C, B y E correspondientes a la posición de la manivela D/C, tome cuantos valores crea pertinentes y regístrelos en la tabla C.
3. Determine el valor de velocidad inicial en el punto D, en rpm para la ejecución de los cálculos. En la velocidad I es de 260 rpm, mientras que en la velocidad II esta varía entre 100 rpm y 410 rpm.
4. Registre los valores calculados en la Tabla D.
5. Para el cálculo de la fuerza en el punto A, tener en cuenta que la masa de los componentes en este punto (cabezal y vástago de la bomba) es de 120 g.

- **Actividades de laboratorio propuestas:**

1. Con los valores registrados en la Tabla D, cree una hoja de cálculo en Excel, rellene los valores entre los puntos notables D/C y grafique cada una de las magnitudes calculadas.
2. Compare y analice las gráficas. ¿A qué se debe su cambio?, ¿Son congruentes con el comportamiento de este tipo de mecanismos?, ¿Cuáles son los posibles errores que podrían afectar el proceso?

Figura A. Puntos de análisis en el prototipo



Fuente. Propia

Tabla B. Distancia entre los puntos de interés

Punto	Valor	Unidad
D		rpm
D / C		
C / B		
B / E		
E / A		

Tabla C. Grados entre C, B y E respecto a D/C

Posición manivela D/C	Grados entre C, B, E	Unidad

Tabla D. Valores calculados

Posición Radianes D/C	$\pi/2$	$\pi$	$3\pi/2$	$2\pi$
<b><math>W_{BC}</math> (rad/s)</b>				
<b><math>W_{BE}</math> (rad/s)</b>				
<b><math>V_A</math> (m/s)</b>				
<b><math>a_A</math> (m/s<sup>2</sup>)</b>				
<b><math>F_A</math> (N)</b>				

3. Establezca sus conclusiones y recomendaciones.

## 5.2 Determinación fuerzas inducidas por chorros

- **Objetivo:**

Determinar, analíticamente y experimentalmente la fuerza inducida por chorros de diferentes viscosidades y diferentes velocidades del mecanismo.

- **Alcance:**

Establecer diferencias entra las fuerzas por condiciones de viscosidad del fluido y/o velocidad del mecanismo.

- **Materiales, equipos e instrumentos:**

Tabla A. Equipos y materiales necesarios para la práctica

ITEM	Cantidad	Unidad
Prototipo de enseñanza, bomba de desplazamiento positivo tipo recíprocante	1	Und
Calibrador	1	Und
Líquido	1	L
Beaker	1	Und
Cronometro	1	Und

- **Procedimiento:**

Se deben seguir las indicaciones del proceso y/o del instructor, registrando las mediciones en el respectivo formato.

1. Posicione el prototipo de enseñanza sobre una superficie plana, siga los cuidados y recomendaciones de seguridad incluidos en la sección 2 y los pasos de encendido incluidos en la sección 4.
2. Determine/investigue la densidad del líquido de trabajo y agréguelo en el reservorio del prototipo de enseñanza.
3. Encienda el equipo y establezca una velocidad de referencia.
4. Mida el caudal experimental y regístrelo en la Tabla B.
5. Repita el paso 4 para otras 5 velocidades del mecanismo.
6. Para cambiar el líquido de trabajo, apague y desconecte el prototipo, drene y limpie el reservorio y repita los pasos 1 a 5.
7. Apague y desconecte el prototipo, limpie todos los elementos utilizados.

- **Actividades de laboratorio propuestas:**

1. Con los valores registrados en la Tabla B, determine experimentalmente la fuerza producida por el chorro para 5 caudales diferentes. Grafique los resultados y coméntelos.
2. Calcule la velocidad de descarga para 5 caudales diferentes.
4. Utilizando la ecuación de momento lineal para flujos de fluido, calcule la fuerza producida por el chorro para 5 caudales diferentes. Grafique los resultados y compárelos con los resultados experimentales.

Tabla B. Datos medidos durante la práctica de laboratorio

Líquido de trabajo			
Densidad del líquido	Vel del prototipo	Caudal Q	
$\rho$	rpm	L/min	m/s

5. Establezca sus conclusiones y recomendaciones.

## **6. Cuidados y limpieza**

- Todos los elementos deben mantenerse ajustados antes y después de cada práctica con el prototipo de enseñanza: tornillos, abrazaderas, conexiones eléctricas.
- Mantener una pequeña cantidad de aceite dentro de la bomba para evitar oxidación de sus componentes internos y/o encenderla regularmente.
- El reservorio debe ser drenado para su limpieza y almacenamiento.
- Con un paño limpio y seco, retirar las impurezas (polvo, líquido de trabajo) de la superficie del prototipo de enseñanza.
- No conectarlo a voltajes diferentes a los especificados.

## 11.2 Videos

Los videos relacionados con el prototipo de enseñanza fueron montados a la web Youtube.com, de forma pública. A continuación se agregan los links para su visualización.

- Video 1, funcionamiento y partes principales del prototipo de enseñanza de bomba de desplazamiento positivo tipo reciprocante de extracción de petróleo.

<https://youtu.be/ZHcC6XKUC64>

- Video 2, muestra el caudal de 100 mL/min a una velocidad de operación de 260 rpm, salida del reductor.

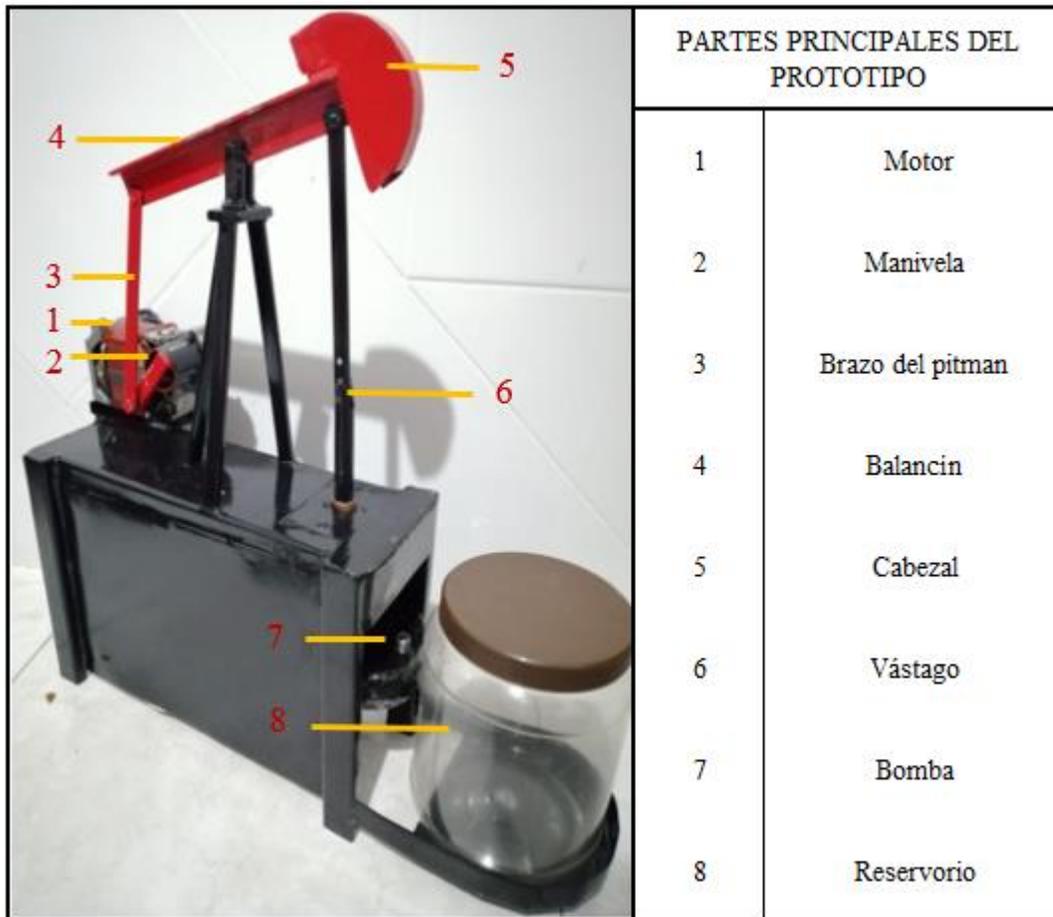
<https://youtu.be/lAwWIUYR6gU>

- Video 3, en este último video se muestra un caudal de 200 mL/min para una velocidad de 410 rpm a la salida del reductor.

<https://youtu.be/YOTPqn3Chxo>

### 11.3 Imágenes

Figura 20. Lista de partes del prototipo



Fuente. Propia

Figura 21. Placa de presentación



Fuente. Propia