

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD AZCAPOTZALCO

Ingeniería Mecánica

Proyecto Tecnológico

Proyecto de Integración en Ingeniería Mecánica I

Brazo de robot con seis grados de libertad

César Luis Nopal Ramírez

210200654

Asesores

Dr. Miguel Magos Rivera

Ing. Romy Pérez Moreno

**Trimestre 16 I.**

**Febrero 2016.**

Yo, Miguel Magos Rivera, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, Romy Pérez Moreno, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

Yo, César Luis Nopal Ramírez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco.

## Agradecimientos

*Quiero darte gracias Dios por estar conmigo en todos los momentos de mi vida, porque en mi días de debilidad tú me diste la fortaleza para poder seguir avanzando y por las grandes Bendiciones que has introducido a mi vida. Gracias Papá Lorenzo Nopal Jexmaye, porque tú has sido el motor que impulso mi vida a ser cada día mejor y con tu ejemplo a no rendirme ante las adversidades de la vida. Gracias Mamá Flvira Ramírez Hernández, porque tú me enseñaste el valor de la humildad, este gran don que solo se pueden encontrar en personas extraordinarias como tú. Gracias Htermano Victor Hugo Nopal Ramírez, por estar conmigo, por ese gran apoyo que hizo que mis fuerzas se renovaran cada día, porque en los momentos buenos y malos has estado conmigo. Gracias Htermana Ivette Nopal Ramírez, porque siendo la más pequeña de nuestra familia, has sido la más grande, porque tu impulsas a toda la familia, y nos renuevas cada día con tu ternura y tu amor hacia los demás. Gracias Anay Nallely Nopal Romero, por apoyarme en este gran camino de la vida, por ser mi confidente y mi gran amiga.*

*Quiero agradecer al Dr. Miguel Magos Rivera por deme la oportunidad de formar parte de su equipo y el poder aportar mi granito de arena con este proyecto a la Universidad Autónoma Metropolitana en específico al Laboratorio de Electrónica. También Agradecer al Ing. Romy Pérez Moreno por su entusiasmo a la hora de impartir sus clases, porque gracias a esto despertó en mi el interés de adentrarme más en los mecanismos, y por su apoyo y comprensión para terminar este proyecto.*

## **Resumen**

En la actualidad los robots se han empleado en varios rubros como: industria automotriz, industria química, procesos metalúrgicos, comunicaciones, etc. Los robots han adquirido gran importancia en el transcurso del tiempo debido al trabajo que realizan, ya que en tareas que son complicadas o aburridas para el hombre el robot viene a ser un buen sustituto.

Se inicia este proyecto con la historia de la robótica para tener una noción de cómo comenzó este campo y como se ha desarrollado con el paso del tiempo. La composición fundamental del brazo de robot que se realizará son mecanismos de cuatro barras, por ello hay una sección dedicado a la teoría de este, de donde se obtendrá un modelo matemático que después ayudará a el cálculo de posiciones de los eslabones que lo componen. Enseguida se hace el cálculo de posiciones, grados de libertad, ajustes (metrología) en los agujeros donde se ocuparán ejes, esto para que tenga estabilidad el brazo de robot. Se muestran los dibujos técnicos de las piezas del brazo de robot que sirvieron para la manufactura de estas, y los costos directos para construirlo.

<b>Contenido</b>	
<b>Índice de figuras</b> .....	IX
<b>Índice de tablas</b> .....	XI
<b>Índice de fotografías</b> .....	XII
<b>Capítulo 1 Definición del proyecto</b> .....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes .....	2
1.3 Justificación.....	2
1.4 Objetivo general .....	2
1.5 Objetivos particulares .....	2
<b>Capítulo 2 Marco teórico</b> .....	3
2.1 Historia de la robótica.....	3
2.2 Leyes de la Robótica .....	3
2.3 Definición de robot .....	5
2.4 Clasificación de Robots .....	5
2.5 Elementos de un brazo de robot .....	6
2.6 Estadísticas de robótica .....	8
2.7 Mecanismo de Cuatro barras .....	11
2.7.1 Teorema de Grashoff .....	12
2.7.2 Nomenclatura de eslabones mecanismo cuatro barras .....	12
2.7.3 Clasificación de los mecanismos.....	13
2.7.4 Modelo matemático mecanismo cuatro barras .....	13
2.8 Grados de libertad o Movilidad.....	19
2.8.1 Tipos de eslabones y juntas .....	19
2.8.2 Ecuación de Grubler.....	20
2.9 Ajustes.....	21
2.9.1 Conceptos Básicos de Medición .....	21
2.9.2 Intervalos de tolerancia de árboles y agujeros .....	22
<b>Capítulo 3 Desarrollo del Proyecto</b> .....	24
3.1 Introducción.....	24
3.2 Análisis de posiciones .....	24

3.2.1 Obtención de Magnitudes de los eslabones .....	24
3.2.2 Análisis de posiciones Primer mecanismo .....	34
3.2.3 Análisis de posición segundo mecanismo .....	42
3.3 Análisis de ajustes.....	47
3.3.1 Ajustes principales .....	48
3.4 Análisis grados de libertad .....	51
3.4.1 Cálculo de grados de libertad primer Mecanismo cuatro barras .....	51
3.4.2 Cálculo de grados de libertad segundo Mecanismo cuatro barras .....	52
3.4.3 Base brazo de robot .....	53
3.6 Pinzas del brazo de robot.....	55
3.7 Dibujos técnicos .....	56
3.8 Costos .....	77
3.8.1 Costos directos.....	77
3.9 Fotografías .....	78
<b>Capítulo 4 Resultados</b> .....	<b>90</b>
4.1 Análisis y discusión de resultados.....	90
<b>Capítulo 5 Conclusiones</b> .....	<b>91</b>
<b>Capítulo 6 Referencias bibliográficas</b> .....	<b>92</b>



## Índice de figuras

Figura 1. Brazo de Robot. ....	1
Figura 2. Isaac Asimov. ....	4
Figura 3. Clasificación de Robots. ....	6
Figura 4. Incremento anual en miles de unidades de robots [1]. ....	9
Figura 5. Robots aplicados en la industria durante el año 2008 [1]. ....	10
Figura 6. Suministro anual de robots industriales 2010-2011 y previsión para 2012-2015. ....	11
Figura 7. Mecanismo cuatro barras. ....	11
Figura 8. Nomenclatura de eslabones. ....	12
Figura 9. Representación esquemática de eslabones. ....	13
Figura 10. Mecanismo de cuatro barras [5]. ....	14
Figura 11. Vector de referencia para configuración abierta y cruzada [5]. ....	18
Figura 12. Nomenclatura de eslabones. ....	19
Figura 13. Mecanismo con exceso de eslabones intermedios. ....	20
Figura 14. Posición de eslabón de forma cualquiera. ....	21
Figura 15. Tolerancias principales para arboles y agujeros [7]. ....	23
Figura 16. Momento de torsión máximo. ....	25
Figura 17. Eslabon de esntrada con movimiento oscilatorio (a), (b) y (c). ....	25
Figura 18. Inclinación $\Omega$ de r1. ....	26
Figura 19. Mecanismo dos. ....	26
Figura 20. Motor Power Hd de torque 17 kg/cm. ....	27
Figura 21. Mecanismo uno, encargado de mover el brazo de robot. ....	28
Figura 22 a. Esquema primer mecanismo de cuatro barras propuesto. ....	28
Figura 22 b. Simulación en SolidWorks Mecanismo de cuatro barras. ....	29
Figura 23. Espacio de trabajo r2 hacia adelante. ....	29
Figura 24. Espacio de trabajo de r2 hacia atrás. ....	29
Figura 25. Extremo inferior de iteraciones para primer mecanismo. ....	30
Figura 26. Extremo superior de iteraciones para primer mecanismo. ....	30
Figura 27. Mecanismo uno r3, r4 y $\theta_1$ . ....	31
Figura 28. Eslabone comunes entre los dos mecanismos de cuatro barras. ....	32
Figura 29. Segundo Mecanismo de cuatro barras. ....	32
Figura 30. Configuración abierta primer mecanismo. ....	33
Figura 31. Configuración abierta segundo mecanismo. ....	33
Figura 32. Vista lateral izquierda del brazo de robot. ....	42
Figura 33. Ajustes principales [7]. ....	48
Figura 34. Localización de barrenos primer mecanismo. ....	49
Figura 35. Localización de barrenos de segundo mecanismo. ....	49
Figura 36. Primer Mecanismo de cuatro barras. ....	51
Figura 37. Entrada primer mecanismo. ....	52
Figura 38. Segundo mecanismo de cuatro barras. ....	52

Figura 39. Entrada segundo mecanismo.....	53
Figura 40. Base del Brazo de robot.....	54
Figura 41. Base que servirá como contrapeso y fijación del motor. ....	54
Figura 42. Pinzas del robot.....	55

## **Índice de tablas**

Tabla 1. Unidades de robots instalados en las industrias [1]. .....	8
Tabla 2. Identidades Trigonómicas [5]. .....	15
Tabla 3. Elección del signo del radical según el tipo de configuración [5]. .....	18
Tabla 4. Posiciones de los eslabones del mecanismo uno. ....	37
Tabla 5. Posiciones de los eslabones del mecanismo dos. ....	43
Tabla 6. Costos de Materiales que se usaron en prototipo de Brazo de Robot. ...	77

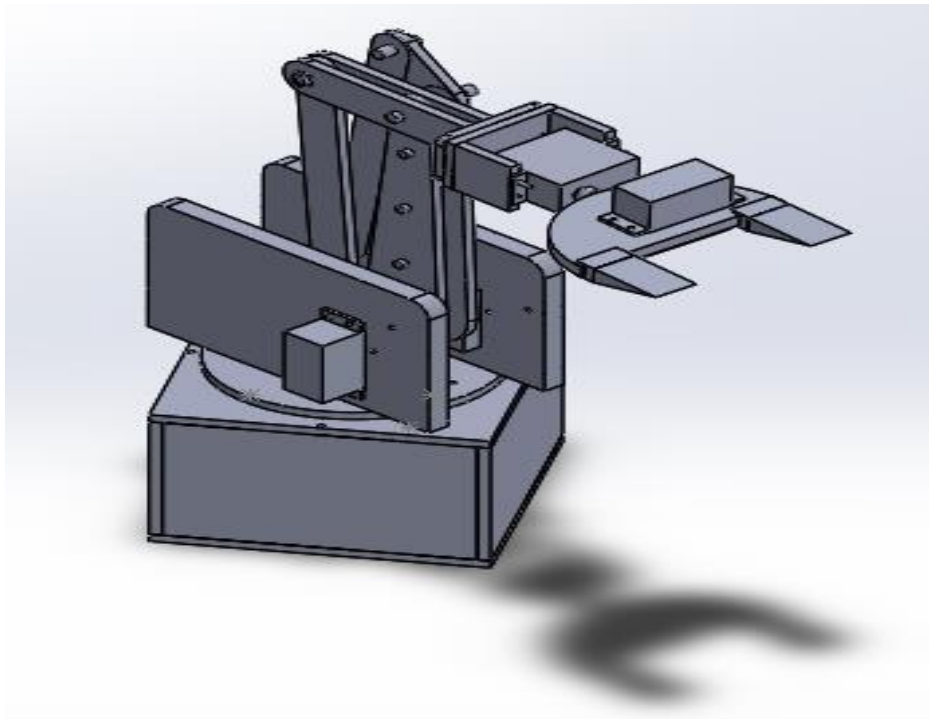
## Índice de fotografías

Fotografía 1. Motores de 17 kg/cm ensamblados en las paredes derecha e izquierda.....	78
Fotografía 2. Eslabón de entrada segundo mecanismo. ....	79
Fotografía 3. Eslabón de referencia segundo mecanismo. ....	79
Fotografía 4. Eslabón de salida segundo mecanismo. ....	80
Fotografía 5. Eslabonamiento del segundo mecanismo (referencia, salida, acoplador y salida, iniciando en el eslabón de referencia en el sentido de las manecillas del reloj).....	80
Fotografía 6. Eslabón de entrada primer mecanismo.....	81
Fotografía 7. Eslabón acoplador primer mecanismo. ....	81
Fotografía 8. Eslabonamiento primer mecanismo. ....	82
Fotografía 9. Unión de los dos mecanismos. ....	82
Fotografía 10. Base acopladora de actuadores.....	83
Fotografía 11. Base acopladora de pinzas de robot.....	83
Fotografía 12. Base del cubo. ....	84
Fotografía 13. Pared del cubo. ....	84
Fotografía 14. . Tapa del cubo. ....	85
Fotografía 15. Base cubo, que soportará a todo el brazo de robot .....	15
Fotografía 16. Conjunto de piezas que se hicieron en acrílico, excepto los motores. ....	86
Fotografía 17. Motor con torque de 32kg/cm.....	87
Fotografía 18. Pinzas de Robot.....	87
Fotografía 19. Brazo de robot vista izquierda.....	88
Fotografía 20. Brazo de robot vista derecha. ....	89

# Capítulo 1 Definición del proyecto

## 1.1 Introducción

El brazo de robot que se realiza en este proyecto tiene seis grados de libertad, de los cuales tres serán diseñados, esto por los requerimientos que se le establecieron, entre ellos se encuentra la adaptación de unas pinzas con los grados de libertad restantes, además de este se usarán otros sujetadores que existen en el mercado para distintas tareas logrando la versatilidad que todo brazo debe tener. El material con el que se hará a los elementos que componen al brazo será acrílico. Se fundamenta de dos mecanismos de cuatro barras, por ser los encargados de la precisión de movimiento de la mano del robot, que en este caso serán unas pinzas y la base de este donde se encuentra el motor que hará girar todo el sistema (Figura1).



**Figura 1. Brazo de Robot.**

En la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, se han realizado proyectos de diseño y construcción de Brazos de Robots, pero no se ha utilizado como forma de transmisión de movimiento mecanismos de cuatro barras que en este proyecto se usará, con esta transmisión se logrará disminuir la pérdida de energía en forma de calor, a diferencia de cuando se ocupa una transmisión de movimiento con engranes y bandas donde la pérdida de energía en forma de

calor es muy alta [1]. Con los mecanismos de cuatro barras se eliminará la necesidad de más potencia en los motores empleados, debido a que la mayoría de estos se encontrarán en la base y no en cada articulación como en un clásico brazo de robot.

## **1.2 Antecedentes**

Se realizó un proyecto terminal en la UAM Azcapotzalco titulado “Construcción de un brazo mecánico sencillo” [2], por un estudiante de electrónica, donde todo el análisis que se le hizo a este brazo (Cinemático, Dinámico), fue realizado en el software Solid Works, su finalidad es la simulación del trabajo de una grúa. En el proyecto que aquí se realiza también se usó este software, la diferencia es que sólo se ocupó para simulación y comprobación del modelo matemático cinemático. Otro proyecto también realizado dentro de la UAM “Brazo Articulado Digitalizador Tridimensional” [3], de igual manera realizado por otro alumno de electrónica, consiste en que el brazo se moviera por el contorno de algún objeto, y con algunos transductores mandaría información a la computadora donde se vería la imagen del objeto, algo parecido a un escáner con la diferencia que el objeto escaneado está en tres dimensiones, la forma de este brazo es parecida a un brazo de robot tipo puma donde los motores están en cada articulación. La diferencia del anterior proyecto con el realizado aquí es que la mayoría de los motores estarán en la base y no se llegará hasta la programación.

## **1.3 Justificación**

El Laboratorio de Control de Procesos del Departamento de Electrónica de la UAM AZC requiere la manufactura de un brazo de robot tipo Puma, con el cual se pretende complementar un proceso de control con fines didácticos. El responsable de este laboratorio es el Dr. Miguel Magos Rivera.

## **1.4 Objetivo general**

Diseñar y construir un brazo de robot didáctico tipo puma de seis grados de libertad para el Laboratorio de Control de Procesos.

## **1.5 Objetivos particulares**

Diseñar los componentes mecánicos del brazo de robot de seis grados de libertad.

Simular el sistema mecánico en un software de CAD.

Construir el robot tipo Puma.

## Capítulo 2 Marco teórico

### 2.1 Historia de la robótica

El desarrollo de los sistemas mecánicos tuvo una notable influencia de Leonardo da Vinci, quien fue conocido principalmente por sus actividades de pintura con la que subsistía. Además de esta actividad, Leonardo se desempeñó como científico, ingeniero, médico, escultor, músico, y filósofo. Su personalidad polifacética siempre lo llevo a estudiar y entender la naturaleza, fueron sus principales características diseñar, innovar y perfeccionar. En el aspecto de la ciencia e ingeniería diseño una multitud de prototipos mecánicos para diversas aplicaciones y de gran utilidad para la ciudad de Florencia, donde pasó varios años de su vida, por ejemplo diseño puertas semiautomáticas con contrapesos y poleas podían abrir y cerrar sin necesidad de ser operadas por una persona. Reproducciones fabricadas en madera de varios de los diseños de Leonardo pueden apreciarse en el Museo Leonardo da Vinci de la Ciudad de Florencia, Italia, donde se presenta permanentemente la muestra de los prototipos “*Le Grandi Macchine Funzionanti*” [3]. También hay que resaltar que en otros lugares existían de igual manera que Leonardo, pioneros que con sus aportes se iniciaría la robótica, como ejemplo está una leyenda Hindú, sobre unos elefantes mecánicos (Fuller, 1999), la palabra robot se piensa y así lo han confirmado algunos historiadores que fue usada por primera vez en 1921, en la obra de teatro Rossum’s Universal Robots (RUR), escrita por el checo Karel Capek (1890-1938). En esta obra (Dorf, 1988), un fabricante de criaturas mecánicas diseñaba robots para reemplazar a trabajadores humanos, eficientes pero sin sentimientos, se pensaba al principio de la historia que estos robots eran mejores que las personas, y como no si hacían todo lo que se les ordenaba sin preguntar [1]. Al final los robots se volvieron contra sus amos y destruyeron a la Humanidad con excepción de un hombre, para que pudiera seguir produciendo más robots, desgraciadamente el procedimiento para construir robots se destruyó junto con la humanidad. Con esta historia y otras donde se exhibe a los robots como una gran ayuda y después como los causantes de un apocalipsis donde siempre se acaba con la raza humana, se le ha insertado a la mente humana un gran miedo hacia los robots, esto ha causado un gran atraso en este rubro [1].

### 2.2 Leyes de la Robótica

Isaac Asimov (Figura 2), en sus historias de ciencia y ficción de los años cuarenta, se imaginaba a los robots como ayudantes de la humanidad y postulo tres leyes básicas para los robots, estas se conocen como las leyes de la robótica [4].



**Figura 2. Isaac Asimov.**

1. Un robot no debe dañar a un ser humano, ni por su inacción, dejar que un ser humano sufra daño.
2. Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto si éstas entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia, a menos que está entre en conflicto con las dos primeras leyes.

Más tarde, Fuller introdujo otra ley:

Un robot podrá tomar el trabajo ser un ser humano, pero no debe dejar a esta persona sin empleo.

Existen intentos de seguir estas leyes al pie de la letra, pero no se ha logrado implementarlas o programarlas. Por ejemplo un robot militar, por su naturaleza sería construido con fines bélicos y entonces se romperían en éstas reglas. La mayoría de los robots industriales de la actualidad están diseñados para trabajar en ambientes que son peligrosos y muy difíciles para trabajadores humanos. Un ejemplo sería la mano de un robot que puede diseñarse para la manipulación de objetos muy calientes o muy fríos, que la mano humana no podría manipular de manera segura. Inspirados por los libros de Asimov sobre los robots, Joseph H. Engelberger intentó diseñar un robot en la década de los cincuenta, junto con George C. Devol. Fundaron la Empresa UNIMATION Robotics Company en 1958,



sin embargo el primer robot de esta compañía fue instalado hasta 1961, en la compañía automotriz General Motors en Nueva Jersey en Estados Unidos. Se trataba de un molde automatizado de fundición para dados (matrices), que arrojaban manijas de puertas al rojo vivo y otras partes de autos dentro de tanques con refrigerante en una línea que las transportaba hacia los trabajadores para su recorte y pulido. Su característica más importante era una tenaza sobre una armadura de acero que eliminaba la necesidad de que un operario tocara piezas de acero fundido de autos recién fabricados. Este robot tenía 5 grados de libertad. Desde entonces la robótica ha tenido un sin número de aplicaciones, desde su uso en soldadura, pintura, ensamble, carga y descarga de herramientas de máquina, inspección, agricultura, enfermería, cirugía médica, usos militares hasta exploraciones subacuáticas y del espacio [4].

### **2.3 Definición de robot**

El robot se define de manera formal por la Organización Internacional para la estandarización (ISO), como un manipulador multifuncional reprogramable, capaz de mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, a través de movimientos variables programados, para el desempeño de tareas diversas. Hay otras definiciones dadas por otras organizaciones, como: Robotics Institute of America (RIA), Japan Industrial Robot Association (JIRA) y British Robot Association (BRA). Todas ellas coinciden en dos puntos: la capacidad de reprogramación y la multifuncionalidad de los robots. En términos generales los robots son clasificados como industriales, no industriales o para usos especiales [4].

### **2.4 Clasificación de Robots**

Actualmente existen una gran variedad de robots con diversas estructuras geométricas y mecánicas que definen su funcionalidad y aplicación. Sin embargo, de manera general se clasifican (Figura 3):

1ª Generación.

Manipuladores. Son sistemas mecánicos multifuncionales con un sencillo sistema de control de secuencia fija o de secuencia variable.

2ª Generación.

Robots de aprendizaje. Repiten una secuencia de movimientos que ha sido ejecutada previamente por un operador humano. El modo de hacerlo es a través

de un dispositivo mecánico. El operador realiza los movimientos requeridos mientras el robot le sigue y los memoriza.

3ª Generación.

Robots con control de sensores. El controlador es una computadora que ejecuta las órdenes de un programa y las envía al manipulador para que realice los movimientos necesarios.

4ª Generación.

Robots inteligentes. Son similares a los anteriores, pero además poseen sensores que envían información a la computadora de control sobre el estado del proceso. Esto permite una toma inteligente de decisiones y el control del proceso en tiempo real.



**Figura 3. Clasificación de Robots.**

## **2.5 Elementos de un brazo de robot**

En forma general, un brazo de robot está formado por los siguientes elementos descritos brevemente:

*Articulaciones:* Uniones formadas por servomotores que permiten la conexión y movimiento relativo entre dos eslabones consecutivos del robot. Dependiendo del tipo de movimiento que produzcan las articulaciones del robot pueden ser de tipo rotacional o lineal. Las articulaciones de tipo lineal también son conocidas como prismáticas. Las unidades de medición que se asocian a una articulación de tipo

rotacional están dadas en radianes o grados, mientras que para una articulación de tipo lineal generalmente se encuentran en metros [1].

*Actuadores:* Los actuadores tienen como misión generar el movimiento de los elementos del robot según las órdenes dadas por la unidad de control. Los actuadores utilizados en robótica pueden emplear energía neumática, hidráulica o eléctrica. Cada uno de estos sistemas presenta características diferentes, siendo preciso evaluarlas a la hora de seleccionar el tipo de actuador más conveniente.

Las características a considerar son:

- Potencia.
- Control.
- Peso y volumen.
- Precisión.
- Velocidad.
- Mantenimiento.
- Coste.

Se clasifican en grupos, según la energía que utilizan:

- Neumáticos.
- Hidráulicos.
- Eléctricos.

Los actuadores neumáticos utilizan el aire comprimido como fuente de energía y son muy indicados en el control de movimientos rápidos, pero de precisión limitada. Los motores hidráulicos son recomendables en los manipuladores que tienen una gran capacidad de carga, junto a una precisa regulación de velocidad. Los motores eléctricos son los más utilizados, por su fácil y preciso control, así como por otras propiedades ventajosas que establece su funcionamiento, como consecuencia del empleo de la energía eléctrica.

*Sistema mecánico:* Consiste en una secuencia de eslabones rígidos conectados en cadena abierta o cerrada por medio de articulaciones (servomotores), un robot manipulador está caracterizado por un brazo que asegura la movilidad, una muñeca que confiere la destreza y un extremo final que realiza la tarea programada al robot [1].

*Consola de control:* Se compone de un sistema electrónico con la etapa de potencia encargada de suministrar energía al robot para su movimiento. Incluye portátil llamado teach pendant el cual brinda la interfaz necesaria para que el usuario se comunice con el robot a través de instrucciones de programación. La consola de control también incluye los algoritmos de control programados en el sistema operativo del robot para guiar al robot. La capacidad del robot para llevar a cabo la tarea asignada con alto desempeño está dada por el algoritmo de control, el cual puede decidir la ejecución de la acción con respecto a las restricciones impuestas por el sistema mecánico y el medio ambiente [1].

## 2.6 Estadísticas de robótica

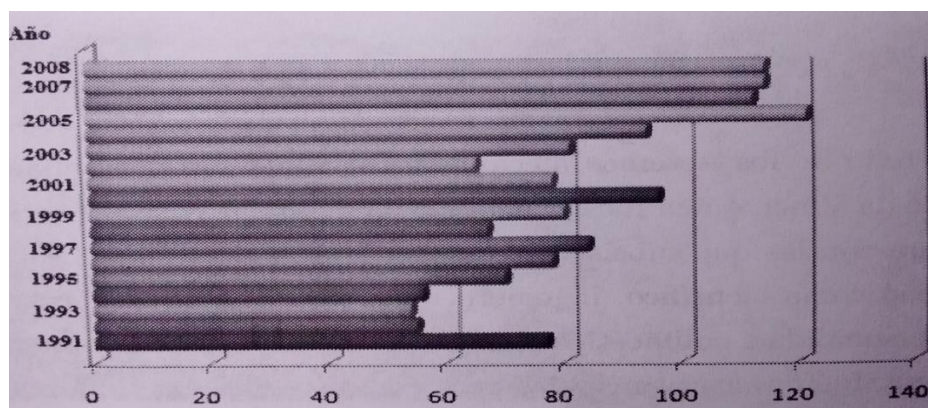
Cada vez es mayor el número de robots industriales que se usan en las empresas de todo el mundo, en particular las líneas de producción están automatizadas mediante robots manipuladores. En la siguiente tabla 1 (fuente: International Federation of Robotics Statistical Department), se muestran estadísticas sobre el uso de robots en el mundo. Desde el año 2000 se ha dado una tasa anual de crecimiento sistemático de 25000 robots, y los principales países usuarios de robots son Estados Unidos, Japón, Alemania, Italia, Francia y China. Para el año 2008 se encontraban operando en todo el mundo más de un millón de robots industriales.

**Tabla 1. Unidades de robots instalados en las industrias [1].**

Unidades de robots instalados en las industrias				
Continente	Instalaciones anuales		Robot en operación	
	2008	2009	2008	2009
América	17192	9600	173977	172800
Canadá, México, Usa	16242	9000	168489	166800
América Central y Sudamérica	950	600	5488	6000
Asia/Australia	60294	35900	514914	50900
China	7879	5000	31787	36800
India	883	500	3716	4200
Japón	33138	18000	355562	339800
República de Corea	11572	8100	76923	79300
Taiwán	3359		23644	
Tailandia	1585		6411	
Otros lugares de Asia	1041	4300	10157	48900
Australia/Nueva Zelandia	837		6714	
Europa	35066	22600	343700	346100
Benelux	1333		11124	
Francia	2605	1800	34370	34400
Alemania	15248	10000	144803	145800

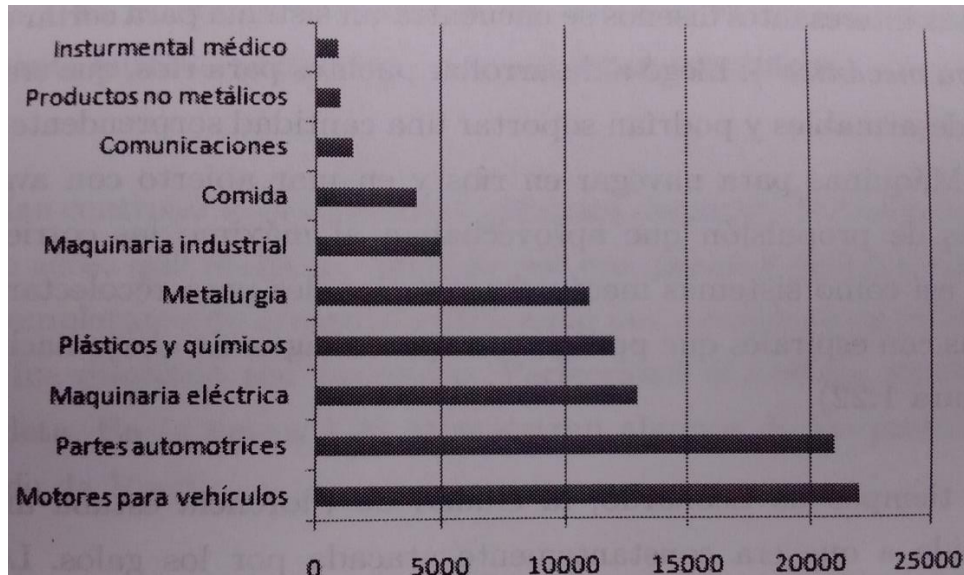
Italia	4793	3500	63051	62900
España	2296	1500	28636	27400
Suecia	1100		9426	
Reino Unido	909	600	28636	27400
Europa Central y del Este	2603		9207	
Otros lugares de Europa	4179	5200	27950	62300
África	461	300	1784	1800
Total	113345	68400	1035674	1031000

En la gráfica (Figura 4) se muestra el desarrollo histórico de uso de robots manipuladores de la industria desde los años 1991 al 2008. Obsérvese que en el periodo del 2001 al 2005 se incrementó en 20% año con año el uso de robots en las industrias, durante los años 2006 al 2007 el incremento fue menor al 3%, en 2008 prácticamente se detuvo la inversión en robótica, debido a la crisis financiera, la cual llevó a una crisis global económica. El parque de robots manipuladores instalados en diversas empresas en 2008 llegó aproximadamente a 113 300 unidades (fuente: International Federation of Robotics Statistical Department).



**Figura 4. Incremento anual en miles de unidades de robots [1].**

En esta otra gráfica (Figura 5) se muestra para el año 2008 el número de robots empleados para aplicaciones específicas de la industria. Más de 22000 unidades se han empleado en fabricación y ensamble de motores automotrices y aproximadamente 20000 unidades para fabricación de diversas partes de la industria automotriz. Maquinaria eléctrica, productos plásticos y químicos y procesos metalúrgicos son de las aplicaciones donde se demanda el empleo de robots manipuladores.



**Figura 5. Robots aplicados en la industria durante el año 2008 [1].**

En información más reciente según Los datos estadísticos de la Federación Internacional de Robótica (IFR, por sus siglas en inglés) confirman que China ya es, y seguirá siendo, el mayor mercado mundial en robótica industrial. Según la IFR, China registra desde hace años un crecimiento imparable en la automatización de su industria. Aunque esto ocurre fundamentalmente en las industrias clásicas, cómo en la del automóvil o el ensamblaje electrónico, los robots irrumpen con fuerza en otro tipo de sectores en los que su presencia es menos habitual, como la hostelería [1].

Por su parte, Tan Xueke, empresario de la industria robótica china, asegura que las compañías del país "empiezan a plantearse reemplazar a trabajadores por robots, ya que el salario medio de un trabajador supera los 50.000 yuanes [8.000 dólares] al año". De hecho, Foxconn, fabricante chino de componentes electrónicos y ensamblador para Apple, Dell y otros gigantes de la tecnología, está en pleno proceso de reemplazar a 500.000 trabajadores humanos por un millón de robots.

Asimismo, como se muestra en la gráfica (Figura 6) extraído de investigaciones de la IFR, los pedidos de robots en Asia son enormemente superiores a los del resto del mundo industrializado.

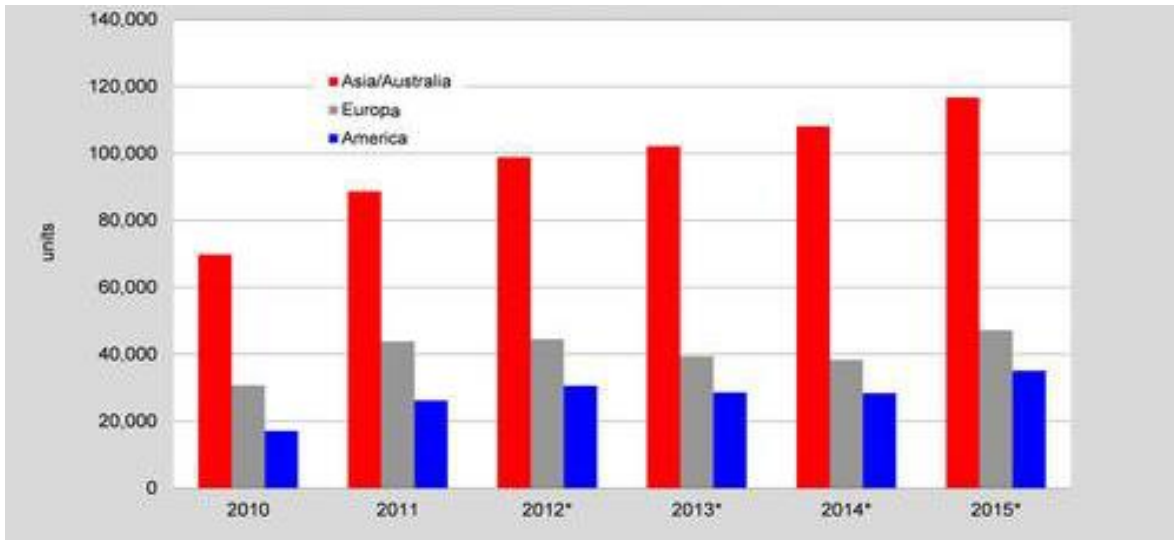


Figura 6. Suministro anual de robots industriales 2010-2011 y previsión para 2012-2015.

### 2.7 Mecanismo de Cuatro barras

Se compone de cuatro eslabones unidos por juntas de revoluta, y uno de sus eslabones se encuentra fijo al marco de referencia (Figura7).

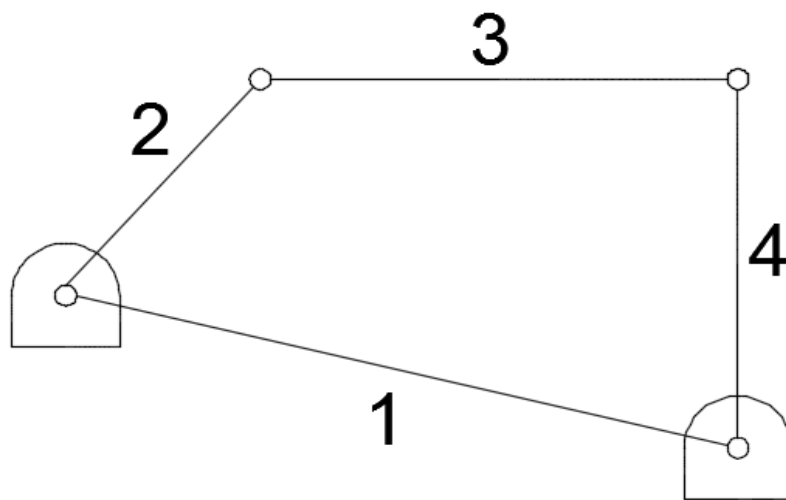


Figura 7. Mecanismo cuatro barras.

### 2.7.1 Teorema de Grashoff

El teorema o desigualdad de Grashoff enuncia la posibilidad de revolución completa en uno de los eslabones de un mecanismo de cuatro barras. Para aplicar el teorema de Grashoff se debe nombrar a los eslabones según su tamaño, al eslabón más corto se denotará con la letra *s* (de la palabra en inglés short), y al eslabón más grande se denotara con la letra *l* (de la palabra en inglés long), los restantes eslabones se denotan con la letra que uno prefiera [5]. La ecuación de Grashoff es la siguiente:

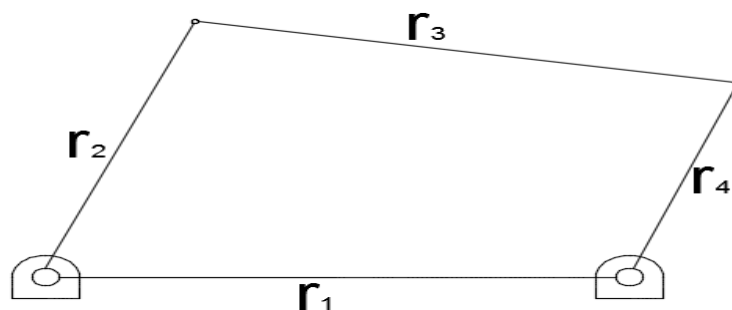
$$s + l \leq p + q \quad (1)$$

Al cumplirse dicha desigualdad, garantiza que al menos uno de los eslabones en movimiento realizará una revolución completa u oscile, esto según el eslabón de referencia que se elija, para esto se muestran cuatro casos:

- 1.-Si el eslabón fijo es el más grande entonces la manivela será el más corto.
- 2.-Si el eslabón fijo es el más pequeño entonces la manivela será cualquiera adyacente a este (doble manivela).
- 3.-Si el eslabón fijo es el opuesto al más pequeño, la manivela será el más pequeño los otros eslabones serán osciladores.
- 4.-Si el eslabón fijo es el opuesto al más largo, la manivela será el más corto.

### 2.7.2 Nomenclatura de eslabones mecanismo cuatro barras

En el siguiente mecanismo (Figura 8) se muestra la nomenclatura de los eslabones para un mecanismo cuatro barras.



**Figura 8. Nomenclatura de eslabones.**

$r_1$  – Marco de referencia.

$r_2$  – Manivela o eslabón de entrada.

$r_3$  – Acoplador.



$r_4$  – Seguidor o eslabón de salida.

En la Figura 9 se muestra algunas formas de representar esquemáticamente algunos eslabones y la junta más común en los mecanismos.

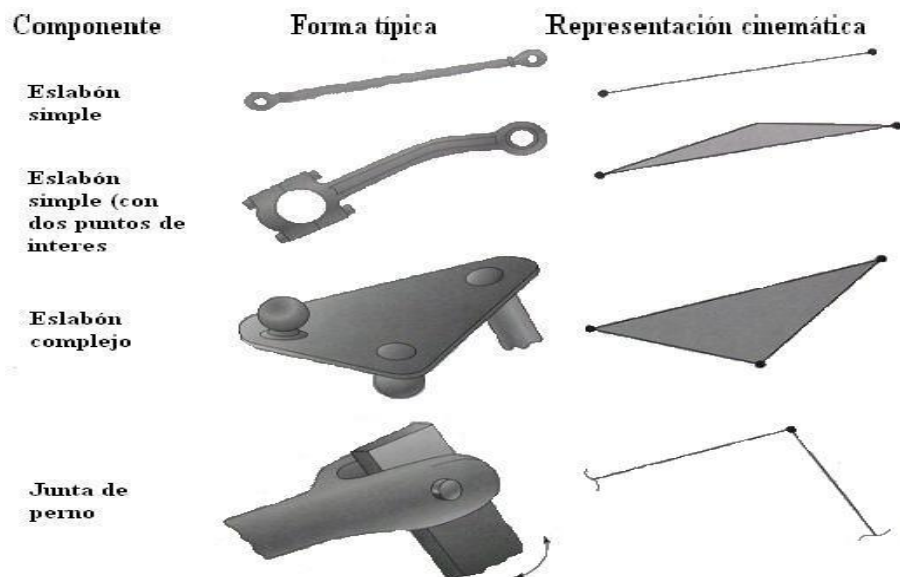


Figura 9. Representación esquemática de eslabones.

### 2.7.3 Clasificación de los mecanismos

*Manivela-Balancín:* Cuando un eslabón puede dar una vuelta completa ( $360^\circ$ ) generalmente el de entrada, mientras otro solo oscila generalmente el de salida.

*Doble Manivela:* Cuando dos eslabones pueden dar una vuelta completa ( $360^\circ$ ) generalmente los de entrada y salida.

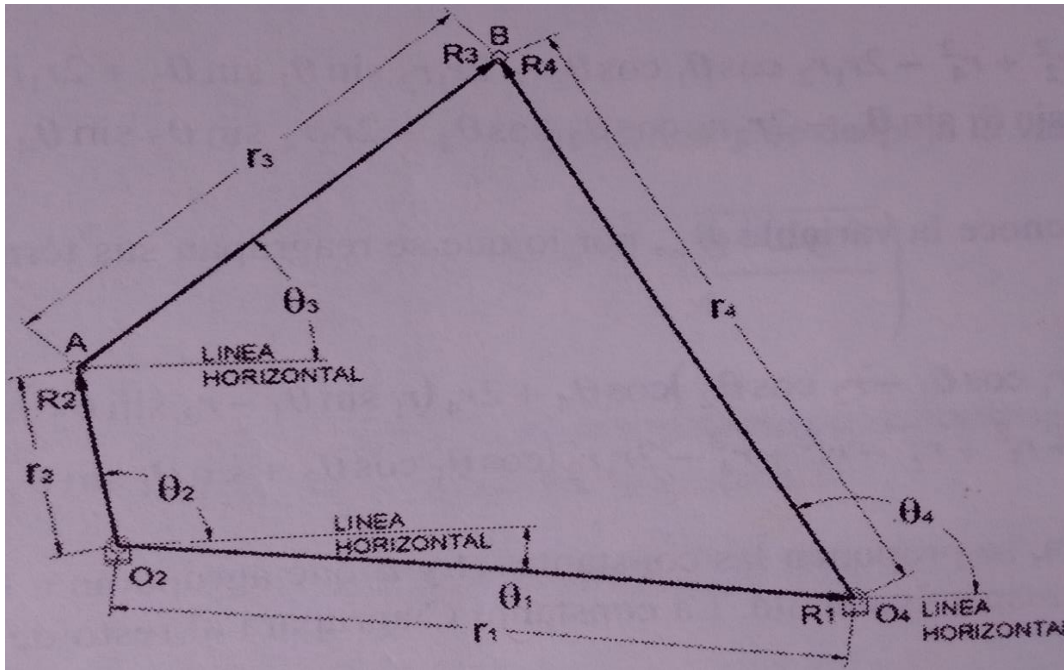
*Doble Balancín:* Cuando dos eslabones solo pueden oscilar generalmente los de entrada y salida.

### 2.7.4 Modelo matemático mecanismo cuatro barras

En el esquema (Figura 10) se denota los vectores determinados para cada eslabón, el orden de los vectores puede ser cualquiera.

Al comenzar la solución del mecanismo se deben conocer las magnitudes de todos los vectores que están presentes. Así como también las posiciones angulares del vector  $r_1$  (eslabón fijo) y la del eslabón de entrada  $r_2$ . Los valores que

se desconocen son las posiciones angulares de los eslabones tres y cuatro ( $\theta_3$  y  $\theta_4$ ).



**Figura 10. Mecanismo de cuatro barras [5].**

La ecuación que expresa el orden particular de los vectores expuestos en la Figura 10, es:

$$R_2 + R_3 = R_1 + R_4 \quad (2)$$

Los vectores de posición elegidos forman una malla cerrada, es decir, la suma de los cuatro vectores forman un polígono cerrado. Asimismo se observa que los vectores nacen y terminan entre juntas consecutivas del mecanismo, sin importar el perfil particular de los eslabones [5].

Al emplear la notación polar compleja  $R_p = r_p e^{j\theta_p}$  para cada vector de la Ec.2 se obtiene la siguiente ecuación [5]:

$$r_2 e^{j\theta_2} + r_3 e^{j\theta_3} = r_1 e^{j\theta_1} + r_4 e^{j\theta_4} \quad (3)$$

Sustituyendo el Teorema de Euler Ec.7 en la Ec.3 para cada una de las exponenciales presentes, se obtiene la Ec.12

$$r e^{j\theta} = r(\cos\theta + j\text{sen}\theta) \quad (4)$$

$$r_2(\cos\theta_2 + j\text{sen}\theta_2) + r_3(\cos\theta_3 + j\text{sen}\theta_3) = r_1(\cos\theta_1 + j\text{sen}\theta_1) + r_4(\cos\theta_4 + j\text{sen}\theta_4) \quad (5)$$

Al agrupar términos semejantes (reales e imaginarias) se obtiene un par de ecuaciones simultáneas con dos incógnitas:  $\theta_3$  y  $\theta_4$ .

$$\begin{aligned} r_2\cos\theta_2 + r_3\cos\theta_3 &= r_1\cos\theta_1 + r_4\cos\theta_4 \\ jr_2\text{sen}\theta_2 + jr_3\text{sen}\theta_3 &= jr_1\text{sen}\theta_1 + jr_4\text{sen}\theta_4 \end{aligned} \quad (6)$$

Este sistema de ecuaciones es no lineal, por lo tanto se utilizará las identidades trigonométricas de la tabla siguiente:

**Tabla 2. Identidades Trigonómicas [5].**

nombre	Identidad	Ec.
Teorema de Euler	$re^{j\theta} = r(\cos\theta + j\text{sen}\theta)$	(7)
Unitaria	$\text{sen}^2\theta + \cos^2\theta = 1$	(8)
Mitad del ángulo	$\cos\theta = \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}$	(9)
	$\text{sen}\theta = \frac{2\tan \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}$	(10)
Seno de una suma	$\text{sen}(A \pm B) = \text{sen}A\cos B \pm \cos A\text{sen}B$	(11)
Coseno de una suma	$\cos(A \pm B) = \cos A\cos B \mp \text{sen}A\text{sen}B$	(12)
Signo del argumento	$\text{sen}(-\theta) = -\text{sen}\theta$	(13)
	$\cos(-\theta) = \cos\theta$	(14)

Las Ec's.6 se resolverán para  $\theta_4$  eliminando la variable  $\theta_3$  a través de la identidad trigonométrica unitaria (Ec.8). Respecto al término  $j$  en la segunda Ec.6 se puede eliminar debido a que existen ambos lados de la igualdad.

Simplificado, se despejan hacia la izquierda los términos que contengan  $\theta_3$ .

$$\begin{aligned} r_3\cos\theta_3 &= r_1\cos\theta_1 + r_4\cos\theta_4 - r_2\cos\theta_2 \\ r_3\text{sen}\theta_3 &= r_1\text{sen}\theta_1 + r_4\text{sen}\theta_4 - r_2\text{sen}\theta_2 \end{aligned} \quad (15)$$

Las ecuaciones anteriores se elevan al cuadrado y se suman. En el resultado de la suma habrá términos donde se puede sustituir la Ec.8 para simplificar la expresión. El resultado es:

$$r_3^2 = r_1^2 + r_2^2 + r_4^2 - 2r_1r_2\cos\theta_1\cos\theta_2 - 2r_1r_2\sin\theta_1\sin\theta_2 + 2r_1r_4\cos\theta_1\cos\theta_4 + 2r_1r_4\sin\theta_1\sin\theta_4 - 2r_2r_4\cos\theta_2\cos\theta_4 - 2r_2r_4\sin\theta_2\sin\theta_4 \quad (16)$$

Analizando la Ec.16 se observa que solo se desconoce la variable  $\theta_4$ , por lo que se reagrupan sus términos en función de este valor y se iguala a cero la ecuación.

$$2r_4(r_1\cos\theta_1 - r_2\cos\theta_2)\cos\theta_4 + 2r_4(r_1\sin\theta_1 - r_2\sin\theta_2)\sin\theta_4 + r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 + r_4^2 - 2r_1r_2(\cos\theta_1\cos\theta_2 + \sin\theta_1\sin\theta_2) = 0 \quad (17)$$

De tal manera, que para simplificar el escrito, se proponen las constantes A y B que agruparán a los coeficientes que multiplican a los términos  $\cos\theta_4$  y  $\sin\theta_4$ , respectivamente. La constante C agrupará al resto de los sumandos de la Ec.17. De esta forma, las constantes son:

$$A = 2r_4 (r_1\cos\theta_1 - r_2\cos\theta_2) \quad (18)$$

$$B = 2r_4 (r_1\sin\theta_1 - r_2\sin\theta_2) \quad (19)$$

$$C = r_1^2 + r_2^2 - r_3^2 + r_4^2 - 2r_1r_2\cos(\theta_1 - \theta_2) \quad (20)$$

Se observa que el último sumando de la constante C es una simplificación que se obtuvo empleando la Ec.12.

Por consiguiente se sustituyen las constantes A, B y C, en la Ec.17:

$$A\cos\theta_4 + B\sin\theta_4 + C = 0 \quad (21)$$

La Ec.21 contiene sólo una incógnita, pero  $\theta_4$  es argumento de dos funciones trigonométricas diferentes. Para solucionarlas se deben recurrir las Ec's.9 y 10, de forma tal que en la ecuación solo exista una sola incógnita y sea el argumento de la misma función trigonométrica.

$$A \frac{1 - \tan^2 \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}} + B \frac{2 \tan \frac{\theta_4}{2}}{1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}} + C = 0 \quad (22)$$

Para reducir la expresión anterior solo multiplicamos por el denominador común  $1 + \tan^2 \frac{\theta_4}{2}$ . Reagrupando términos resultantes en función de la  $\tan^2 \frac{\theta_4}{2}$  se obtiene:

$$(C - A)\tan^2 \frac{\theta_4}{2} + 2B\tan^2 \frac{\theta_4}{2} + (C + A) = 0 \quad (23)$$

La ecuación anterior (23), es una función cuadrática en términos de la tangente de la mitad de  $\theta_4$ . La cual se puede resolver directamente considerando la Ec.23 como una función cuadrática al emplear el cambio de variable:

$$x = \tan^2 \frac{\theta_4}{2} \quad (24)$$

La solución a la Ec.23 es:

$$\tan^2 \frac{\theta_4}{2} = \frac{-(2B) \pm \sqrt{(2B)^2 - 4(C-A)(C+A)}}{2(C-A)} \quad (25)$$

En el que se pueden realizar algunas simplificaciones algebraicas y se despeja la variable que concierne:

$$\theta_4 = 2\text{atan} \left[ \frac{-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 - C^2}}{C-A} \right] \quad (26)$$

Para obtener  $\theta_3$  se deben despejar de las Ec's.15 los términos que contengan  $\theta_4$ . Después de realizar un procedimiento semejante al que ya se ha explicado, se obtiene la ecuación:

$$D\cos\theta_3 + E\sin\theta_3 + F = 0 \quad (27)$$

Donde las constantes D, E y F se definen como:

$$D = 2r_3(r_2\cos\theta_2 - r_1\cos\theta_1) \quad (28)$$

$$E = 2r_3(r_2\sin\theta_2 - r_1\sin\theta_1) \quad (29)$$

$$F = r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 - r_4^2 - 2r_1r_2\cos(\theta_2 - \theta_1) \quad (30)$$

La Ec.26 es idéntica a la Ec.20, salvo por la forma en que se calculan las constantes. Para poder sustituir la solución antes obtenida para la Ec.20 a la Ec.26, es preciso que las constantes D y E sean los coeficientes de los términos  $\cos\theta_4$  y  $\sin\theta_4$ , respectivamente. Igualmente, la constante F debe agrupar a los términos independientes.

Cumplidos los requisitos, la solución será semejante a la Ec.25, pero ahora empleando las constantes D, E y F.

$$\theta_3 = 2\text{atan} \left[ \frac{-E \pm \sqrt{D^2 + E^2 + F^2}}{F-D} \right] \quad (31)$$

Las Ec's.26 y 31 tienen una duplicidad de resultados debido al radical. Por lo tanto se elegirá el signo apropiado del radical según la tabla 3. La designación estará en función del tipo de configuración (abierta o cruzada) que presente el mecanismo a resolver.

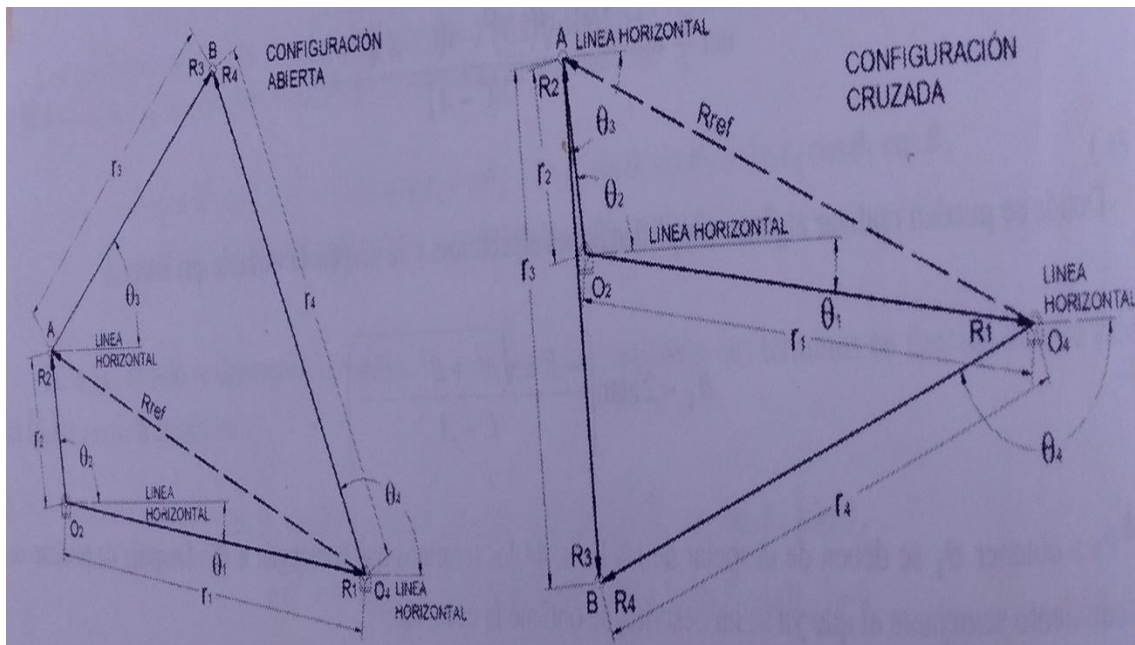
**Tabla 3. Elección del signo del radical según el tipo de configuración [5].**

CONFIGURACION	$\theta_3$	$\theta_4$
ABIERTA	$+\sqrt{\quad}$	$-\sqrt{\quad}$
CRUZADA	$-\sqrt{\quad}$	$+\sqrt{\quad}$

El tipo de configuración para un mecanismo de cuatro barras se decide con base en la forma en que tendrías que girar el vector  $R_{ref}$  para que se encime con el vector  $R_4$  (Figura 11), el vector  $R_{ref}$  debe iniciar en el punto  $O_4$  y debe terminar en el punto A.

Si el giro que tiene que realizar el vector  $R_{ref}$  es en sentido horario, la configuración es abierta.

En caso contrario, si el giro que tiene que realizar el vector  $R_{ref}$  es en sentido antihorario, la configuración es cruzada.



**Figura 11. Vector de referencia para configuración abierta y cruzada [5].**

*Un mecanismo de cuatro barras que cumpla con la desigualdad de Grashoff nunca podrá pasar espontáneamente de configuración abierta a cruzada, será*

necesario quitar el perno presente en el punto B (Figura 11) y permitir el giro de los eslabones 3 y 4 hasta que se encuentren en otra posición.[5]

## 2.8 Grados de libertad o Movilidad

Por grado de libertad se entiende como el número de entradas independientes requeridas para determinar la posición de todos los eslabones del mecanismo respecto a tierra [6].

### 2.8.1 Tipos de eslabones y juntas

Suele ser difícil visualizar el comportamiento de un eslabonamiento, por ejemplo en este caso donde son dos los mecanismos que se encuentran unidos. En este proyecto se preguntarán cuáles son los eslabones del primer mecanismo y del segundo mecanismo, por eso la importancia de esbozar un esquema o un esqueleto cinemático. El esquema de un mecanismo tiene un propósito similar al de un esquema de circuito eléctrico, se trata de mostrar los aspectos esenciales del mecanismo, como las dimensiones básicas que afectan el comportamiento del mecanismo, en la Figura 12 se puede observar un esbozo de un mecanismo de cuatro barras.

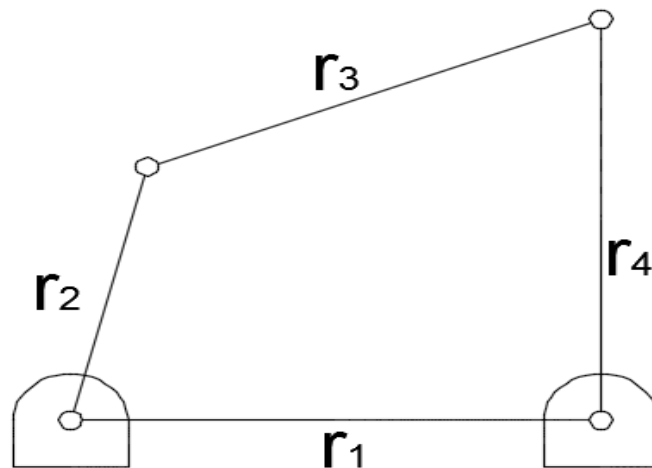


Figura 12. Nomenclatura de eslabones.

Después de esbozar el diagrama cinemático de los dos mecanismos, es necesario determinar el número de grados de libertad de los dos mecanismos.

### 2.8.2 Ecuación de Grubler

Grubler estableció una ecuación con la que se puede saber el número de grados de libertad que puede tener una estructura.

Se muestra en la Figura 13 un eslabonamiento, que si se le conectara un motor en el eslabón de entrada, con toda seguridad no podrá responder de la manera que se necesite debido a que hay muchos eslabones intermedios.

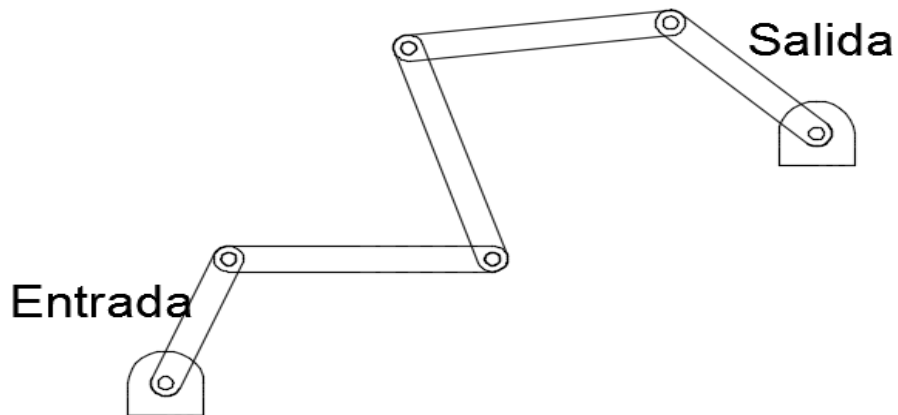


Figura 13 Mecanismo con exceso de eslabones intermedios.

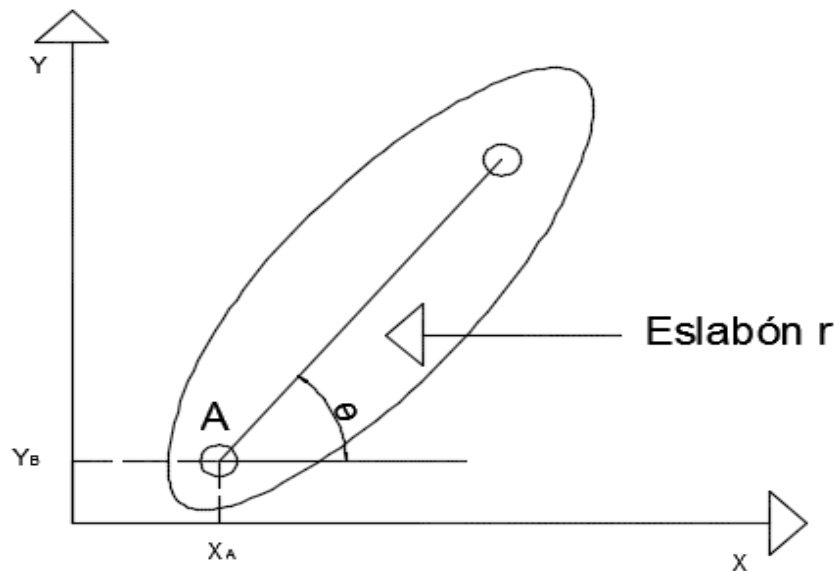
Es necesario que se requiera una restricción o una regla de movilidad para tener una salida que ofrezca algún movimiento en específico y por tanto el número de entradas necesarias para que un mecanismo trabaje de manera correcta, la regla se puede deducir fácilmente con la Figura 16. Suponiendo que se requiere la posición exacta del eslabón  $r$  en el sistema de coordenadas  $x,y$ . La pregunta es ¿Cuántas variables independientes se requieren para determinar la posición exacta de este eslabón? La posición del punto  $A$  puede encontrarse desde el origen, moviéndose primero a lo largo del eje  $x$  una distancia  $x_A$ , y después a lo largo del eje  $y$  una distancia  $y_A$ , con las dos traslaciones se puede especificar el punto  $A$ , pero aún no está completamente definida la posición del eslabón  $r$  tal como se observó este *tiene un* ángulo de inclinación  $\theta$ , por tanto son necesarias tres variables independientes (2 traslaciones y 1 rotación). Para definir la posición de un eslabón no restringido en el plano se necesitan tres grados de libertad. En general si se tiene un ensamble de  $n$  eslabones, tendrá un total de  $3n$  grados de libertad, pero cuando se restringe estos eslabones por medio de conexiones entre eslabones, esta restricción tiene consigo la pérdida de grados de libertad. Una junta de revoluta (pasador) o articulación es una junta de par inferior, y como es



una conexión restringe grados de libertad, siguiendo con la Figura 14, si se usa un pasador en la posición A, se restringe la traslación en x y y perdiendo dos grados de libertad, quedando sólo uno  $\theta$ . Cada pasador elimina dos grados de libertad de movimiento relativo entre eslabones adyacentes, además el número de eslabones que tienen movimiento es  $(n-1)$ , con lo anterior se llega a una ecuación para determinar los grados de libertad o la movilidad de un mecanismo de  $n$  eslabones conectados por juntas que solo permitan un grado de libertad  $j_1$ , está es conocida como *ecuación de Grubler*:

$$\text{grados de libertad} = 3(n - 1) - 2j_1 \quad (32)$$

Aunque existen más versiones de la ecuación (32), sólo se utilizará la ecuación anterior, debido a que los mecanismos que se analizan en este proyecto sólo tienen juntas de revolutas o pasadores.



**Figura 14. Posición de eslabón de forma cualquiera.**

## 2.9 Ajustes

Se denomina ajuste al ensamble o acoplamiento que existe entre dos piezas hembra y macho, siempre que ambas posean la misma cota nominal.

### 2.9.1 Conceptos Básicos de Medición

Es difícil o casi imposible que una pieza que se construya tenga exactamente la medida del diseño. Se asume entonces un error de fabricación en la pieza. La

magnitud de este error depende de varios factores como humanos o de las herramientas que se empleen para la realización de la pieza. La magnitud del error que se está dispuesto a admitir, depende de la función de la pieza. A continuación se muestran algunos conceptos fundamentales para la medición y realización de piezas.

*Dimensión nominal:* Dimensión de referencia.

*Dimensión máxima:* El mayor límite de la dimensión nominal.

*Dimensión Mínima:* El menor límite de la dimensión nominal.

*Tolerancia:* Es la diferencia entre el límite máximo y el límite mínimo

*Desviación superior:* Es la diferencia entre la dimensión máxima y la nominal.

*Desviación inferior:* Es la diferencia entre la dimensión mínima y la nominal.

*Juego:* Es la diferencia entre las dimensiones de la pieza hembra y la pieza macho antes del montaje cuando esta diferencia es positiva.

*Ajuste con Juego:* Existe cuando la zona de tolerancia del agujero está por encima de la zona de tolerancia del árbol.

*Juego máximo:* Es la diferencia entre la dimensión máxima de la pieza hembra y mínima de la pieza macho.

$$\text{juego máximo} = \text{dimensión máxima del agujero} - \text{dimensión mínima del árbol} \quad (33)$$

*Juego mínimo:* Es la diferencia entre la dimensión mínima de la pieza hembra y máxima de la pieza macho.

$$\text{juego mínimo} = \text{dimensión mínima del agujero} - \text{dimension máxima del árbol} \quad (34)$$

### **2.9.2 Intervalos de tolerancia de árboles y agujeros**

Para saber que intervalo de tolerancia se utiliza en agujeros y árboles es necesario la dimensión nominal y la calidad. A continuación se muestra en la Figura 15 las tolerancias principales de agujeros y árboles.

Diámetros en mm		≤ 3	> 3 a 6	> 6 a 10	> 10 a 18	> 18 a 30	> 30 a 50	> 50 a 80	> 80 a 120	> 120 a 180	> 180 a 250	> 250 a 315	> 315 a 400
AGUJEROS	H 6	+ 6 0	+ 8 0	+ 9 0	+ 11 0	+ 13 0	+ 16 0	+ 19 0	+ 22 0	+ 25 0	+ 29 0	+ 32 0	+ 36 0
	H 7	+10 0	+ 12 0	+ 15 0	+ 18 0	+ 21 0	+ 25 0	+ 30 0	+ 35 0	+ 40 0	+ 46 0	+ 52 0	+ 57 0
	H 8	+14 0	+ 18 0	+ 22 0	+ 27 0	+ 33 0	+ 39 0	+ 46 0	+ 54 0	+ 63 0	+ 72 0	+ 81 0	+ 89 0
	H 9	+25 0	+ 30 0	+ 36 0	+ 43 0	+ 52 0	+ 62 0	+ 74 0	+ 87 0	+ 100 0	+ 115 0	+ 130 0	+ 140 0
	H 11	+60 0	+ 75 0	+ 90 0	+ 110 0	+ 130 0	+ 160 0	+ 190 0	+ 220 0	+ 250 0	+ 290 0	+ 320 0	+ 360 0
ARBOLÉS	g 5	- 2 - 6	- 4 - 9	- 5 - 11	- 6 - 14	- 7 - 16	- 9 - 20	- 10 - 23	- 12 - 27	- 14 - 32	- 15 - 35	- 17 - 40	- 18 - 43
	h 5	0 - 4	0 - 5	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 15	0 - 18	0 - 20	0 - 23	0 - 25
	j <sub>s</sub> 5	+ 2 - 2	+2.5 -2.5	+ 3 - 3	+ 4 - 4	+ 4.5 - 4.5	+ 5.5 - 5.5	+ 6.5 - 6.5	+ 7.5 - 7.5	+ 9 - 9	+ 10 - 10	+ 11.5 - 11.5	+ 12.5 - 12.5
	k 5	+ 4 0	+ 6 + 1	+ 7 + 1	+ 9 + 1	+ 11 + 2	+ 13 + 2	+ 15 + 2	+ 18 + 3	+ 21 + 3	+ 24 + 4	+ 27 + 4	+ 29 + 4
	f 6	- 6 -12	- 10 - 18	- 13 - 22	- 16 - 27	- 20 - 33	- 25 - 41	- 30 - 49	- 36 - 58	- 43 - 68	- 50 - 79	- 56 - 88	- 62 - 98
	g 6	- 2 - 8	- 4 - 12	- 5 - 14	- 6 - 17	- 7 - 20	- 9 - 25	- 10 - 29	- 12 - 34	- 14 - 39	- 15 - 44	- 17 - 49	- 18 - 54
	h 6	0 - 6	0 - 8	0 - 9	0 - 11	0 - 13	0 - 16	0 - 19	0 - 22	0 - 25	0 - 29	0 - 32	0 - 36
	j <sub>s</sub> 6	+ 3 - 3	+ 4 - 4	+ 4.5 - 4.5	+ 5.5 - 5.5	+ 6.5 - 6.5	+ 8 - 8	+ 9.5 - 9.5	+ 11 - 11	+ 12.5 - 12.5	+ 14.5 - 14.5	+ 16 - 16	+ 18 - 18
	m 6	+ 8 + 2	+ 12 + 4	+ 15 + 6	+ 18 + 7	+ 21 + 8	+ 25 + 9	+ 30 + 11	+ 35 + 13	+ 40 + 15	+ 46 + 17	+ 52 + 20	+ 57 + 21
	p 6	+12 + 6	+ 20 + 12	+ 24 + 15	+ 29 + 18	+ 35 + 22	+ 42 + 26	+ 51 + 32	+ 59 + 37	+ 68 + 43	+ 79 + 50	+ 88 + 56	+ 98 + 62
	e 7	-14 -24	- 20 - 32	- 25 - 40	- 32 - 50	- 40 - 61	- 50 - 75	- 60 - 90	- 72 - 107	- 85 - 125	- 100 - 146	- 110 - 162	- 125 - 182
	f 7	- 6 -16	- 10 - 22	- 13 - 28	- 16 - 34	- 20 - 41	- 25 - 50	- 30 - 60	- 36 - 71	- 43 - 83	- 50 - 96	- 56 - 108	- 62 - 119
	h 7	0 -10	0 - 12	0 - 15	0 - 18	0 - 21	0 - 25	0 - 30	0 - 35	0 - 40	0 - 46	0 - 52	0 - 57
	e 8	-14 -28	- 20 - 38	- 25 - 47	- 32 - 59	- 40 - 73	- 50 - 89	- 60 - 106	- 72 - 126	- 85 - 148	- 100 - 172	- 110 - 191	- 125 - 214
	f 8	- 6 -20	- 10 - 28	- 13 - 35	- 16 - 43	- 20 - 53	- 25 - 64	- 30 - 76	- 36 - 90	- 43 - 106	- 50 - 122	- 56 - 137	- 62 - 151
	h 8	0 -14	0 - 18	0 - 22	0 - 27	0 - 33	0 - 39	0 - 46	0 - 54	0 - 63	0 - 72	0 - 81	0 - 89
	d 9	-20 -45	- 30 - 60	- 40 - 76	- 50 - 93	- 65 - 117	- 80 - 142	- 100 - 174	- 120 - 207	- 145 - 245	- 170 - 285	- 190 - 320	- 210 - 350
	e 9	-14 -39	- 20 - 50	- 25 - 61	- 32 - 75	- 40 - 92	- 50 - 112	- 60 - 134	- 72 - 159	- 85 - 185	- 100 - 215	- 110 - 240	- 125 - 265
	d 11	-20 -80	- 30 -105	- 40 - 130	- 50 - 160	- 65 - 195	- 80 - 240	- 100 - 290	- 120 - 340	- 145 - 395	- 170 - 460	- 190 - 510	- 210 - 570
	h 11	0 -60	0 - 75	0 - 90	0 - 110	0 - 130	0 - 160	0 - 190	0 - 220	0 - 250	0 - 290	0 - 320	0 - 360
j <sub>s</sub> 11	+30 -30	+ 37 - 37	+ 45 - 45	+ 55 - 55	+ 65 - 65	+ 80 - 80	+ 95 - 95	+ 110 - 110	+ 125 - 125	+ 145 - 145	+ 160 - 160	+ 180 - 180	

Figura 15. Tolerancias principales para árboles y agujeros [7].

## Capítulo 3 Desarrollo del Proyecto

### 3.1 Introducción

En esta sección se establecen los requerimientos para diseñar los dos mecanismos de cuatro barras. Los cálculos de las posiciones, ajustes y grados de libertad de estos. También se muestra los dibujos técnicos de cada pieza que componen al brazo de robot y los costos directos.

### 3.2 Análisis de posiciones

Es importante calcular la posición de cada eslabón en movimiento, que compone a un mecanismo de cuatro barras, ya que con esto se sabrá el comportamiento de este.

#### 3.2.1 Obtención de Magnitudes de los eslabones

Cuando se usa el término brazo de robot se refiere al hombro, antebrazo, brazo y mano, y no únicamente al brazo como su nombre lo dice, es una paradoja de tantas que existen, una vez aclarado lo anterior, la idea de usar dos mecanismos de cuatro barras es para que uno de ellos mueva el brazo, mientras el otro mueve el antebrazo. Para el diseño del primer mecanismo de cuatro barras encargado de mover el brazo, se busca que el eslabón  $r_2$  tenga mayor inclinación hacia adelante, pero que no llegue a una posición  $\theta = 0^\circ$ , donde se produce un mayor momento de torsión (Figura 16), y a la vez que este mismo eslabón tenga poca inclinación hacia atrás, estos requerimientos harán al brazo de robot semejante a un brazo humano (eslabón oscilador). Cuando se cumple la desigualdad de Grasshoff (Ec.1), se puede aplicar lo establecido en el capítulo 2 donde se hablan de cuatro casos según el eslabón fijo que se elija, en específico el tercer caso cuando el eslabón fijo es el opuesto al más pequeño, haciendo que el eslabón de entrada ( $r_2$ ) y salida ( $r_4$ ) sean solo osciladores. Que es lo que se busca del eslabón de entrada (Figura 17 a, b y c).

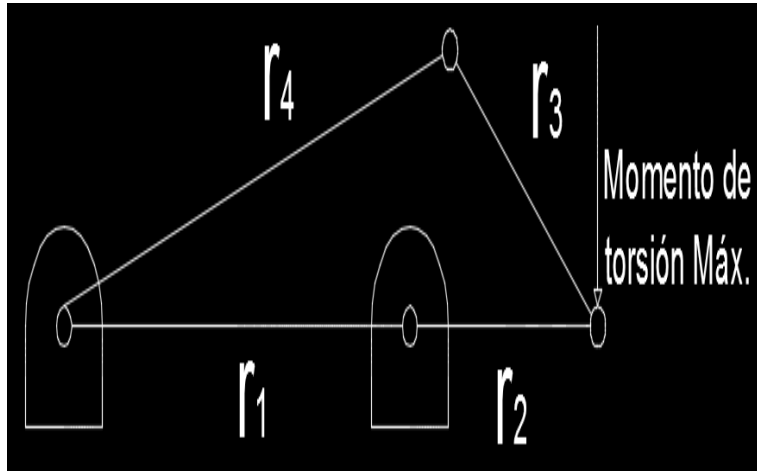


Figura 16. Momento de torsión máximo.

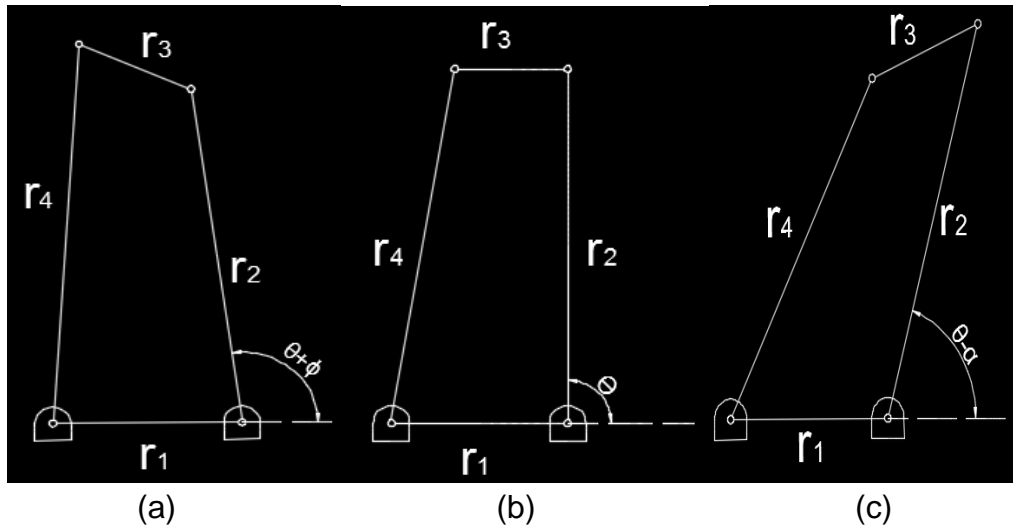


Figura 17. Eslabón de entrada con movimiento oscilatorio (a), (b) y (c).

Si se inclina  $r_1$  un cierto ángulo  $\Omega$  (Figura 18), dejando fijos a los demás eslabones, se observa que  $r_2$  obtiene más espacio de trabajo hacia adelante y menos hacia atrás que es lo que se buscaba de este mecanismo.

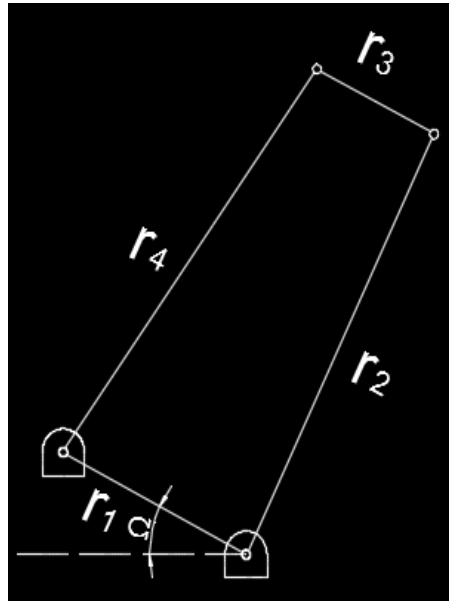


Figura 18. Inclinación  $\Omega$  de  $r_1$ .

Para el segundo mecanismo encargado de mover el antebrazo se tiene cuidado con la siguiente restricción *mecanismo uno*  $r_2 = r_1$  *mecanismo dos*. Después se busca obtener el primer caso que se vio en el capítulo 2, este es si la referencia tiene la longitud más larga, el eslabón de entrada será el de longitud más corta, con esto se logra un menor torque para mover el antebrazo del robot (Figura 19), la prolongación de la línea  $r_4$  servirá para fijar las pinzas.

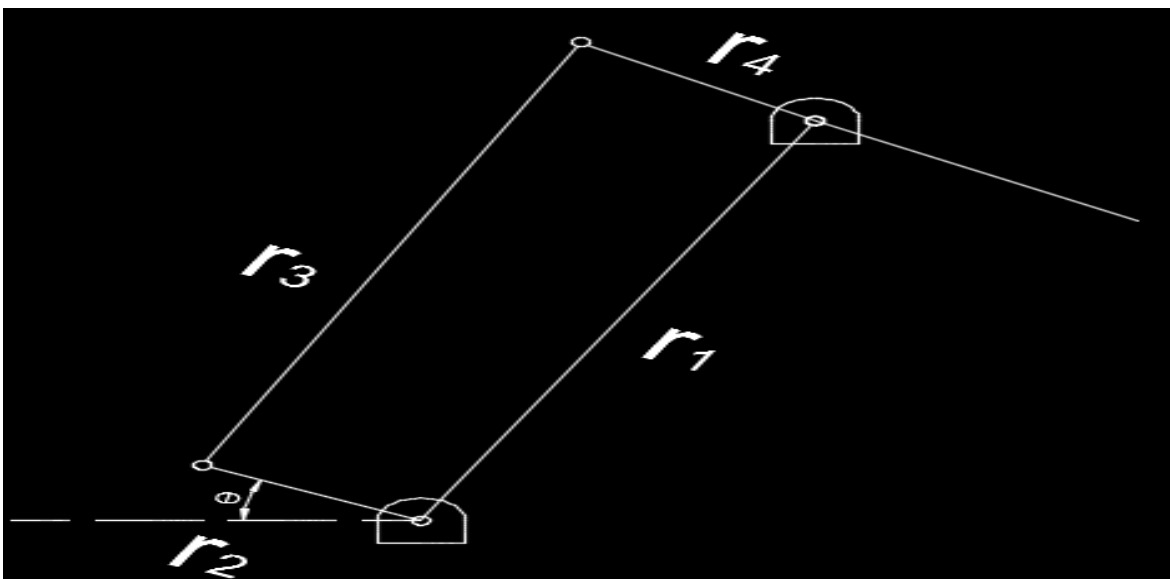


Figura19. Mecanismo dos.

El torque se define como la masa por la longitud del brazo de palanca.

$$\tau = m * d \quad (35)$$

Dónde:

$$\begin{aligned} \tau &= \text{torque, kg/cm} \\ d &= \text{Longitud del brazo de palanca, cm} \\ m &= \text{masa, kg} \end{aligned}$$

Las especificaciones de torque de cada motor de la marca power HD, son de 17 kg/cm (Figura 20), por ello es necesario un brazo de palanca generado en cada motor menor a este valor, el peso máximo que podrán levantar los eslabones de entrada será de 1kg. Esto significa según la Ec.35 que la longitud de los eslabones de entrada deberán ser menores de 17 cm. El primer mecanismo de cuatro barras será el encargado de mover el antebrazo del robot (Figura 21), por tanto se busca un eslabón lo suficientemente largo para tener un buen espacio de trabajo, pero a la vez que no sobrepase el torque del motor. Se propusieron longitudes de 11 a 15 cm por el espacio de trabajo que generan y para no sobrecalentar al motor, se eligió la longitud de 15 cm por ser el que mayor espacio de trabajo produce, en la Figura 22a y 22b se observa al primer mecanismo propuesto y la simulación de este en SolidWorks, respectivamente.



Figura 20. Motor Power Hd de torque 17 kg/cm.

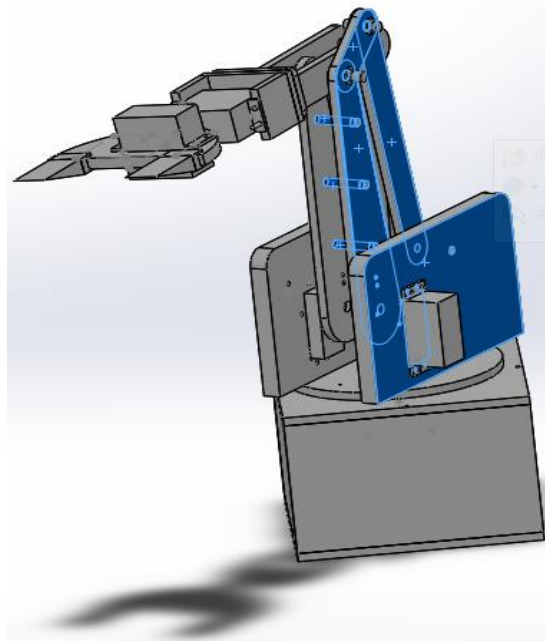


Figura 21. Mecanismo uno, encargado de mover el antebrazo de robot.

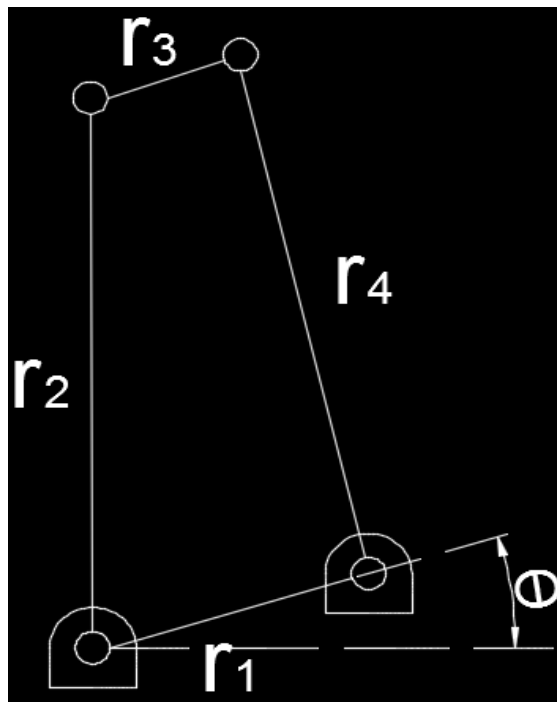
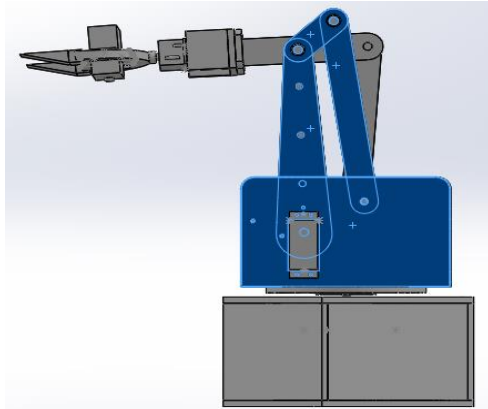


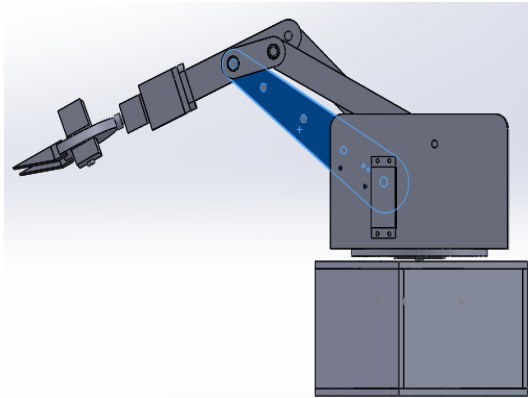
Figura 22 a. Esquema primer mecanismo de cuatro barras propuesto.



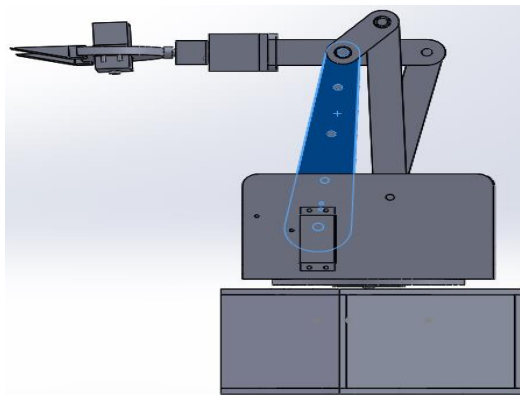


**Figura 22 b. Simulación en SolidWorks Mecanismo de cuatro barras.**

Como ya se mencionó la inclinación de  $r_1$  hace que crezca el espacio de trabajo del eslabón  $r_2$  hacia adelante y a la vez que se reduzca hacia atrás tal como se observa respectivamente en las Figuras 23 y 24.



**Figura 23. Espacio de trabajo r2 hacia adelante.**



**Figura 24. Espacio de trabajo de r2 hacia atrás.**

Se prosigue a encontrar la inclinación del eslabón  $r_1$  y la longitud de éste, además de las longitudes de los eslabones  $r_3$  y  $r_4$ . Para esto se utilizó el software AutoCAD proponiendo diferentes longitudes ( $r_1, r_3$  y  $r_4$ ) y la posición  $\theta_1$ . Después de varias iteraciones se encontraron los extremos donde estaría el mecanismo uno que cumpliera con los requerimientos de este (Figura 25 y 26).

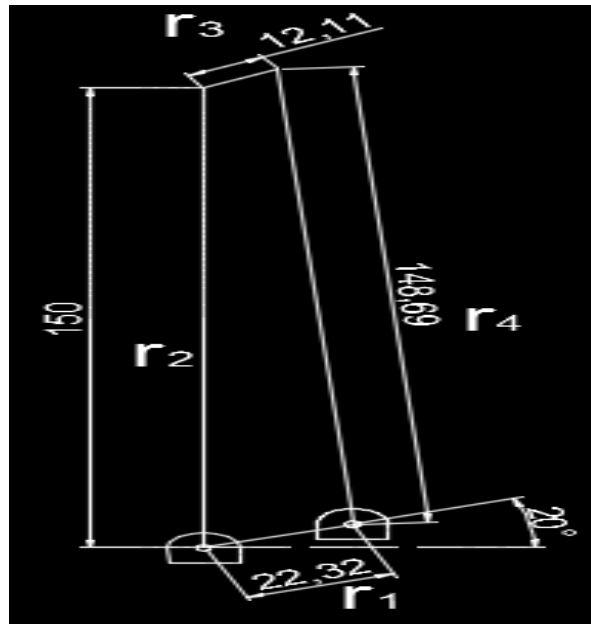


Figura 25. Extremo inferior de iteraciones para primer mecanismo.

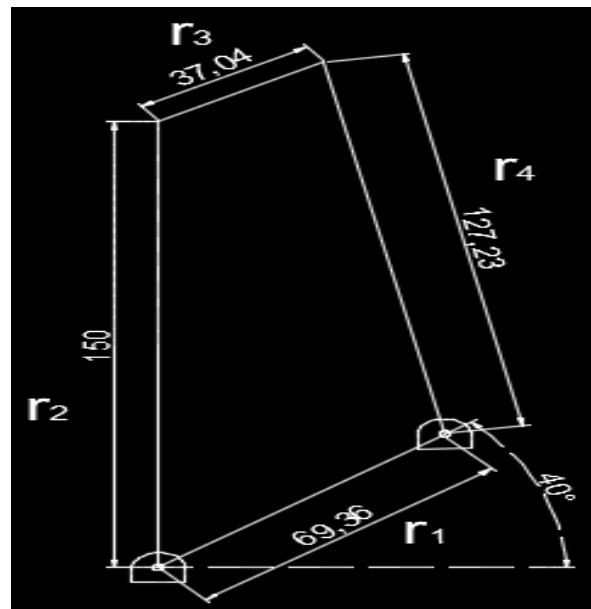
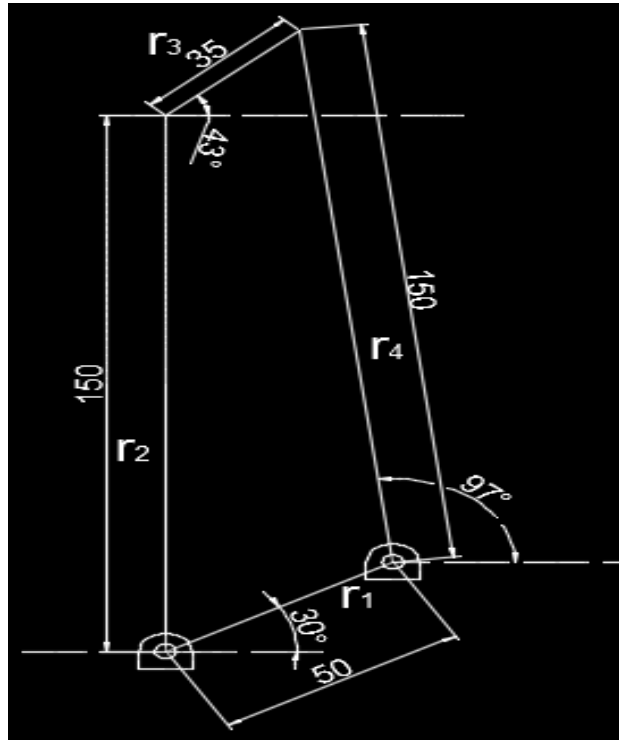


Figura 26. Extremo superior de iteraciones para primer mecanismo.

Se llegó a que  $\theta_1 = 30$  y  $r_1 = 50 \text{ mm}$ , obteniendo que  $r_3 = 35 \text{ mm}$  y  $r_4 = 150 \text{ mm}$  (Figura 27), estas magnitudes servirán para optimizar la manufactura de los eslabones, ya que magnitudes más pequeñas elevarían el costo, esto porque según el Taller donde se realizó las piezas, dimensiones menores a 15 mm implica un costo adicional en la manufactura.



**Figura 27. Mecanismo uno  $r_3$ ,  $r_4$  y  $\theta_1$ .**

Las magnitudes de los eslabones del primer mecanismo de cuatro barras y la posición de la referencia son:  $r_1 = 50 \text{ mm}$ ,  $r_2 = 150 \text{ mm}$ ,  $r_3 = 35 \text{ mm}$ ,  $r_4 = 150 \text{ mm}$  y  $\theta_1 = 30$ .

Como los dos mecanismos de cuatro barras que componen al brazo de robot tienen un eslabón en común Figura 28 (primer mecanismo  $r_2$  y  $r_1$  segundo mecanismo), entonces  $r_1 = 150 \text{ mm}$  del segundo mecanismo de cuatro barras. Igual que para el primer mecanismo, en el segundo también se hicieron iteraciones de las magnitudes  $r_4$ ,  $r_2$  y  $r_3$ , cuidando que  $r_2$  sea el más pequeño y se respete la magnitud de  $r_1$  para que sea el eslabón de referencia, hasta obtener las magnitudes del segundo mecanismo (Figura 29).

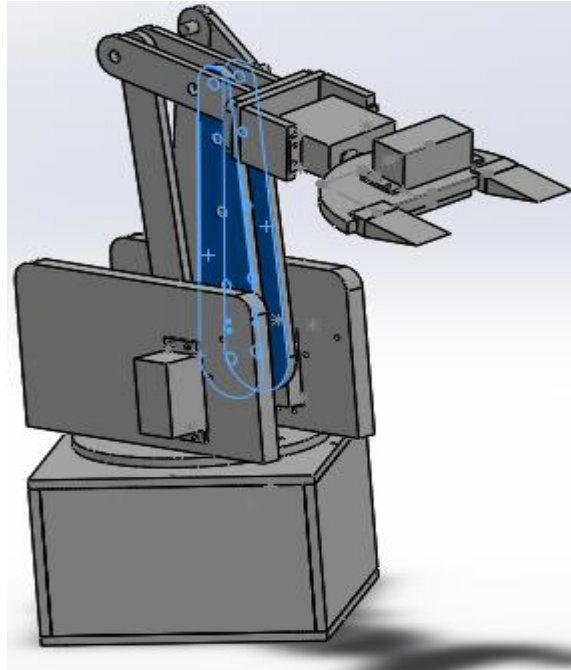


Figura 28. Eslabone comunes entre los dos mecanismos de cuatro barras.

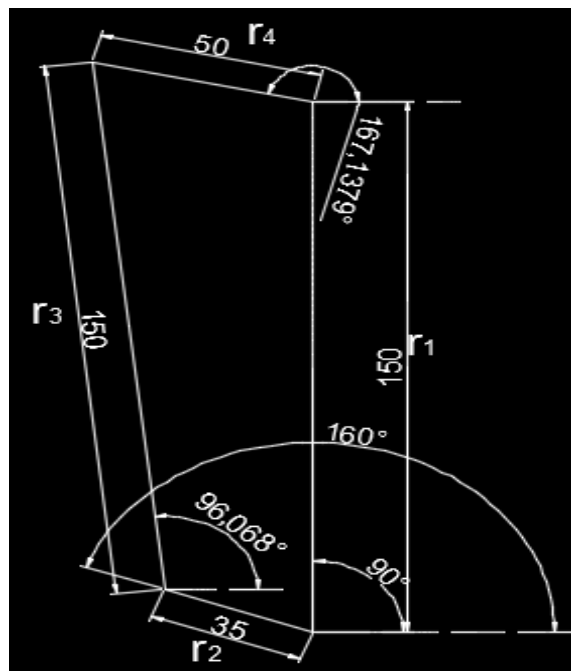


Figura 29. Segundo Mecanismo de cuatro barras.

Las magnitudes de los eslabones del segundo mecanismo de cuatro barras son:  $r_1 = 35mm$ ,  $r_2 = 150mm$ ,  $r_3 = 50mm$ ,  $r_4 = 150mm$ .

En el Capítulo 2 Modelado Matemático se muestra cómo saber la configuración a la que pertenece un mecanismo, en base a esto la Figura 30 muestra el vector de referencia para el mecanismo uno, girando este en el sentido de las manecillas del reloj, lo que establece que su configuración es abierta, de igual manera para el segundo mecanismo, se observa (Figura 31) que el vector de referencia gira en el sentido de las manecillas del reloj por lo tanto también su configuración es abierta.

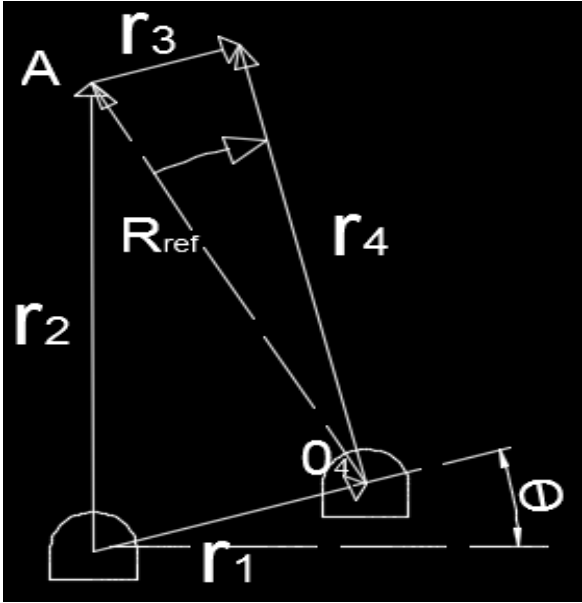


Figura 30. Configuración abierta primer mecanismo.

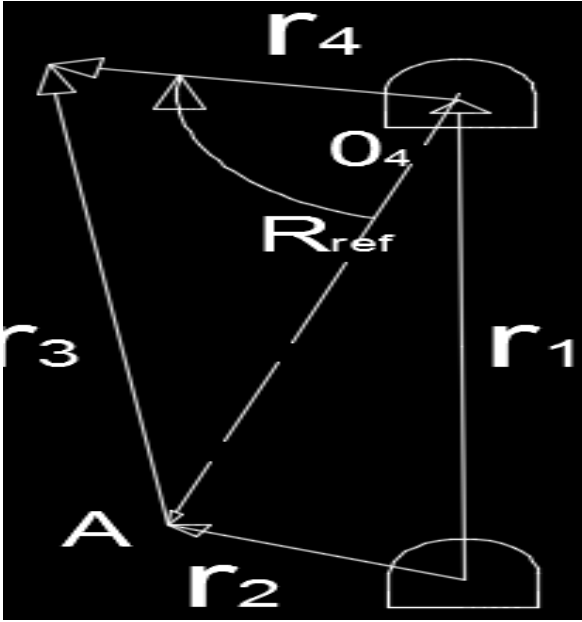


Figura 31. Configuración abierta segundo mecanismo.

### 3.2.2 Análisis de posiciones Primer mecanismo

En el capítulo 2 se vio cómo se desarrolla el modelo matemático para un mecanismo de cuatro barras, donde se obtuvieron las ecuaciones: 18, 19, 20, 26, 28, 29, 30 y 31, que servirán para encontrar las posiciones  $\theta_4$  y  $\theta_3$ .

Sustituyendo las magnitudes de los eslabones del primer mecanismo ( $r_1 = 5 \text{ cm}$ ,  $r_2 = 15 \text{ cm}$ ,  $r_3 = 3.5 \text{ cm}$  y  $r_4 = 15 \text{ cm}$ .) y  $\theta_1 = 30$ , en las ecuaciones anteriores, primero en las posiciones donde se sabe que el eslabón de entrada oscilará ( $\theta_2 = 69$  y  $\theta_2 = 157$ ) y después donde no lo hará ( $\theta_2 = 68$  y  $\theta_2 = 158$ ), esto en base a las iteraciones echas en AutoCAD, se tiene:

$$\theta_2 = 69^\circ = 1.20 \text{ rad}, \theta_1 = 30^\circ = 0.52 \text{ rad}$$

$$A = 2 * 15 * (5 \cos(0.52) - 15 \cos(1.20)) = -31.36$$

$$B = 2 * 15 (5 \sin(0.52) - 3.5 \sin(1.20)) = -345.11$$

$$C = 5^2 + 15^2 - 3.5^2 + 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(0.52 - 1.20) = 346.17$$

Según la tabla 3, si la configuración del mecanismo es abierta, el signo del radical para  $\theta_4$  es negativo y para  $\theta_3$  es positivo, entonces:

$$\theta_4 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-(-345.11) - \sqrt{(-31.36)^2 + (-345.11)^2 - 346.17^2}}{346.17 - (-31.36)} \right] = 1.43 \text{ rad} = 82.21^\circ$$

$$D = 2 * 3.5 * (15 \cos(1.20) - 5 \cos(0.52)) = 7.31$$

$$E = 2 * 3.5 * (15 \sin(1.20) - 5 \sin(0.52)) = 80.52$$

$$F = 5^2 + 15^2 + 3.5^2 - 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(1.20 - 0.52) = -179.32$$

$$\theta_3 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-80.52 + \sqrt{7.31 + 80.52^2 - (-179.32)^2}}{-179.32 - 7.31} \right] = 1.28 = 73.62^\circ$$

$$\theta_2 = 157^\circ = 2.74 \text{ rad}, \theta_1 = 30^\circ = 0.52 \text{ rad}$$

$$A = 2 * 15 * (5 * \cos(0.52) - 15 \cos(2.74)) = 544.31$$

$$B = 2 * 15 * (5 \sin(0.52) - 15 \sin(2.74)) = -100.82$$

$$C = 5^2 + 15^2 - 3.5^2 + 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(0.52 - 2.74) = 553.02$$

$$\theta_4 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-(-100.82) - \sqrt{544.31^2 + (-100.82)^2 - 553.02^2}}{553.02 - 544.31} \right] = 2.92 = 167.40^\circ$$

$$D = 2 * 3.5(15 \cos(2.74) - 5 \cos(0.52)) = -126.96$$

$$E = 2 * 3.5(15 \sin(2.74) - 5 \sin(0.52)) = 23.52$$

$$F = 5^2 + 15^2 + 3.5^2 - 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(2.74 - 0.52) = 127.52$$

$$\theta_3 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-23.52 + \sqrt{(-126.96)^2 + 23.52^2 - 127.52^2}}{127.52 - (-126.96)} \right] = -0.02 = -1.46^\circ$$

$$\theta_2 = 68 = 1.18 \text{ rad}, \theta_1 = 30^\circ = 0.52 \text{ rad}$$

$$A = 2 * 15 (5 \cos(0.52) - 15 \cos(1.18)) = -38.66$$

$$B = 2 * 15 (5 \sin(0.52) - 15 \sin(1.18)) = -342.23$$

$$C = 5^2 + 15^2 - 3.5^2 + 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(0.52 - 1.18) = 344.54$$

$$\theta_4 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-(-342.23) - \sqrt{(-38.66)^2 + (-342.23)^2 - 344.54^2}}{344.54 - (-38.66)} \right] = \frac{342.23 - \sqrt{-91.84}}{383.2}$$

$$D = 2 * 3.5(15 \cos(1.18) - 5 \cos(0.52)) = 9.02$$

$$E = 2 * 3.5(15 \sin(1.18) - 5 \sin(0.52)) = 79.85$$

$$F = 5^2 + 15^2 + 3.5^2 - 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(1.18 - 0.52) = -80.95$$

$$\theta_3 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-79.85 + \sqrt{9.02^2 + 79.85^2 - (-80.95)^2}}{-80.95 - 9.02} \right] = \frac{-79.85 + \sqrt{-95.51}}{-89.97}$$

$$\theta_2 = 158 = 2.75 \text{ rad}, \theta_1 = 30^\circ = 0.52 \text{ rad}$$

$$A = 2 * 15 (5 \cos(0.52) - 15 \cos(2.75)) = 547.13$$

$$B = 2 * 15 (5 \sin(0.52) - 15 \sin(2.75)) = -93.57$$

$$C = 5^2 + 15^2 - 3.5^2 + 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(0.52 - 2.75) = 555.09$$

$$\theta_4 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-(-93.57) - \sqrt{547.13^2 + (-93.57)^2 - 555.09^2}}{555.09 - 547.13} \right] = \frac{93.57 - \sqrt{-18.32}}{7.96}$$

$$D = 2 * 3.5 (15 \cos(2.75) - 5 \cos(0.52)) = -127.66$$

$$E = 2 * 3.5 (15 \sin(2.75) - 5 \sin(0.52)) = 21.83$$

$$F = 5^2 + 15^2 + 3.5^2 - 15^2 - 2 * 5 * 15 \cos(2.75 - 0.52) = 129.59$$

$$\theta_3 = 2 \operatorname{atan} \left[ \frac{-21.83 + \sqrt{(-127.66)^2 + 21.83^2 - 129.59^2}}{129.59 - (-127.66)} \right] = \frac{-21.83 + \sqrt{-19.94}}{257.25}$$

Se insertaron las ecuaciones 17, 18, 19, 25, 27, 28, 29 y 30 en Excel para verificar y demostrar que las iteraciones realizadas en AutoCAD son correctas (Tabla 4).



**Tabla 4. Posiciones de los eslabones del mecanismo uno.**

$\Theta_1(\text{grad})$	$\Theta_1(\text{rad})$	$\Theta_2(\text{grad})$	$\Theta_2(\text{rad})$	$\Theta_3(\text{grad})$	$\Theta_3(\text{rad})$	$\Theta_4(\text{grad})$	$\Theta_4(\text{rad})$
30	0.52359878	0	0	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	1	0.01745329	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	2	0.03490659	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	3	0.05235988	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	4	0.06981317	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	5	0.08726646	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	6	0.10471976	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	7	0.12217305	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	8	0.13962634	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	9	0.15707963	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	10	0.17453293	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	11	0.19198622	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	12	0.20943951	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	13	0.2268928	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	14	0.2443461	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	15	0.26179939	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	16	0.27925268	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	17	0.29670597	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	18	0.31415927	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	19	0.33161256	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	20	0.34906585	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	21	0.36651914	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	22	0.38397244	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	23	0.40142573	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	24	0.41887902	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	25	0.43633231	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	26	0.45378561	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	27	0.4712389	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	28	0.48869219	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	29	0.50614548	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	30	0.52359878	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	31	0.54105207	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	32	0.55850536	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	33	0.57595865	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	34	0.59341195	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	35	0.61086524	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	36	0.62831853	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	37	0.64577182	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	38	0.66322512	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!

Continuación Tabla 4.

30	0.52359878	39	0.68067841	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	40	0.6981317	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	41	0.71558499	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	42	0.73303829	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	43	0.75049158	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	44	0.76794487	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	45	0.78539816	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	46	0.80285146	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	47	0.82030475	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	48	0.83775804	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	49	0.85521133	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	50	0.87266463	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	51	0.89011792	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	52	0.90757121	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	53	0.9250245	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	54	0.9424778	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	55	0.95993109	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	56	0.97738438	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	57	0.99483767	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	58	1.01229097	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	59	1.02974426	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	60	1.04719755	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	61	1.06465084	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	62	1.08210414	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	63	1.09955743	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	64	1.11701072	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	65	1.13446401	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	66	1.15191731	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	67	1.1693706	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	68	1.18682389	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	69	1.20427718	73.62236	1.28495258	82.2133266	1.43489324
30	0.52359878	70	1.22173048	68.6970647	1.19898997	82.0612294	1.43223864
30	0.52359878	71	1.23918377	65.3756703	1.1410207	82.2925358	1.4362757
30	0.52359878	72	1.25663706	62.7875765	1.09584994	82.7012459	1.44340904
30	0.52359878	73	1.27409035	60.6403915	1.05837449	83.2176867	1.45242263
30	0.52359878	74	1.29154365	58.7935109	1.02614034	83.8081586	1.46272831
30	0.52359878	75	1.30899694	57.1666631	0.99774649	84.4533258	1.4739886
30	0.52359878	76	1.32645023	55.7090086	0.97230562	85.1408889	1.48598884
30	0.52359878	77	1.34390352	54.386004	0.94921484	85.8624597	1.49858263
30	0.52359878	78	1.36135682	53.172952	0.92804309	86.6120222	1.51166496

Continuación Tabla 4.

30	0.52359878	79	1.37881011	52.0514971	0.90847001	87.3850935	1.5251576
30	0.52359878	80	1.3962634	51.0075744	0.89025012	88.1782319	1.53900048
30	0.52359878	81	1.41371669	50.0301372	0.87319062	88.9887304	1.55314634
30	0.52359878	82	1.43116999	49.1103307	0.85713697	89.8144175	1.5675573
30	0.52359878	83	1.44862328	48.2409336	0.84196313	90.6535217	1.58220243
30	0.52359878	84	1.46607657	47.4159697	0.82756479	91.5045781	1.59705617
30	0.52359878	85	1.48352986	46.63043	0.81385454	92.3663602	1.6120971
30	0.52359878	86	1.50098316	45.8800686	0.80075826	93.2378304	1.62730713
30	0.52359878	87	1.51843645	45.1612511	0.78821253	94.1181033	1.64267079
30	0.52359878	88	1.53588974	44.4708387	0.77616256	95.0064172	1.65817479
30	0.52359878	89	1.55334303	43.8060988	0.76456066	95.9021118	1.67380761
30	0.52359878	90	1.57079633	43.164635	0.753365	96.8046121	1.68955921
30	0.52359878	91	1.58824962	42.5443322	0.74253868	97.7134138	1.70542079
30	0.52359878	92	1.60570291	41.9433112	0.73204888	98.6280729	1.72138461
30	0.52359878	93	1.6231562	41.3598935	0.72186632	99.5481968	1.7374438
30	0.52359878	94	1.6406095	40.792571	0.71196467	100.473437	1.75359229
30	0.52359878	95	1.65806279	40.2399825	0.70232019	101.403484	1.76982467
30	0.52359878	96	1.67551608	39.7008927	0.69291129	102.33806	1.78613609
30	0.52359878	97	1.69296937	39.1741759	0.68371835	103.276917	1.80252224
30	0.52359878	98	1.71042267	38.6588011	0.67472336	104.219833	1.81897924
30	0.52359878	99	1.72787596	38.15382	0.66590978	105.16661	1.8355036
30	0.52359878	100	1.74532925	37.6583567	0.65726231	106.117067	1.85209221
30	0.52359878	101	1.76278254	37.1715985	0.64876678	107.071043	1.86874224
30	0.52359878	102	1.78023584	36.6927884	0.64040997	108.028395	1.88545118
30	0.52359878	103	1.79768913	36.2212179	0.63217951	108.988992	1.90221677
30	0.52359878	104	1.81514242	35.7562215	0.62406379	109.952718	1.91903696
30	0.52359878	105	1.83259571	35.2971709	0.61605185	110.919469	1.93590994
30	0.52359878	106	1.85004901	34.8434707	0.60813329	111.889152	1.95283409
30	0.52359878	107	1.8675023	34.3945541	0.60029821	112.861684	1.96980798
30	0.52359878	108	1.88495559	33.9498789	0.59253717	113.836993	1.98683035
30	0.52359878	109	1.90240888	33.5089244	0.58484106	114.815017	2.00390008
30	0.52359878	110	1.91986218	33.0711879	0.57720112	115.7957	2.02101622
30	0.52359878	111	1.93731547	32.636182	0.56960883	116.778995	2.03817796
30	0.52359878	112	1.95476876	32.2034314	0.56205591	117.764865	2.05538463
30	0.52359878	113	1.97222205	31.772471	0.55453423	118.753277	2.07263568
30	0.52359878	114	1.98967535	31.3428428	0.5470358	119.744209	2.08993071
30	0.52359878	115	2.00712864	30.9140937	0.53955272	120.737643	2.10726941
30	0.52359878	116	2.02458193	30.4857732	0.53207712	121.733571	2.12465163
30	0.52359878	117	2.04203522	30.0574308	0.52460113	122.73199	2.14207733
30	0.52359878	118	2.05948852	29.6286141	0.51711687	123.732905	2.15954659

Continuación Tabla 4.

30	0.52359878	119	2.07694181	29.1988657	0.50961634	124.736328	2.17705962
30	0.52359878	120	2.0943951	28.7677213	0.50209145	125.742278	2.19461676
30	0.52359878	121	2.11184839	28.3347069	0.49453393	126.750782	2.21221848
30	0.52359878	122	2.12930169	27.8993359	0.48693527	127.761876	2.22986539
30	0.52359878	123	2.14675498	27.4611062	0.47928672	128.775601	2.24755824
30	0.52359878	124	2.16420827	27.0194973	0.47157919	129.792012	2.26529794
30	0.52359878	125	2.18166156	26.5739661	0.4638032	130.811167	2.28308556
30	0.52359878	126	2.19911486	26.1239438	0.45594883	131.833139	2.30092235
30	0.52359878	127	2.21656815	25.6688312	0.44800562	132.85801	2.31880972
30	0.52359878	128	2.23402144	25.2079937	0.43996249	133.885874	2.33674933
30	0.52359878	129	2.25147474	24.7407562	0.43180765	134.916837	2.35474302
30	0.52359878	130	2.26892803	24.2663963	0.42352851	135.95102	2.37279292
30	0.52359878	131	2.28638132	23.7841376	0.41511151	136.98856	2.39090141
30	0.52359878	132	2.30383461	23.293141	0.406542	138.029611	2.40907118
30	0.52359878	133	2.32128791	22.7924949	0.39780408	139.074347	2.42730527
30	0.52359878	134	2.3387412	22.2812035	0.38888036	140.122966	2.44560711
30	0.52359878	135	2.35619449	21.7581735	0.37975177	141.175689	2.4639806
30	0.52359878	136	2.37364778	21.2221973	0.37039722	142.232769	2.48243012
30	0.52359878	137	2.39110108	20.6719331	0.3607933	143.294492	2.50096068
30	0.52359878	138	2.40855437	20.1058811	0.35091382	144.361183	2.51957796
30	0.52359878	139	2.42600766	19.5223536	0.34072935	145.433217	2.53828848
30	0.52359878	140	2.44346095	18.9194382	0.33020649	146.511022	2.55709972
30	0.52359878	141	2.46091425	18.2949511	0.31930713	147.595093	2.57602033
30	0.52359878	142	2.47836754	17.6463787	0.30798741	148.686006	2.59506035
30	0.52359878	143	2.49582083	16.9708011	0.29619636	149.784436	2.61423158
30	0.52359878	144	2.51327412	16.2647928	0.28387419	150.891182	2.63354793
30	0.52359878	145	2.53072742	15.5242896	0.27094997	152.007193	2.65302601
30	0.52359878	146	2.54818071	14.7444085	0.25733848	153.13362	2.67268587
30	0.52359878	147	2.565634	13.9191973	0.24293582	154.271867	2.69255203
30	0.52359878	148	2.58308729	13.0412768	0.22761322	155.423681	2.71265498
30	0.52359878	149	2.60054059	12.1013154	0.2112078	156.591275	2.73303333
30	0.52359878	150	2.61799388	11.0872282	0.19350864	157.777516	2.75373714
30	0.52359878	151	2.63544717	9.98289992	0.17423447	158.986232	2.77483321
30	0.52359878	152	2.65290046	8.76603448	0.15299616	160.222714	2.7964139
30	0.52359878	153	2.67035376	7.40427095	0.12922891	161.494639	2.81861317
30	0.52359878	154	2.68780705	5.8474769	0.10205772	162.81388	2.84163827
30	0.52359878	155	2.70526034	4.01030077	0.06999295	164.200613	2.86584133
30	0.52359878	156	2.72271363	1.7237489	0.03008509	165.694693	2.89191794
30	0.52359878	157	2.74016693	-1.46037584	-0.02548837	167.401492	2.92170722

**Continuación Tabla 4.**

30	0.52359878	158	2.75762022	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	159	2.77507351	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	160	2.7925268	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	161	2.8099801	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	162	2.82743339	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	163	2.84488668	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	164	2.86233997	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	165	2.87979327	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	166	2.89724656	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	167	2.91469985	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	168	2.93215314	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	169	2.94960644	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	170	2.96705973	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	171	2.98451302	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	172	3.00196631	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	173	3.01941961	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	174	3.0368729	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	175	3.05432619	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	176	3.07177948	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	177	3.08923278	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	178	3.10668607	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	179	3.12413936	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!
30	0.52359878	180	3.14159265	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!	#jNUM!

El intervalo de posiciones para iterar al eslabón de entrada se estableció en base al giro del eje del motor que es de  $0$  a  $180$ . Cuando el eslabón  $r_2$  se mueve en este intervalo existen posiciones inciertas para los demás eslabones ( $r_3, r_4$ ), zona de color rojo, esto significa que el eslabón de entrada no puede moverse dentro de este rango y en consecuencia los demás eslabones tampoco. Sin embargo existen posiciones, zona de color verde, donde se saben las posiciones de los demás eslabones ( $r_3, r_4$ ), esto significa que  $r_2$  oscilará, y el intervalo donde lo hará es  $69 \leq \theta_2 \leq 157$ , este se puede observar desde la vista lateral izquierda del brazo de robot (Figura 32).

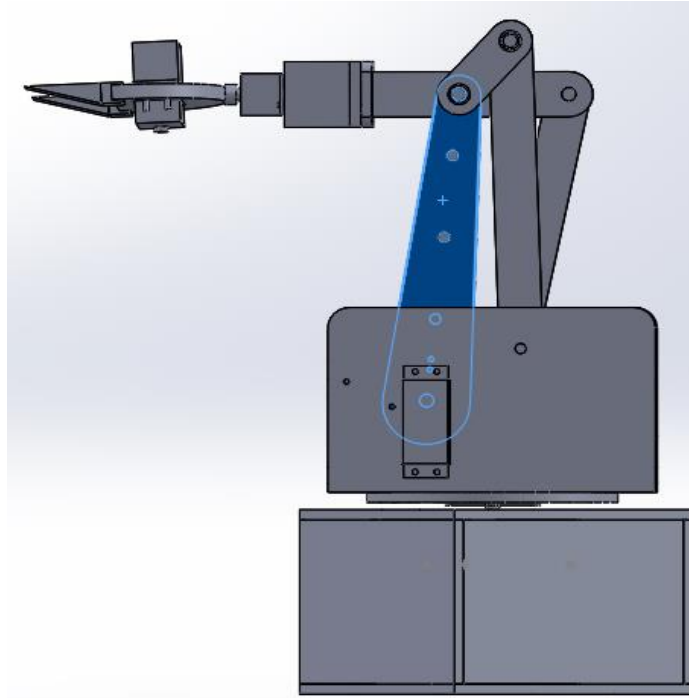


Figura 32. Vista lateral izquierda del brazo de robot.

### 3.2.3 Análisis de posición segundo mecanismo

De igual manera que en el mecanismo uno se introduce las ecuaciones 17, 18, 19, 25, 27, 28, 29 y 30 en Excel para verificar y demostrar los requerimientos del segundo mecanismo (tabla 5), las longitudes de los eslabones son:  $r'_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $r'_2 = 35 \text{ mm}$ ,  $r'_3 = 150 \text{ mm}$  y  $r'_4 = 50 \text{ mm}$

**Tabla 5. Posiciones de los eslabones del mecanismo dos.**

$\Theta 1'$ (grad)	$\Theta 1'$ (rad)	$\Theta 2'$ (grad)	$\Theta 2'$ (rad)	$\Theta 3'$ (grad)	$\Theta 3'$ (rad)	$\Theta 4'$ (grad)	$\Theta 4'$ (rad)
69	1.20427718	2	0.03490659	101.76065	1.7760584	170.751822	2.9801815
69	1.20427718	4	0.06981317	101.647735	1.77408766	169.262459	2.9541872
69	1.20427718	6	0.10471976	101.503738	1.77157444	167.750818	2.92780409
69	1.20427718	8	0.13962634	101.328308	1.76851259	166.217721	2.90104651
69	1.20427718	10	0.17453293	101.121171	1.76489737	164.664132	2.87393126
69	1.20427718	12	0.20943951	100.882144	1.76072557	163.091167	2.84647785
69	1.20427718	14	0.2443461	100.611142	1.75599569	161.500117	2.81870878
69	1.20427718	16	0.27925268	100.308186	1.75070811	159.892457	2.79064983
69	1.20427718	18	0.31415927	99.973417	1.74486529	158.269873	2.76233039
69	1.20427718	20	0.34906585	99.6071041	1.73847192	156.634271	2.73378375
69	1.20427718	22	0.38397244	99.2096555	1.73153514	154.987798	2.70504738
69	1.20427718	24	0.41887902	98.7816294	1.72406467	153.332863	2.67616331
69	1.20427718	26	0.45378561	98.3237439	1.71607306	151.672148	2.64717836
69	1.20427718	28	0.48869219	97.8368866	1.7075758	150.008627	2.61814444
69	1.20427718	30	0.52359878	97.3221238	1.69859149	148.345581	2.58911882
69	1.20427718	32	0.55850536	96.7807073	1.68914199	146.686607	2.56016427
69	1.20427718	34	0.59341195	96.2140809	1.6792525	145.03563	2.53134927
69	1.20427718	36	0.62831853	95.623884	1.66895162	143.3969	2.50274805
69	1.20427718	38	0.66322512	95.0119523	1.6582714	141.774999	2.47444054
69	1.20427718	40	0.6981317	94.3803162	1.64724727	140.174826	2.44651224
69	1.20427718	42	0.73303829	93.7311951	1.63591797	138.601582	2.41905396
69	1.20427718	44	0.76794487	93.0669869	1.62432535	137.060747	2.39216131
69	1.20427718	46	0.80285146	92.3902539	1.61251413	135.558039	2.36593412
69	1.20427718	48	0.83775804	91.7037024	1.60053154	134.099372	2.34047557
69	1.20427718	50	0.87266463	91.0101581	1.58842691	132.690791	2.31589119
69	1.20427718	52	0.90757121	90.3125351	1.57625109	131.338401	2.29228753
69	1.20427718	54	0.9424778	89.6138004	1.56405587	130.048286	2.26977077
69	1.20427718	56	0.97738438	88.9169338	1.55189326	128.826411	2.24844503
69	1.20427718	58	1.01229097	88.2248845	1.53981472	127.678522	2.2284106
69	1.20427718	60	1.04719755	87.5405246	1.52787038	126.610041	2.20976209
69	1.20427718	62	1.08210414	86.8666032	1.51610824	125.625955	2.19258655
69	1.20427718	64	1.11701072	86.2057012	1.50457332	124.730717	2.17696169
69	1.20427718	66	1.15191731	85.5601895	1.49330701	123.92815	2.16295426
69	1.20427718	68	1.18682389	84.9321932	1.48234641	123.221374	2.15061869
69	1.20427718	70	1.22173048	84.3235623	1.4717238	122.612743	2.13999608
69	1.20427718	72	1.25663706	83.7358519	1.46146632	122.103813	2.13111356
69	1.20427718	74	1.29154365	83.1703107	1.45159576	121.695326	2.12398413
69	1.20427718	76	1.32645023	82.62788	1.44212856	121.387232	2.11860687
69	1.20427718	78	1.36135682	82.1092018	1.43307592	121.178718	2.11496762
69	1.20427718	80	1.3962634	81.6146344	1.42444409	121.068272	2.11303997

Continuación Tabla 5.

69	1.20427718	82	1.43116999	81.1442754	1.41623478	121.053752	2.11278655
69	1.20427718	84	1.46607657	80.6979894	1.40844561	121.132475	2.11416051
69	1.20427718	86	1.50098316	80.2754382	1.40107071	121.301304	2.11710714
69	1.20427718	88	1.53588974	79.8761139	1.39410118	121.556747	2.12156546
69	1.20427718	90	1.57079633	79.49937	1.38752576	121.89504	2.12746979
69	1.20427718	92	1.60570291	79.1444527	1.38133128	122.312238	2.13475127
69	1.20427718	94	1.6406095	78.8105289	1.37550321	122.804289	2.14333918
69	1.20427718	96	1.67551608	78.4967117	1.37002607	123.367099	2.15316206
69	1.20427718	98	1.71042267	78.2020824	1.36488382	123.996592	2.1641488
69	1.20427718	100	1.74532925	77.9257093	1.3600602	124.688757	2.17622934
69	1.20427718	102	1.78023584	77.6666633	1.35553899	125.43968	2.18933543
69	1.20427718	104	1.81514242	77.4240301	1.35130425	126.245579	2.20340102
69	1.20427718	106	1.85004901	77.19692	1.34734043	127.10282	2.2183627
69	1.20427718	108	1.88495559	76.9844752	1.34363257	128.007932	2.23415989
69	1.20427718	110	1.91986218	76.7858751	1.34016634	128.957615	2.25073498
69	1.20427718	112	1.95476876	76.6003396	1.33692813	129.948743	2.26803343
69	1.20427718	114	1.98967535	76.4271313	1.33390508	130.978365	2.28600372
69	1.20427718	116	2.02458193	76.2655568	1.33108507	132.0437	2.30459731
69	1.20427718	118	2.05948852	76.1149661	1.32845677	133.142133	2.32376859
69	1.20427718	120	2.0943951	75.9747529	1.32600959	134.271209	2.34347469
69	1.20427718	122	2.12930169	75.8443528	1.32373368	135.428624	2.3636754
69	1.20427718	124	2.16420827	75.7232424	1.3216199	136.612217	2.38433299
69	1.20427718	126	2.19911486	75.6109374	1.31965981	137.819961	2.40541209
69	1.20427718	128	2.23402144	75.5069911	1.3178456	139.049952	2.42687949
69	1.20427718	130	2.26892803	75.4109922	1.31617011	140.300406	2.44870402
69	1.20427718	132	2.30383461	75.3225633	1.31462673	141.569642	2.47085638
69	1.20427718	134	2.3387412	75.2413588	1.31320944	142.856082	2.49330899
69	1.20427718	136	2.37364778	75.1670631	1.31191274	144.158235	2.51603585
69	1.20427718	138	2.40855437	75.0993894	1.31073161	145.474695	2.53901241
69	1.20427718	140	2.44346095	75.0380773	1.30966151	146.80413	2.56221543
69	1.20427718	142	2.47836754	74.982892	1.30869835	148.145279	2.58562288
69	1.20427718	144	2.51327412	74.9336225	1.30783843	149.496939	2.6092138
69	1.20427718	146	2.54818071	74.8900805	1.30707848	150.857964	2.63296818
69	1.20427718	148	2.58308729	74.8520991	1.30641558	152.22726	2.65686691
69	1.20427718	150	2.61799388	74.8195318	1.30584718	153.603774	2.68089161
69	1.20427718	152	2.65290046	74.7922518	1.30537105	154.986493	2.7050246
69	1.20427718	154	2.68780705	74.7701506	1.30498531	156.374437	2.72924879
69	1.20427718	156	2.72271363	74.7531378	1.30468838	157.766656	2.75354759
69	1.20427718	158	2.75762022	74.74114	1.30447898	159.162223	2.77790483
69	1.20427718	160	2.7925268	74.7341005	1.30435612	160.560233	2.80230471



Continuación Tabla 5.

69	1.20427718	162	2.82743339	74.7319789	1.30431909	161.959797	2.82673171
69	1.20427718	164	2.86233997	74.7347505	1.30436746	163.360037	2.85117051
69	1.20427718	166	2.89724656	74.742406	1.30450108	164.760084	2.87560594
69	1.20427718	168	2.93215314	74.7549514	1.30472003	166.159075	2.90002294
69	1.20427718	170	2.96705973	74.7724076	1.3050247	167.556146	2.92440644
69	1.20427718	172	3.00196631	74.7948105	1.30541571	168.950434	2.94874135
69	1.20427718	174	3.0368729	74.822211	1.30589394	170.341067	2.97301247
69	1.20427718	176	3.07177948	74.8546748	1.30646054	171.727167	2.99720447
69	1.20427718	178	3.10668607	74.8922825	1.30711691	173.107842	3.0213018
69	1.20427718	180	3.14159265	74.9351298	1.30786474	174.482186	3.04528862
157	2.74016693	2	0.03490659	174.900008	3.052581	-61.7730723	-1.0781435
157	2.74016693	4	0.06981317	175.4036	3.06137035	-62.000903	-1.0821199
157	2.74016693	6	0.10471976	175.911772	3.07023961	-62.2694848	-1.08680753
157	2.74016693	8	0.13962634	176.423651	3.07917359	-62.57775	-1.09218778
157	2.74016693	10	0.17453293	176.938356	3.08815688	-62.9246393	-1.09824214
157	2.74016693	12	0.20943951	177.454994	3.09717392	-63.3091111	-1.10495244
157	2.74016693	14	0.2443461	177.97267	3.10620907	-63.7301509	-1.11230097
157	2.74016693	16	0.27925268	178.490484	3.11524663	-64.1867777	-1.12027061
157	2.74016693	18	0.31415927	179.007535	3.12427088	-64.6780506	-1.12884494
157	2.74016693	20	0.34906585	179.522925	3.13326612	-65.2030732	-1.13800831
157	2.74016693	22	0.38397244	-179.964246	-3.14096862	-65.7609973	-1.14774592
157	2.74016693	24	0.41887902	-179.454871	-3.13207836	-66.3510255	-1.15804386
157	2.74016693	26	0.45378561	-178.949843	-3.12326395	-66.972413	-1.16888912
157	2.74016693	28	0.48869219	-178.450048	-3.11454089	-67.6244687	-1.18026963
157	2.74016693	30	0.52359878	-177.956371	-3.1059246	-68.306555	-1.19217429
157	2.74016693	32	0.55850536	-177.469691	-3.09743043	-69.018088	-1.20459288
157	2.74016693	34	0.59341195	-176.990884	-3.08907367	-69.7585363	-1.21751614
157	2.74016693	36	0.62831853	-176.520822	-3.08086954	-70.5274199	-1.23093569
157	2.74016693	38	0.66322512	-176.060373	-3.0728332	-71.3243089	-1.24484403
157	2.74016693	40	0.6981317	-175.610405	-3.06497976	-72.1488209	-1.25923448
157	2.74016693	42	0.73303829	-175.171779	-3.0573243	-73.0006193	-1.27410116
157	2.74016693	44	0.76794487	-174.745358	-3.04988184	-73.8794109	-1.28943897
157	2.74016693	46	0.80285146	-174.331999	-3.04266737	-74.784943	-1.30524349
157	2.74016693	48	0.83775804	-173.93256	-3.03569585	-75.7170011	-1.32151097
157	2.74016693	50	0.87266463	-173.547897	-3.02898221	-76.6754053	-1.33823828
157	2.74016693	52	0.90757121	-173.178864	-3.02254137	-77.6600078	-1.35542283
157	2.74016693	54	0.9424778	-172.826313	-3.01638819	-78.6706892	-1.37306255
157	2.74016693	56	0.97738438	-172.491094	-3.01053752	-79.7073551	-1.39115579
157	2.74016693	58	1.01229097	-172.174056	-3.00500417	-80.7699329	-1.40970127
157	2.74016693	60	1.04719755	-171.876045	-2.9998029	-81.8583672	-1.42869803

Continuación Tabla 5.

157	2.74016693	62	1.08210414	-171.597903	-2.99494839	-82.9726165	-1.44814535
157	2.74016693	64	1.11701072	-171.340466	-2.99045527	-84.1126482	-1.46804265
157	2.74016693	66	1.15191731	-171.104567	-2.98633806	-85.2784344	-1.48838946
157	2.74016693	68	1.18682389	-170.89103	-2.98261114	-86.4699472	-1.50918528
157	2.74016693	70	1.22173048	-170.70067	-2.97928873	-87.6871527	-1.53042953
157	2.74016693	72	1.25663706	-170.534292	-2.97638489	-88.9300061	-1.55212141
157	2.74016693	74	1.29154365	-170.392687	-2.9739134	-90.1984453	-1.57425985
157	2.74016693	76	1.32645023	-170.276627	-2.97188778	-91.4923842	-1.59684335
157	2.74016693	78	1.36135682	-170.186867	-2.97032118	-92.8117061	-1.61986986
157	2.74016693	80	1.3962634	-170.124139	-2.96922637	-94.1562553	-1.64333667
157	2.74016693	82	1.43116999	-170.089146	-2.96861562	-95.5258299	-1.66724025
157	2.74016693	84	1.46607657	-170.082558	-2.96850064	-96.9201716	-1.69157611
157	2.74016693	86	1.50098316	-170.10501	-2.96889251	-98.3389574	-1.71633859
157	2.74016693	88	1.53588974	-170.157094	-2.96980153	-99.7817881	-1.74152074
157	2.74016693	90	1.57079633	-170.23935	-2.97123717	-101.248178	-1.76711406
157	2.74016693	92	1.60570291	-170.352265	-2.97320791	-102.737541	-1.79310836
157	2.74016693	94	1.6406095	-170.496262	-2.97572113	-104.249182	-1.81949148
157	2.74016693	96	1.67551608	-170.671692	-2.97878297	-105.782279	-1.84624905
157	2.74016693	98	1.71042267	-170.878829	-2.98239819	-107.335868	-1.87333643
157	2.74016693	100	1.74532925	-171.117856	-2.98657	-108.908833	-1.90081771
157	2.74016693	102	1.78023584	-171.388858	-2.99129988	-110.499883	-1.92858679
157	2.74016693	104	1.81514242	-171.691814	-2.99658746	-112.107543	-1.95664573
157	2.74016693	106	1.85004901	-172.026583	-3.00243027	-113.730127	-1.98496517
157	2.74016693	108	1.88495559	-172.392896	-3.00882364	-115.365729	-2.01351182
157	2.74016693	110	1.91986218	-172.790344	-3.01576043	-117.012202	-2.04224818
157	2.74016693	112	1.95476876	-173.218371	-3.02323089	-118.667137	-2.07113226
157	2.74016693	114	1.98967535	-173.676256	-3.0312225	-120.327852	-2.10011721
157	2.74016693	116	2.02458193	-174.163113	-3.03971976	-121.991373	-2.12915112
157	2.74016693	118	2.05948852	-174.677876	-3.04870407	-123.654419	-2.15817675
157	2.74016693	120	2.0943951	-175.219293	-3.05815357	-125.313393	-2.1871313
157	2.74016693	122	2.12930169	-175.785919	-3.06804307	-126.96437	-2.21594629
157	2.74016693	124	2.16420827	-176.376116	-3.07834395	-128.6031	-2.24454752
157	2.74016693	126	2.19911486	-176.988048	-3.08902417	-130.225001	-2.27285503
157	2.74016693	128	2.23402144	-177.619684	-3.1000483	-131.825174	-2.30078332
157	2.74016693	130	2.26892803	-178.268805	-3.1113776	-133.398418	-2.32824161
157	2.74016693	132	2.30383461	-178.933013	-3.12297022	-134.939253	-2.35513426
157	2.74016693	134	2.3387412	-179.609746	-3.13478144	-136.441961	-2.38136145
157	2.74016693	136	2.37364778	179.703702	3.13642129	-137.900628	-2.40681999
157	2.74016693	138	2.40855437	179.010158	3.12431665	-139.309209	-2.43140438
157	2.74016693	140	2.44346095	178.312535	3.11214084	-140.661599	-2.45500803

**Continuación Tabla 5.**

157	2.74016693	142	2.47836754	177.6138	3.09994561	-141.951714	-2.47752479
157	2.74016693	144	2.51327412	176.916934	3.087783	-143.173589	-2.49885054
157	2.74016693	146	2.54818071	176.224884	3.07570446	-144.321478	-2.51888497
157	2.74016693	148	2.58308729	175.540525	3.06376012	-145.389959	-2.53753348
157	2.74016693	150	2.61799388	174.866603	3.05199798	-146.374045	-2.55470902
157	2.74016693	152	2.65290046	174.205701	3.04046306	-147.269283	-2.57033388
157	2.74016693	154	2.68780705	173.560189	3.02919676	-148.07185	-2.58434131
157	2.74016693	156	2.72271363	172.932193	3.01823615	-148.778626	-2.59667688
157	2.74016693	158	2.75762022	172.323562	3.00761354	-149.387257	-2.60729949
157	2.74016693	160	2.7925268	171.735852	2.99735606	-149.896187	-2.616182
157	2.74016693	162	2.82743339	171.170311	2.9874855	-150.304674	-2.62331144
157	2.74016693	164	2.86233997	170.62788	2.9780183	-150.612768	-2.6286887
157	2.74016693	166	2.89724656	170.109202	2.96896566	-150.821282	-2.63232795
157	2.74016693	168	2.93215314	169.614634	2.96033383	-150.931728	-2.6342556
157	2.74016693	170	2.96705973	169.144275	2.95212452	-150.946248	-2.63450902
157	2.74016693	172	3.00196631	168.697989	2.94433536	-150.867525	-2.63313505
157	2.74016693	174	3.0368729	168.275438	2.93696045	-150.698696	-2.63018842
157	2.74016693	176	3.07177948	167.876114	2.92999092	-150.443253	-2.62573011
157	2.74016693	178	3.10668607	167.49937	2.9234155	-150.10496	-2.61982578
157	2.74016693	180	3.14159265	167.144453	2.91722103	-149.687762	-2.61254429

Los resultados anteriores se organizaron en dos posiciones importantes para el mecanismo dos ( $\theta_1' = 69$ ,  $\theta_1' = 157$ ). La pregunta que se harían ¿Por qué dos zonas?, la respuesta es que la posición del eslabón fijo  $r_1'$  del mecanismo dos es igual a la posición del eslabón  $r_2$  del mecanismo uno, esto es  $\theta_2 = \theta_1'$ . Como ya se observó en los resultados del mecanismo uno la posición del eslabón  $r_2$  es  $69 \leq \theta_2 \leq 157$ , por lo tanto no tendría caso revisar otras posiciones ya que el mecanismo uno no puede trabajar más allá del rango encontrado. Se puede inferir que  $r_2$  podrá girar una revolución completa tal y como se estableció, pero este giro será limitado por el motor.

### 3.3 Análisis de ajustes

Cuando existen ensambles, es necesario encontrar el ajuste que cumpla con los requerimientos de las piezas árbol y agujero.

### 3.3.1 Ajustes principales

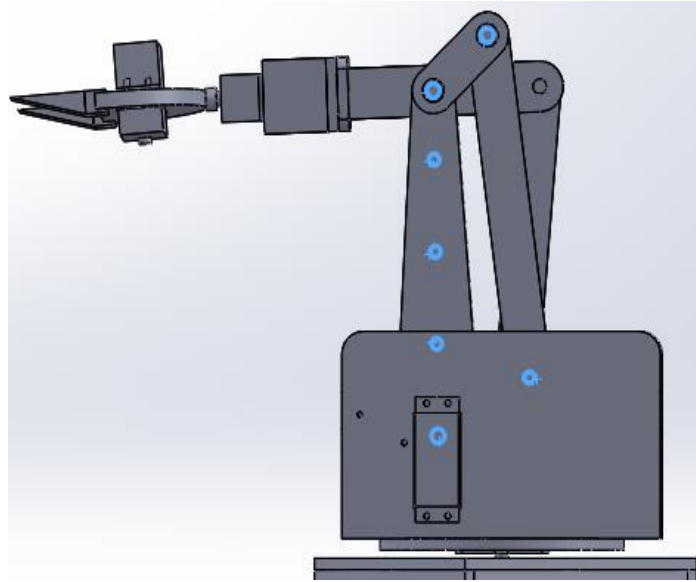
Según la figura 33 del Libro “Manual de Métodos de Fabricación Metalmeccánica” de los Autores: “Sergio A. Villanueva Pruneda y Jorge Ramos Watanave”. Los ajustes más utilizados son los del tipo agujero normal.

AJUSTES PRINCIPALES UTILIZAR DE PREFERENCIA LOS DE LOS CIRCULOS				Arboles (posi- ción)	AGUJEROS Y CALIDAD DE LOS ARBOLES				
					H 6	H 7	H 8	H 9	H 11
AJUSTES CON JUEGO	JUEGO AMPLIO	Ensamblajes cuyo funcionamiento requiere juego amplio por dilata- ciones, mal alineamiento, cojinetes grandes, etc.		c				9	11
				d				9	11
	JUEGO MEDIANO	Piezas que giran o deslizan con una buena lubricación.		e		7	8	9	
				f	6	6-7	7		
JUEGO PEQUEÑO	Piezas con guía precisa y movimientos de pequeña amplitud.		g	5	6				
AJUSTE EXACTO			h	5	6	7	8		
AJUSTES CON APRIETE	APRIETE DEBIL	El ensamble se puede hacer a mano, la unión no puede trans- mitir esfuerzos. Se puede mon- tar y desmontar.	Ensamble a mano	js	5	6			
				k	5				
	APRIETE MEDIANO		Ensamble a mano auxiliándose de un mazo	m		6			
				p		6			
	APRIETE FUERTE	Imposible desmontar sin dete- rioro. La unión puede trans- mitir esfuerzos.	Ensamble a prensa	s			7		
				u			7		
Ensamble a prensa o por di- latación (verificar los esfuer- zos internos).			x			7			
			z			7			

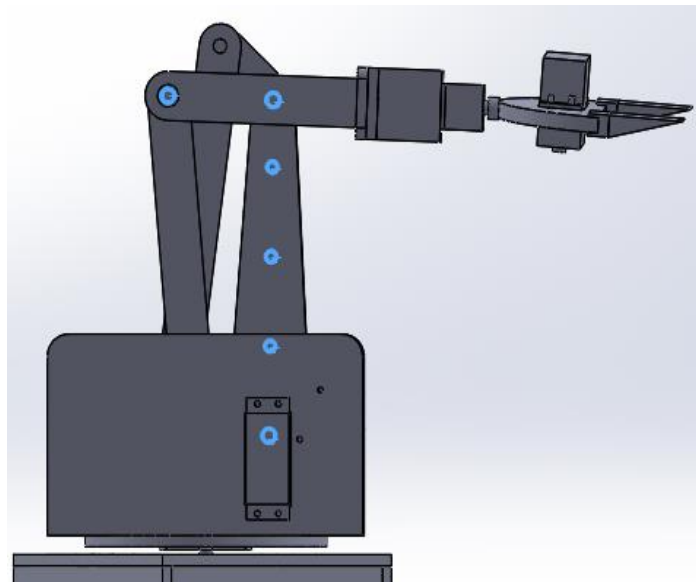
Figura 33. Ajustes principales [7].

### 3.3.2 Ajustes Primer y segundo Mecanismo de cuatro barras.

En el primer y segundo mecanismo existen barrenos donde se usan elementos árboles (ejes y prisioneros allen), como consecuencia es necesario un ajuste en cada uno de los agujeros (Figura 34 y Figura 35), que permita giro y la vez estabilidad en cada uno de los elementos ya mencionados.



**Figura 34. Localización de barrenos primer mecanismo.**



**Figura 35. Localización de barrenos de segundo mecanismo.**

Para estos barrenos se escogió un ajuste con juego mediano (Figuras 34 y 35), por ser el indicado en cumplir los requerimientos anteriores, además de que permitirá el ensamble y desensamble sin tener que romper alguna pieza y estabilidad.

Las dimensiones nominales de los agujeros son 6.5 y 5 mm, en los dos mecanismos y para cada uno de ellos se requiere de un juego mediano, por tanto los intervalos de tolerancia para los agujeros y árboles según la Figura 17, quedan de la siguiente manera:

$$6.5 \frac{H8}{e8}, 6.5 H8 = 6.5_0^{0.022} \text{ y } 6.5 e8 = 6.5_{-0.047}^{-0.025}$$

$$5 \frac{H8}{e8}, 5H8 = 5_0^{0.018} \text{ y } 5 e8 = 5_{-0.038}^{-0.020}$$

Para calcular el juego máximo y mínimo se ocupa las ecuaciones siguientes:

$$\text{juego máximo} = \text{Dimensión máxima del agujero} - \text{dimensión mínima del árbol} \quad (33)$$

$$\text{juego mínimo} = \text{Dimensión mínima del agujero} - \text{dimensión máxima del árbol} \quad (34)$$

Sustituyendo valores en las ecuaciones (33), (34), para la dimensión nominal 6.5.

$$\text{juego máximo} = 6.522 - 6.453 = 0.069$$

$$\text{juego mínimo} = 6.5 - 6.475 = 0.025$$

Sustituyendo valores en las ecuaciones (32), (33), para la dimensión nominal 5.

$$\text{juego máximo} = 5.018 - 4.962 = 0.056$$

$$\text{juego mínimo} = 5 - 4.98 = 0.02$$

El juego máximo para la dimensión nominal de 6.5 se logra en un intervalo de tolerancia de 0.069 mm, el juego mínimo para esta misma dimensión está dentro de un intervalo de tolerancia de 0.025 mm. Pero en general si se respetan los intervalos de tolerancia anteriores se podrá tener un juego mediano. Para el análisis de la dimensión nominal de 5 mm el procedimiento es semejante al de la dimensión nominal 6.5 mm.

### 3.4 Análisis grados de libertad

Es importante calcular los grados de libertad en un mecanismo, ya que con estos sabremos el número de entradas requeridas para que este funcione correctamente.

#### 3.4.1 Cálculo de grados de libertad primer Mecanismo cuatro barras

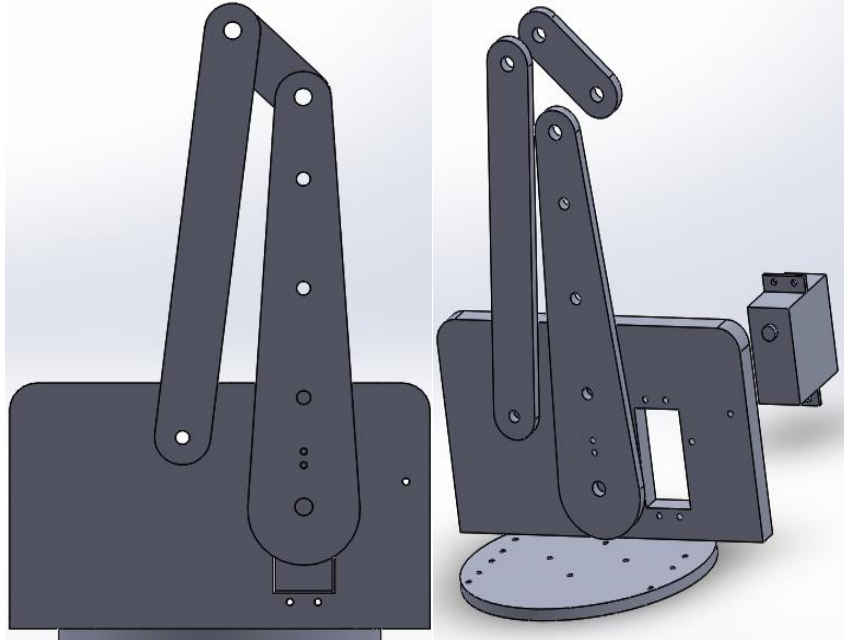


Figura 36. Primer Mecanismo de cuatro barras.

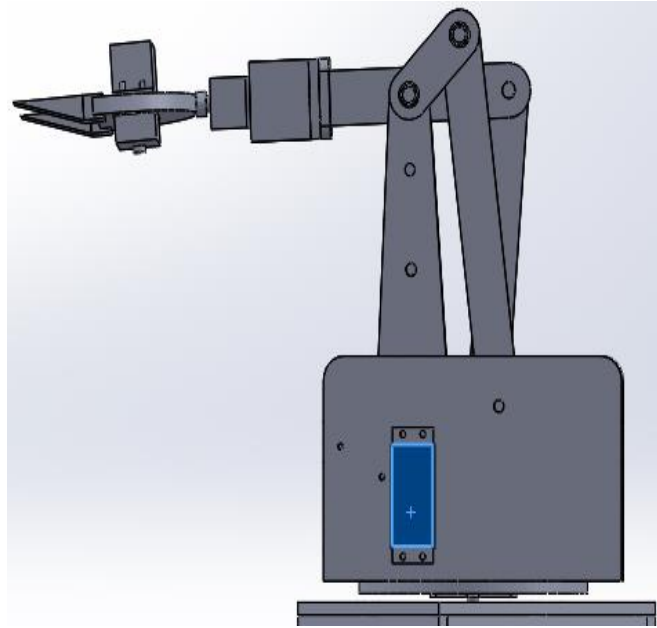
La movilidad del primer mecanismo (Figura 36) se obtiene con la ecuación de Grubler:

$$\text{grados de libertad} = 3(n - 1) - 2j_1 \quad (32)$$

Este mecanismo tiene 4 eslabones  $n = 4$  y 4 juntas de revoluta  $j_1 = 4$ , sustituyendo los valores anteriores en la ecuación de Grubler.

$$\text{grados de libertad} = 3(4 - 1) - 2(4) = 9 - 8 = 1$$

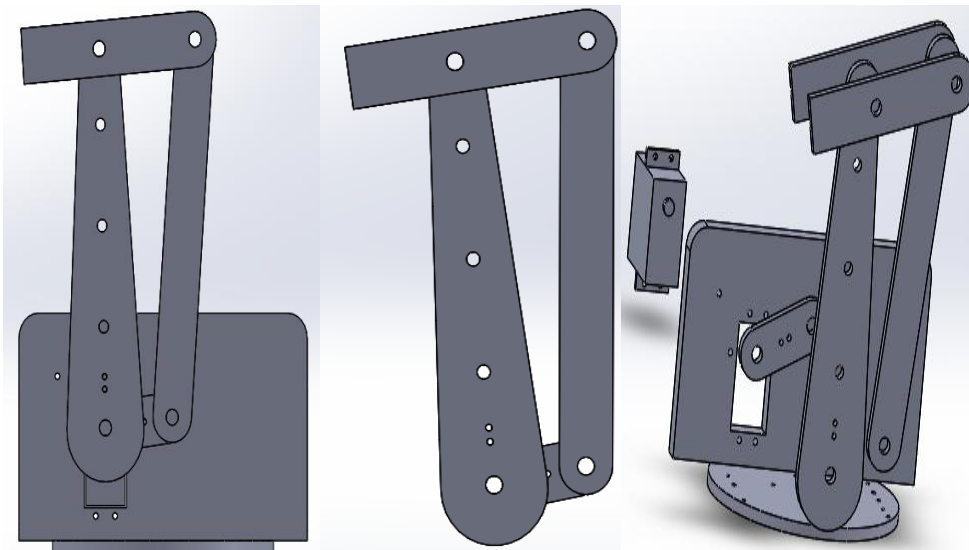
Este resultado significa que el mecanismo tiene sólo un grado de libertad y por lo tanto solo basta una entrada de movimiento para que el mecanismo funcione figura 39.



**Figura 37. Entrada primer mecanismo.**

En efecto, en la simulación con el software SolidWorks (Figura 37) se puede comprobar que solo es necesaria una entrada (motor) para mover el mecanismo uno.

### 3.4.2 Cálculo de grados de libertad segundo Mecanismo cuatro barras



**Figura 38. Segundo mecanismo de cuatro barras.**

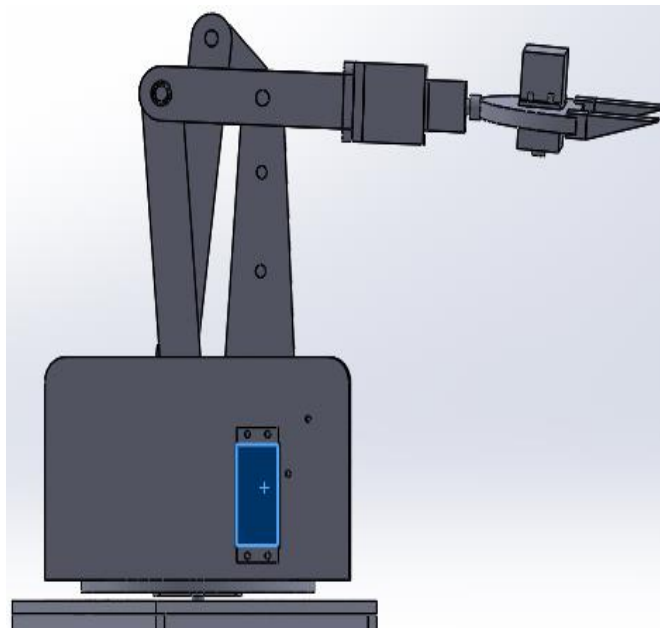
La movilidad del segundo mecanismo (Figura 38) se obtiene de igual manera que el mecanismo uno, con la ecuación de Grubler. El mecanismo dos tiene 4



eslabones  $n = 4$  y 4 juntas de revoluta  $j_1 = 4$ , sustituyendo los valores anteriores en la ecuación de Grubler.

$$\text{grados de libertad} = 3(4 - 1) - 2(4) = 9 - 8 = 1$$

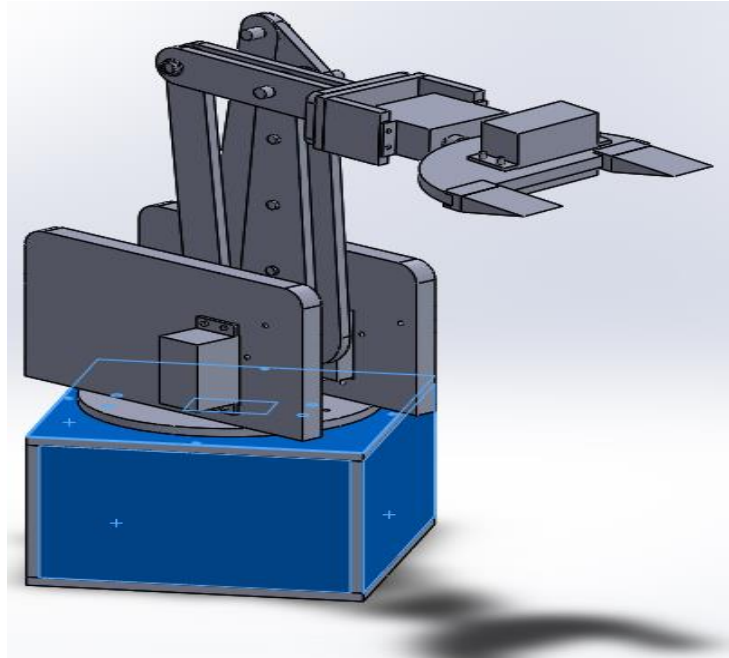
El mecanismo dos tiene un grado de libertad y por lo tanto sólo basta una entrada de movimiento para que el mecanismo funcione. Se comprobó con el software SolidWorks que sólo es necesaria una entrada para que pueda trabajar el mecanismo dos (Figura 39).



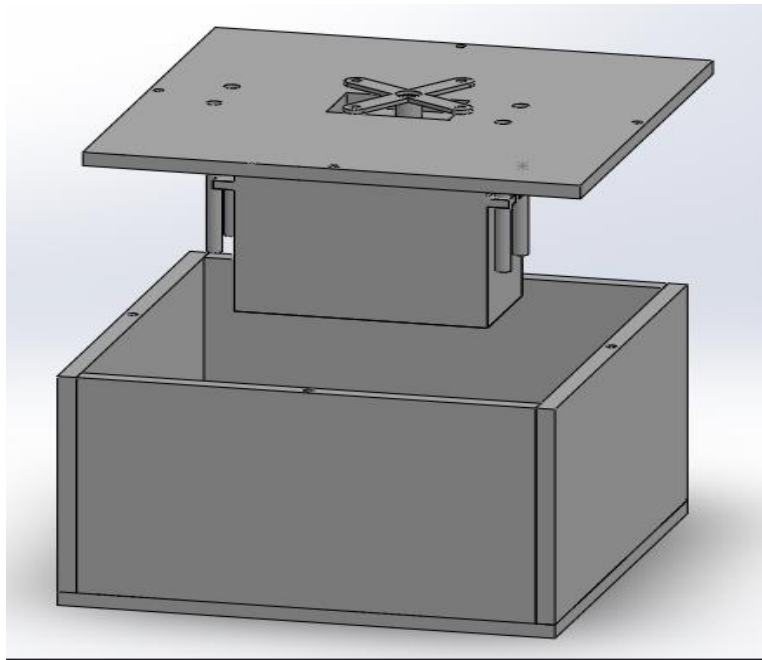
**Figura 39. Entrada segundo mecanismo.**

### **3.4.3 Base brazo de robot**

En la Figura 40 se puede observar una base con forma de cubo. Esta base servirá como contrapeso y fijación del motor con torque de 32 kg/cm (Figura 41).



**Figura 40. Base del Brazo de robot.**



**Figura 41. Base que servirá como contrapeso y fijación del motor.**

Las dimensiones de la base son de 130x80x130, está será la encargada de cargar todo el brazo de robot.

### 3.6 Pinzas del brazo de robot

En la Figura 42 se observa las pinzas que servirá para sujetar distintos objetos. Podrá tomar objetos con un espesor máximo de 5.3 cm y tiene un giro de 180 grados.

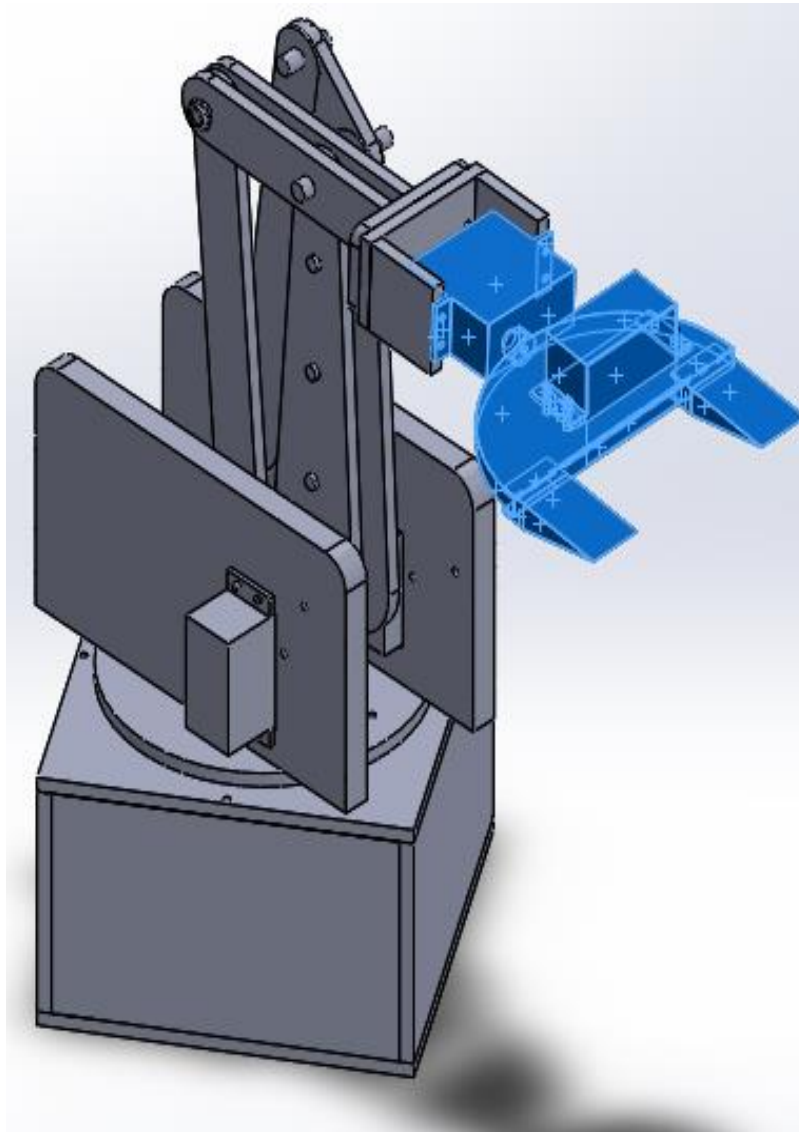
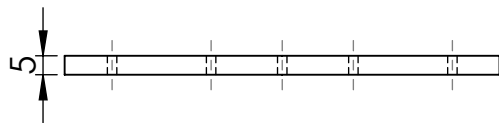
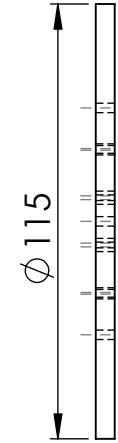
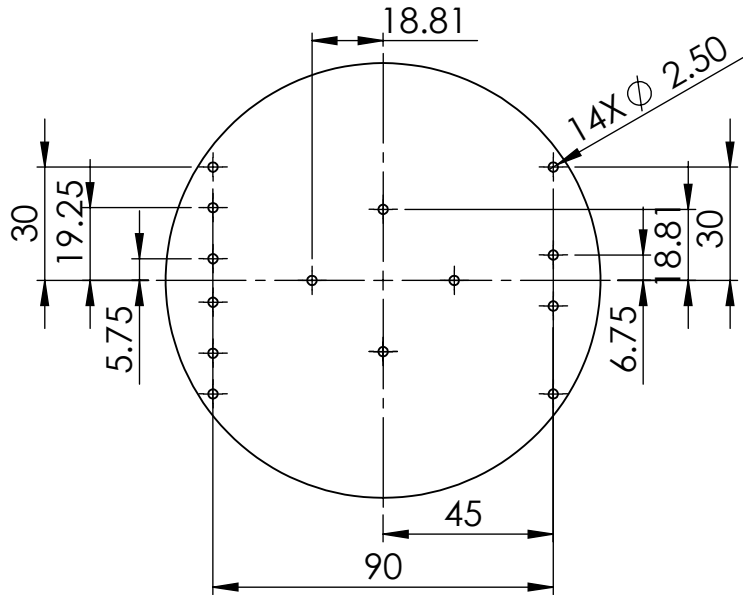


Figura 42. Pinzas del robot.

### **3.7 Dibujos técnicos**

El dibujo técnico es el lenguaje gráfico que se utiliza para comunicar, en el marco de actividades industriales y de diseño, desde las ideas más globales hasta los detalles vinculados con un contenido tecnológico. También se ha definido al concepto de dibujo técnico como el sistema de representación gráfica de objetos ya existentes o bien de prototipos, atendiendo a normas y convenciones preestablecidas por instituciones reguladoras. Eso permite describir de forma precisa y con claridad las dimensiones, formas y características de esos objetos.



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

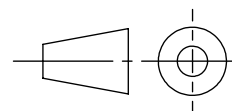
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	9 de Octubre 2015

TÍTULO:

Base Circular

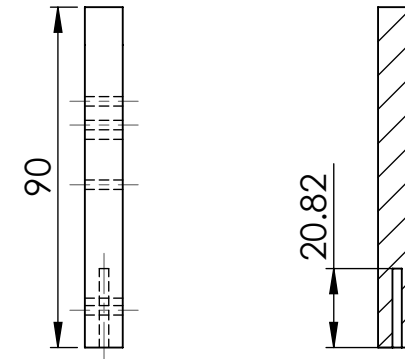
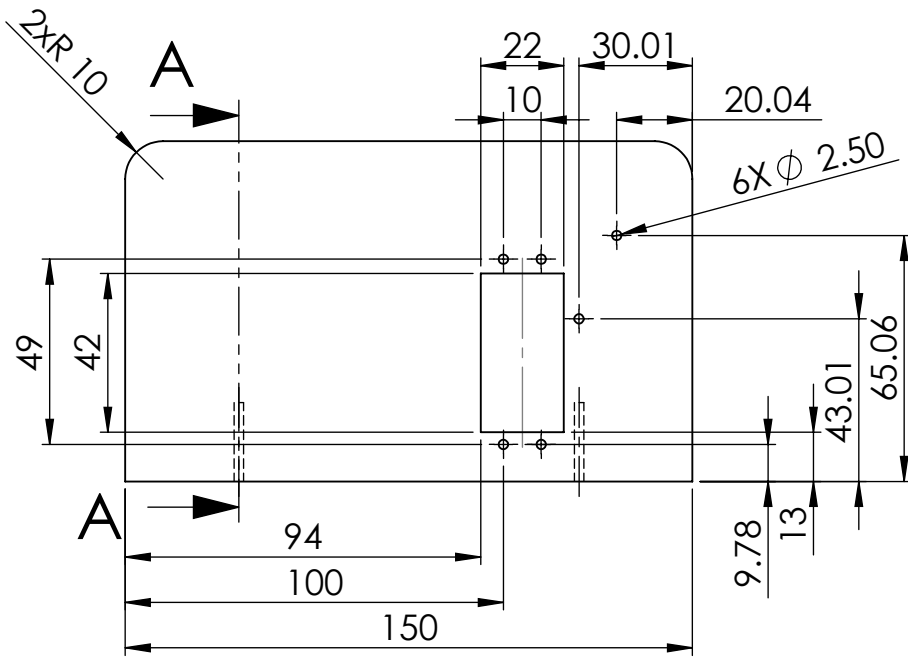
N.º DE DIBUJO

pieza 1

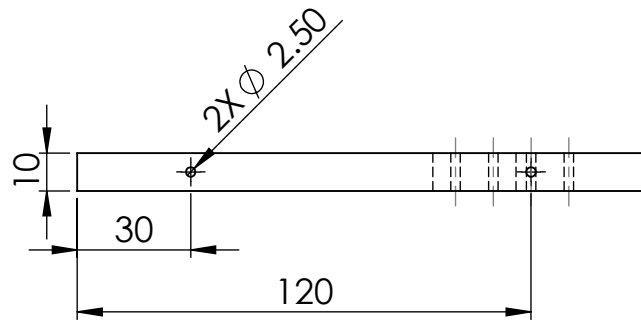


ESCALA: 1:2

HOJA 1 DE 20



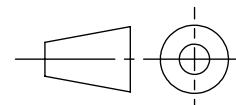
**SECCIÓN A-A**  
ESCALA 1 : 2



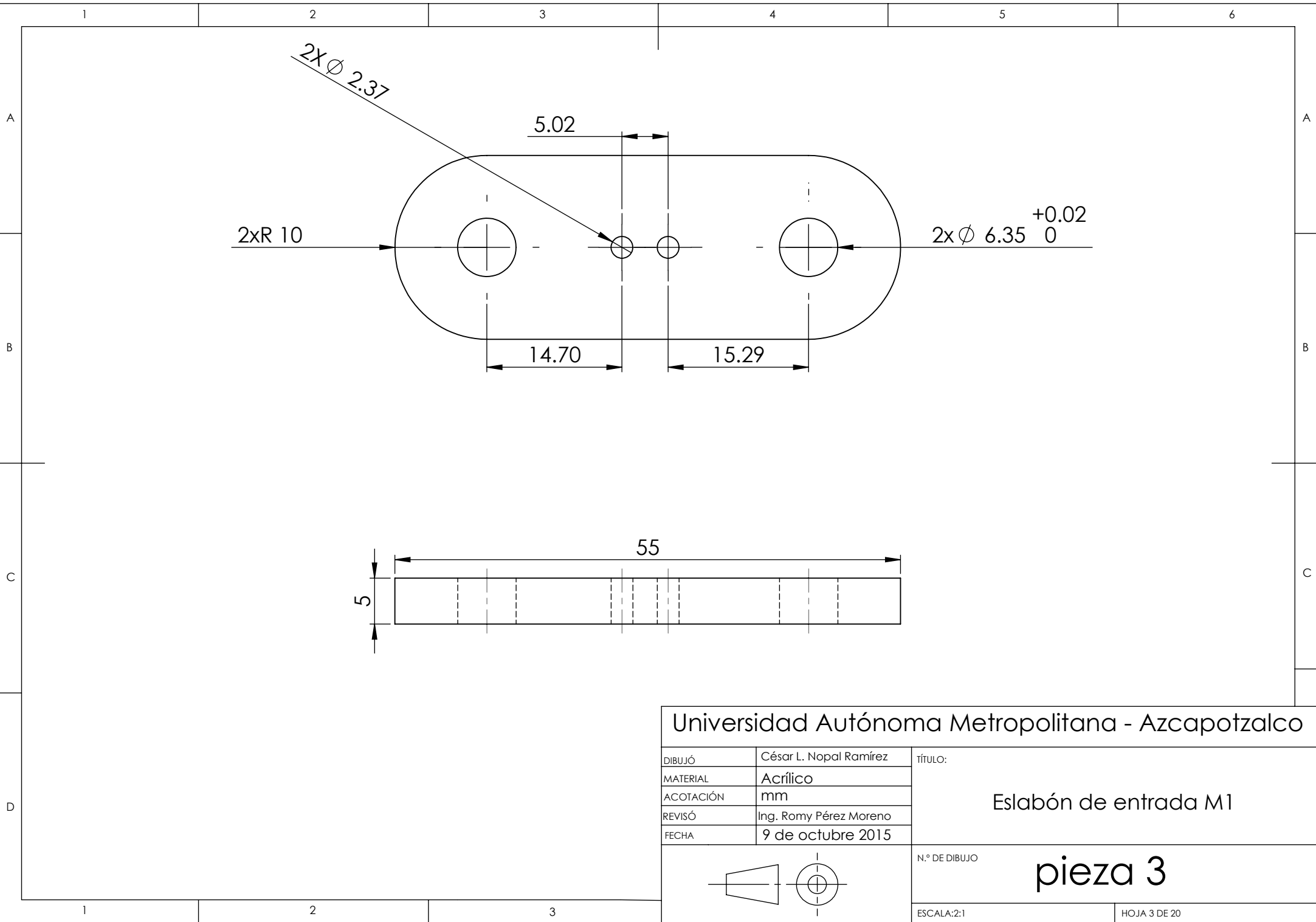
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	9 de Octubre 2015

TÍTULO:  
**Pared Izquierda**



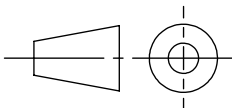
N.º DE DIBUJO  
**pieza 2**



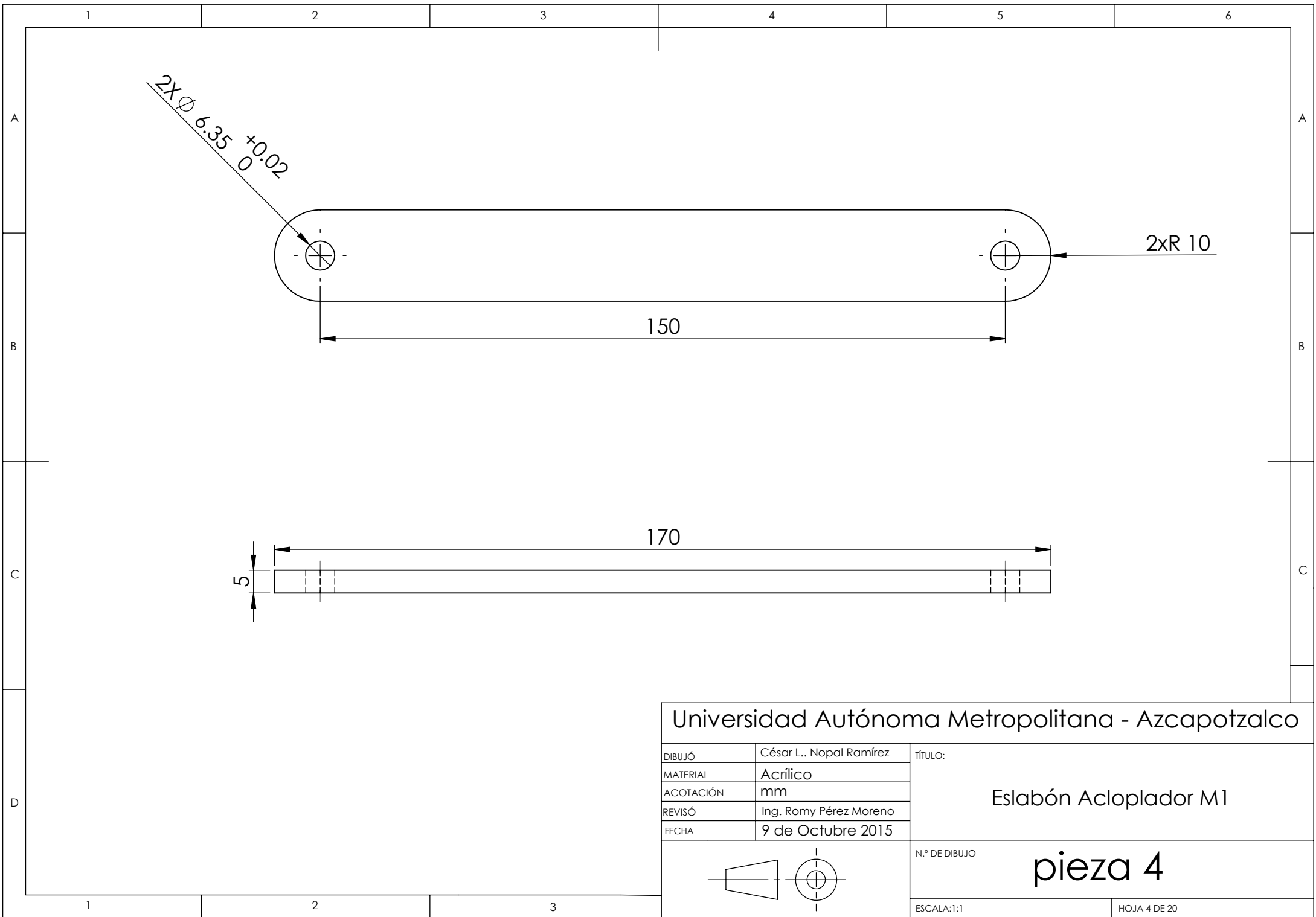
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	9 de octubre 2015

TÍTULO:	Eslabón de entrada M1
N.º DE DIBUJO	



pieza 3



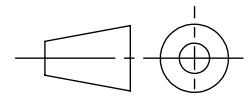
2XØ 6.35  $\begin{matrix} +0.02 \\ 0 \end{matrix}$

2xR 10

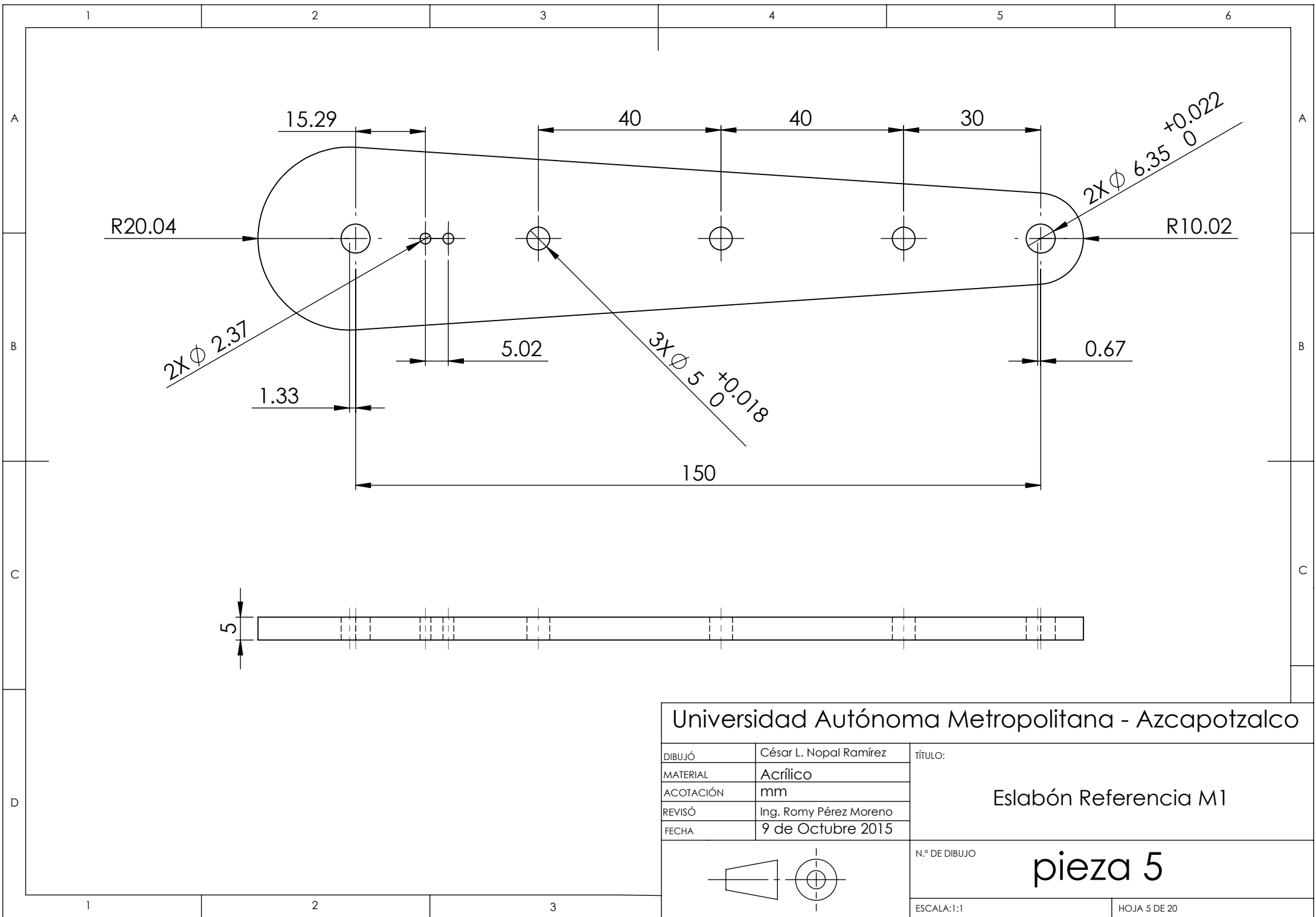
150

170

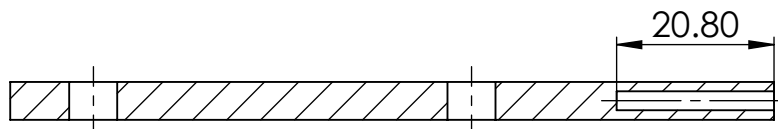
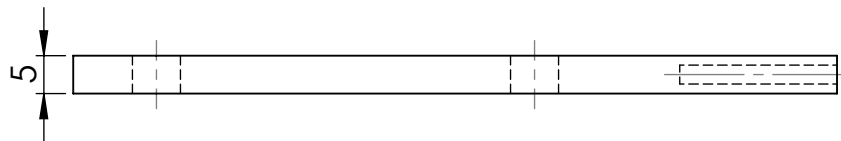
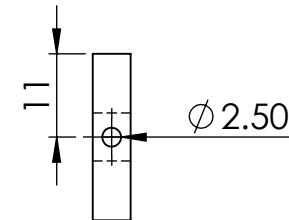
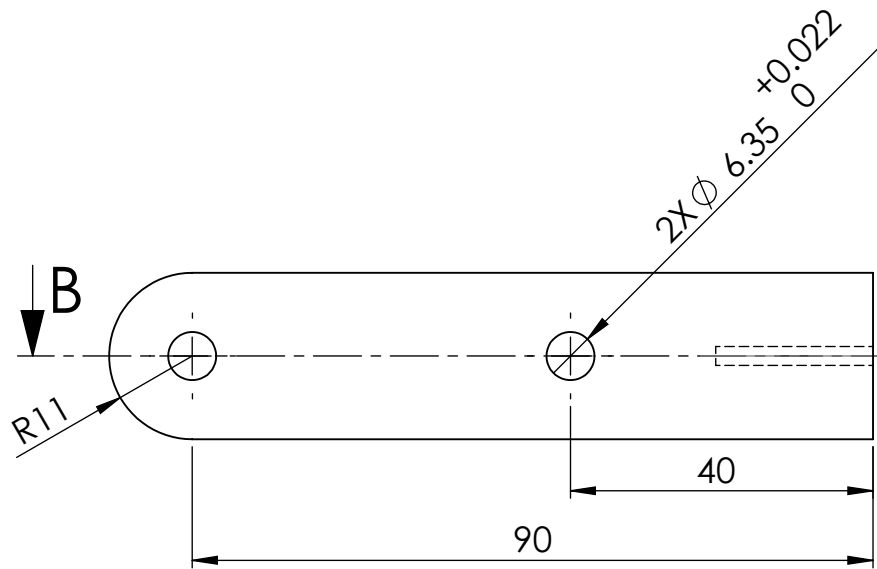
5

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L.. Nopal Ramírez	TÍTULO:  Eslabón Acloplador M1
MATERIAL	Acrílico	
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	
FECHA	9 de Octubre 2015	
		N.º DE DIBUJO <b>pieza 4</b>
		ESCALA: 1:1
		HOJA 4 DE 20





Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:  Eslabón Referencia M1
MATERIAL	Acrílico	
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	
FECHA	9 de Octubre 2015	
		N.º DE DIBUJO
		<b>pieza 5</b>
		ESCALA: 1:1
		HOJA 5 DE 20



SECCIÓN B-B

Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

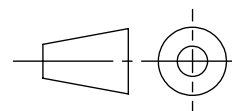
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	9 de Octubre 2015

TÍTULO:

Eslabón Salida 1 M1

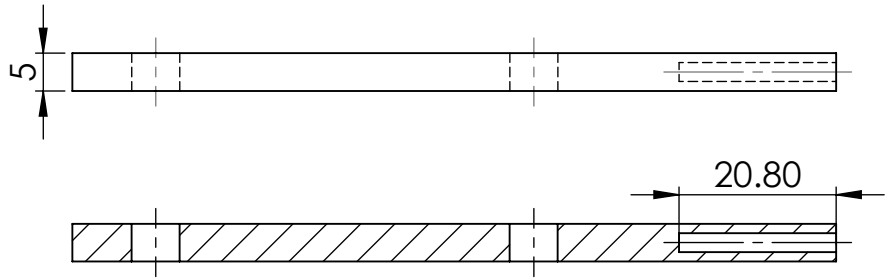
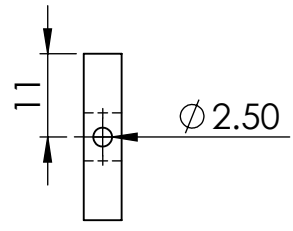
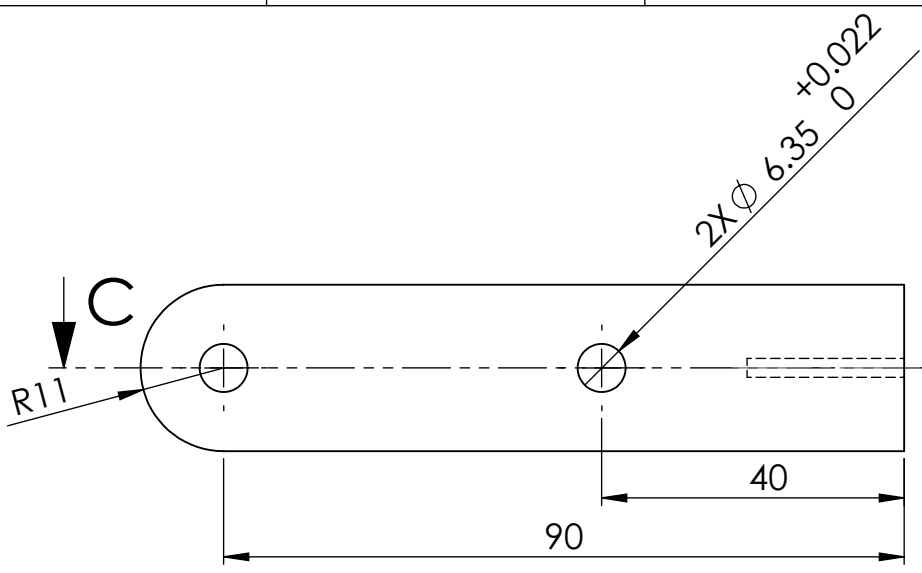
N.º DE DIBUJO

pieza 6



ESCALA: 1:1

HOJA 6 DE 20

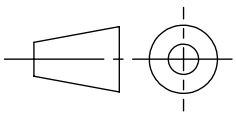


SECCIÓN C-C

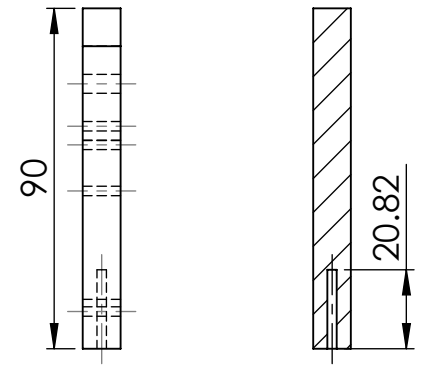
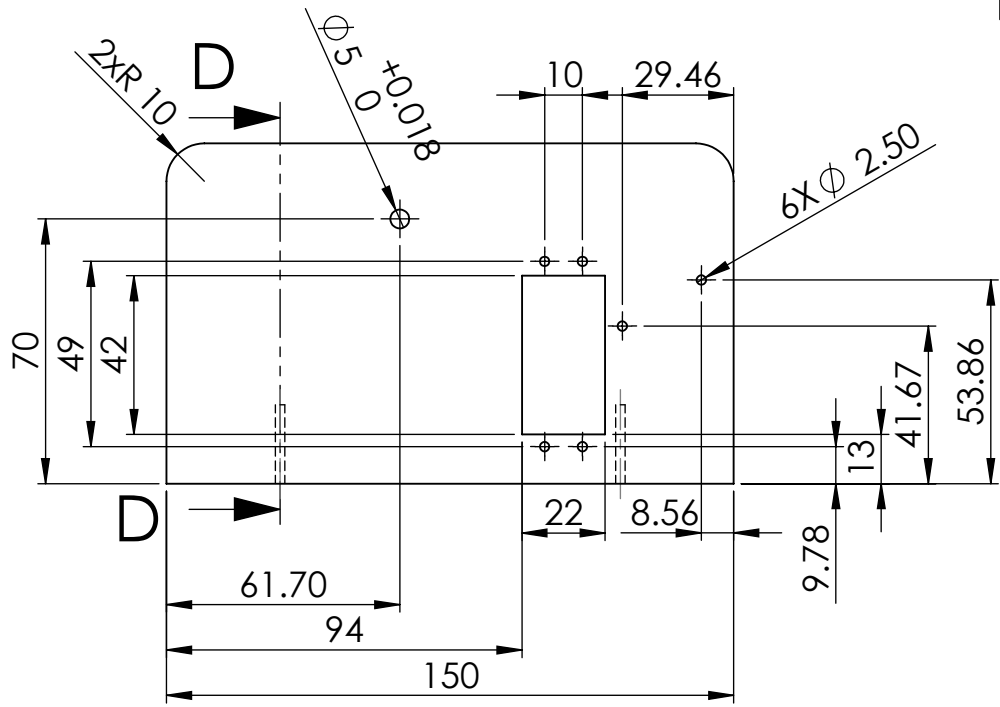
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	9 de Octubre 2015

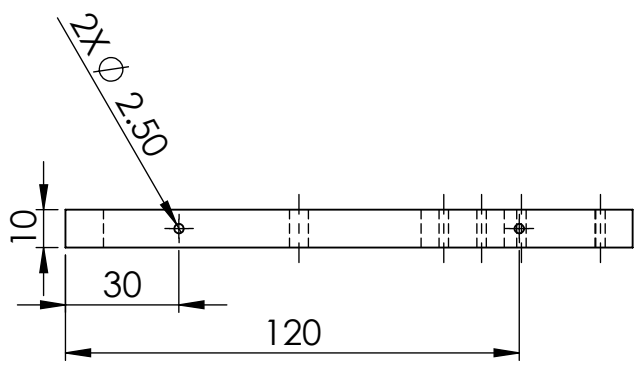
TÍTULO:  
Eslabón Salida 2 M1



N.º DE DIBUJO  
**pieza 7**



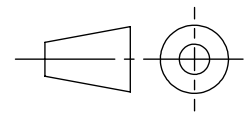
**SECCIÓN D-D**  
ESCALA 1 : 2



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	10 de Octubre 2015

TÍTULO:  
**Pared Derecha**



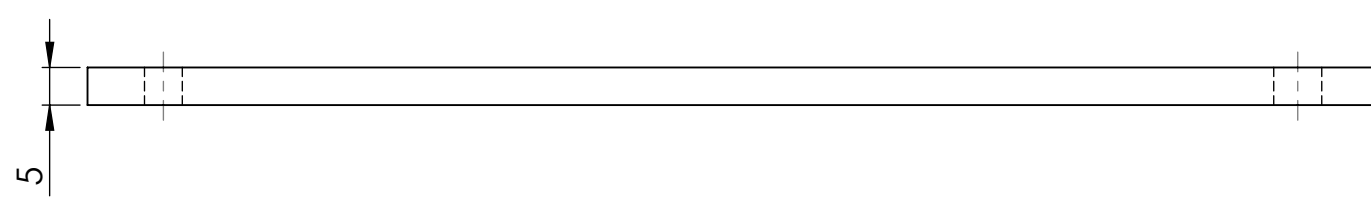
N.º DE DIBUJO  
**pieza 8**

$\varnothing 5 \begin{smallmatrix} +0.018 \\ 0 \end{smallmatrix}$

$\varnothing 6.35 \begin{smallmatrix} +0.022 \\ 0 \end{smallmatrix}$

2xR 10

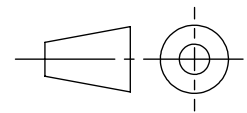
150



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	10 de Octubre 2015

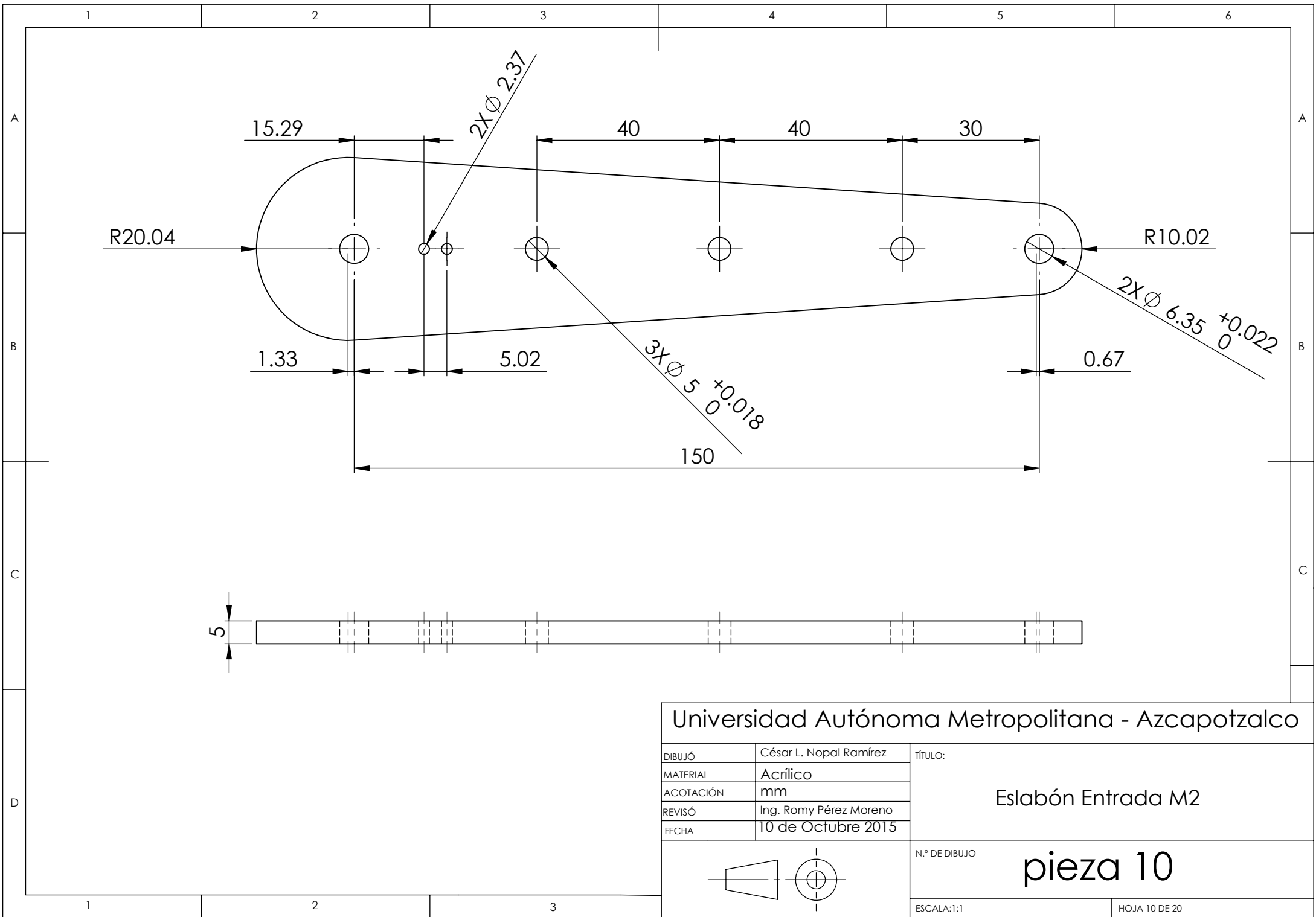
TÍTULO:  
**Eslabón Salida M2**



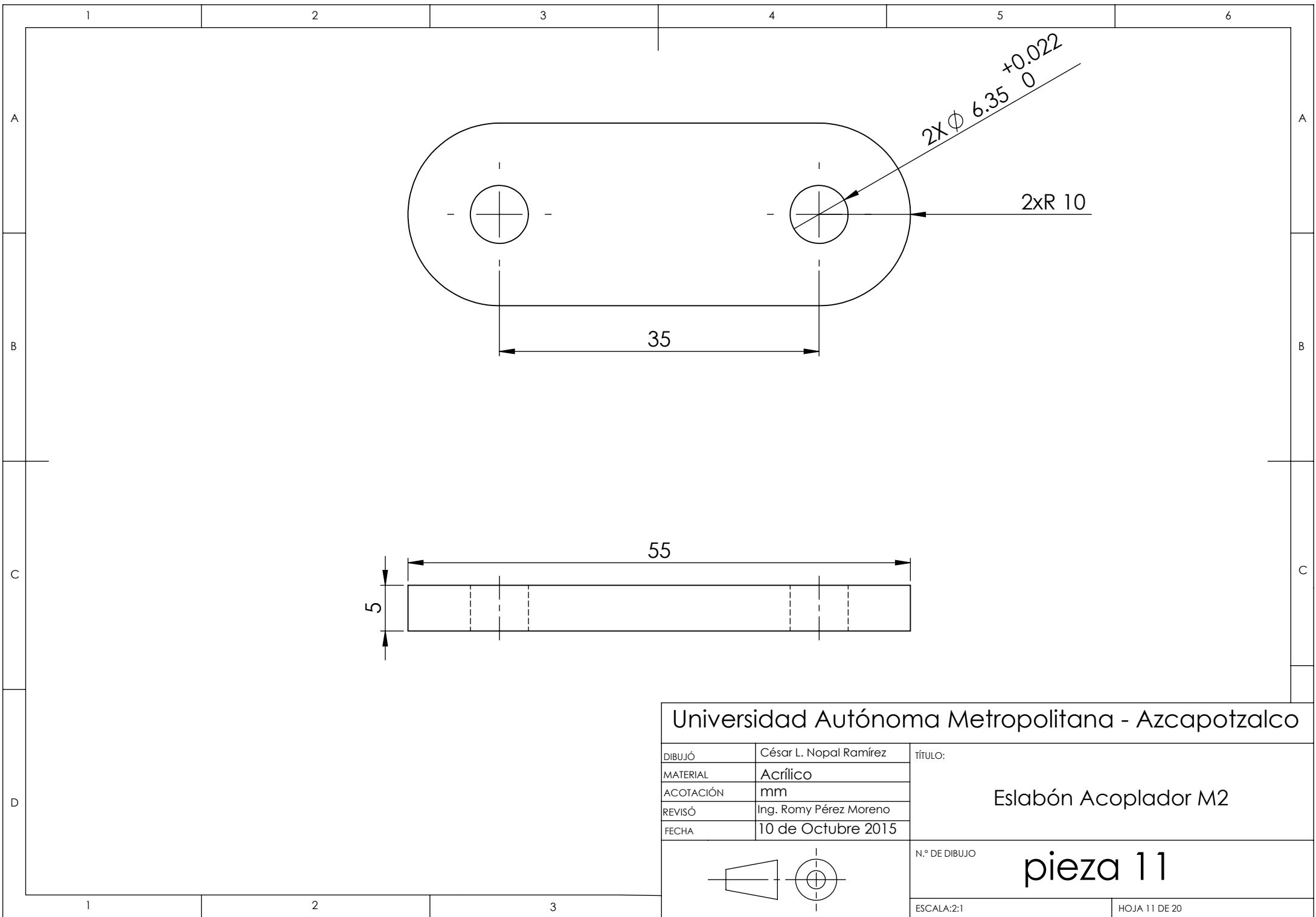
N.º DE DIBUJO  
**pieza 9**

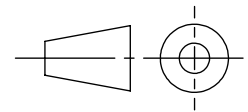
ESCALA: 1:1

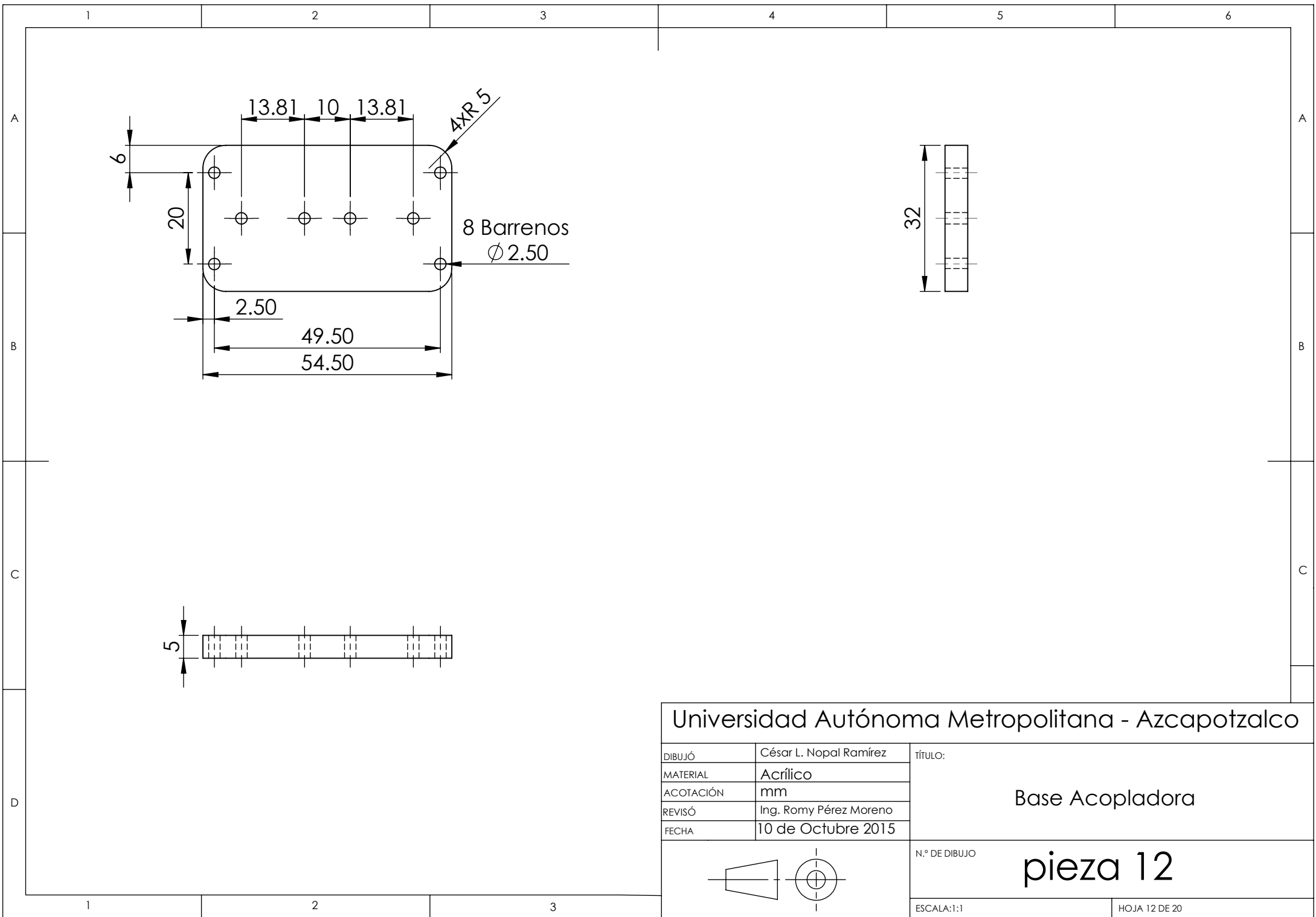
HOJA 9 DE 20



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:  Eslabón Entrada M2
MATERIAL	Acrílico	
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	
FECHA	10 de Octubre 2015	
		N.º DE DIBUJO <b>pieza 10</b>
		ESCALA: 1:1
		HOJA 10 DE 20

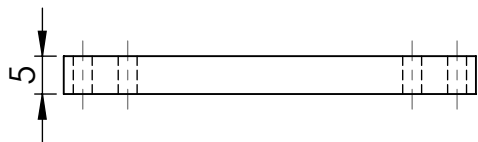
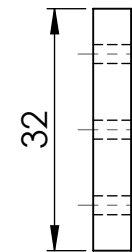
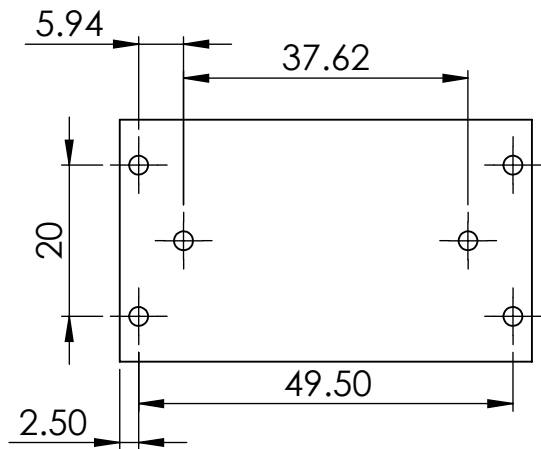


Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:  <b>Eslabón Acoplador M2</b>  N.º DE DIBUJO <span style="font-size: 1.5em;"><b>pieza 11</b></span>
MATERIAL	Acrílico	
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	
FECHA	10 de Octubre 2015	
		ESCALA: 2:1 <span style="float: right;">HOJA 11 DE 20</span>



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:
MATERIAL	Acrílico	Base Acopladora
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	
FECHA	10 de Octubre 2015	
		N.º DE DIBUJO
		pieza 12
		ESCALA: 1:1
		HOJA 12 DE 20

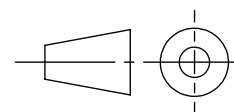


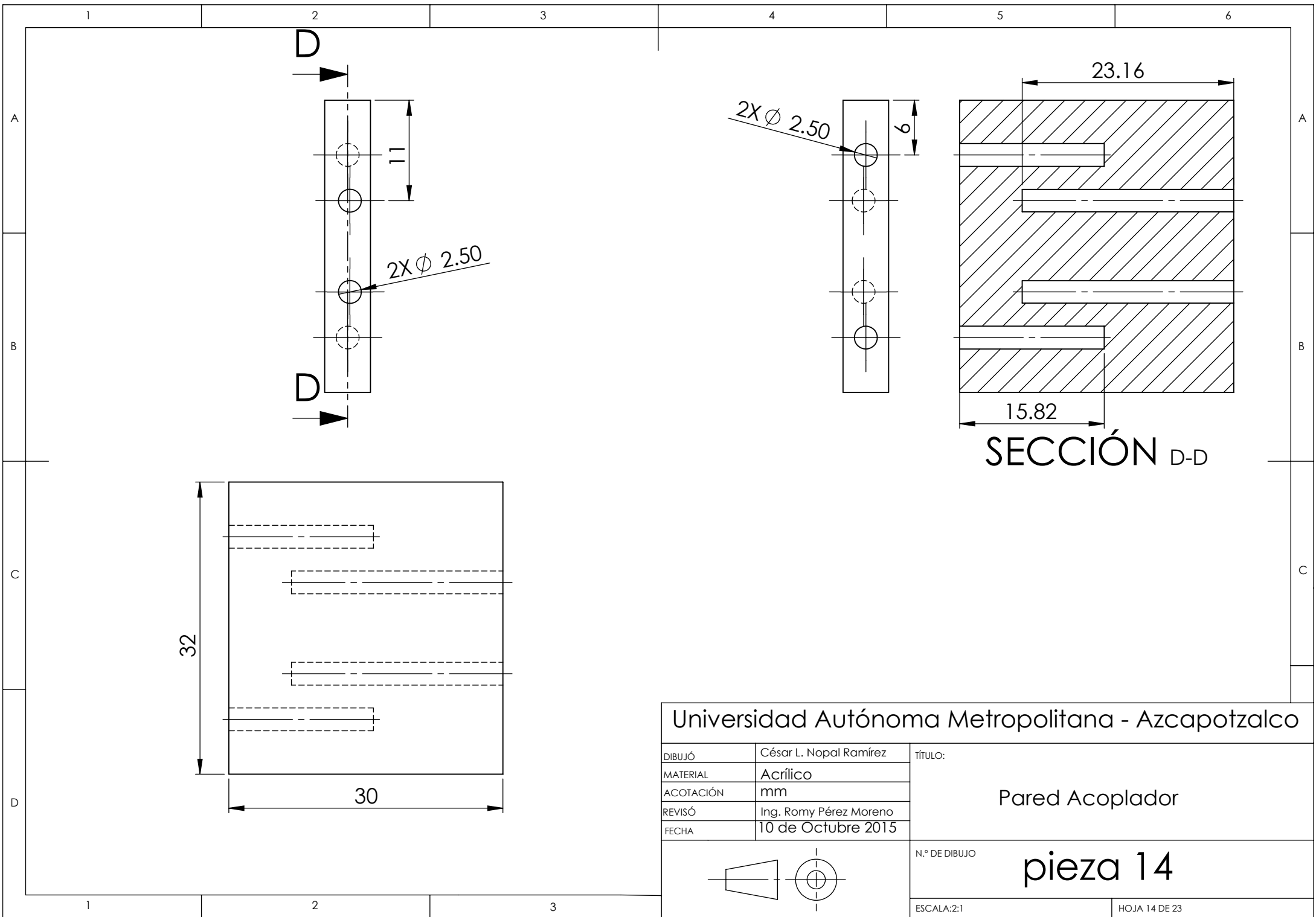


Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

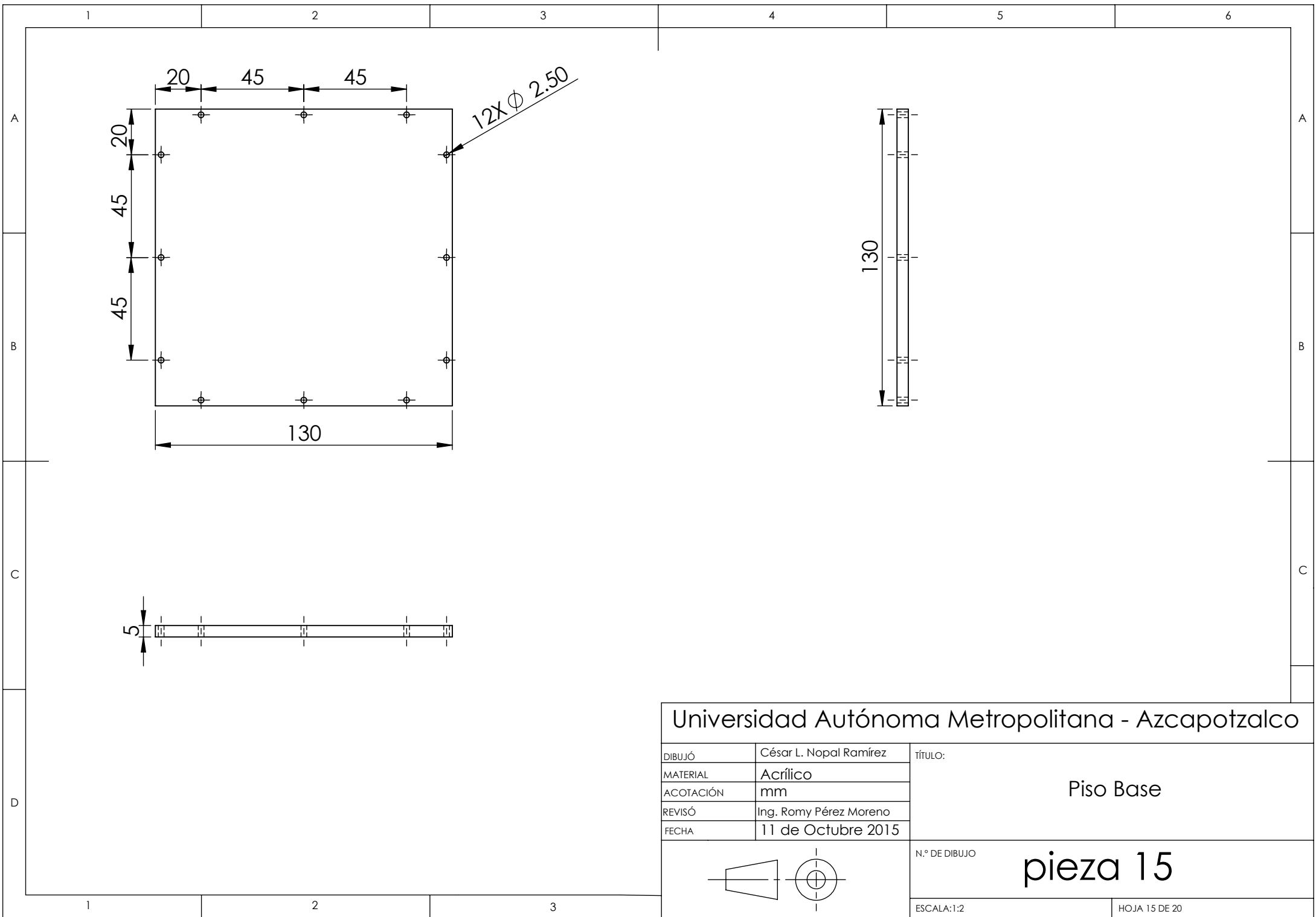
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	10 de Octubre 2015

TÍTULO:	Base Mano	
N.º DE DIBUJO		
pieza 13		
		ESCALA: 1:2

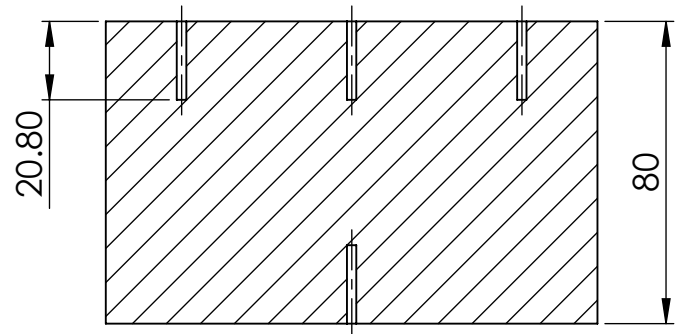
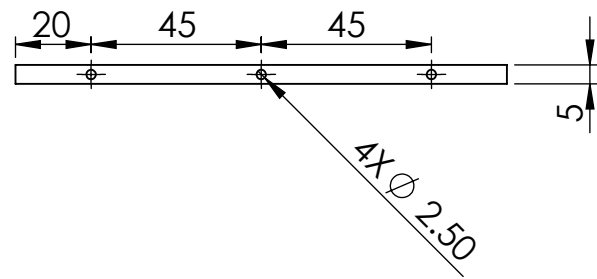
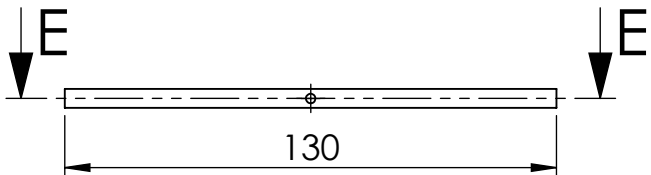




Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:
MATERIAL	Acrílico	Pared Acoplador
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	N.º DE DIBUJO
FECHA	10 de Octubre 2015	
		<b>pieza 14</b>
		ESCALA:2:1



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco		
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:  Piso Base
MATERIAL	Acrílico	
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno	
FECHA	11 de Octubre 2015	
		N.º DE DIBUJO <b>pieza 15</b>
		ESCALA: 1:2
		HOJA 15 DE 20

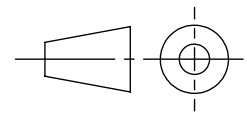


SECCIÓN E-E  
ESCALA 1 : 2

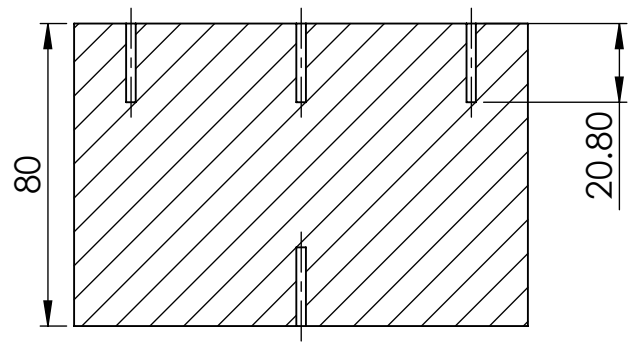
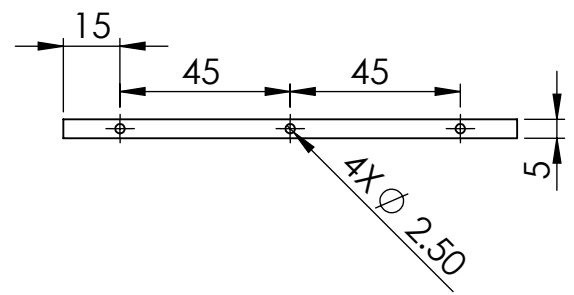
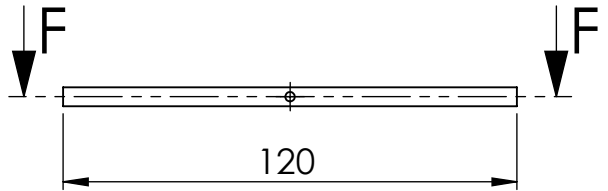
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	11 de Octubre 2015

TÍTULO:  
**Pared1Base**



N.º DE DIBUJO  
**pieza 16**

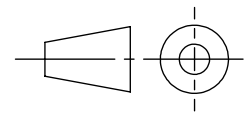


**SECCIÓN F-F**  
 ESCALA 1 : 2

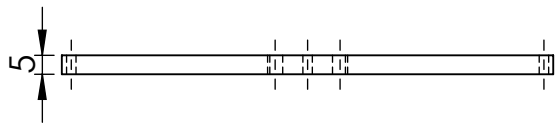
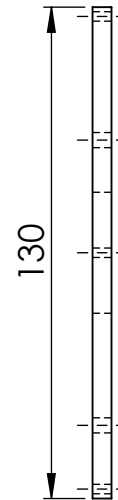
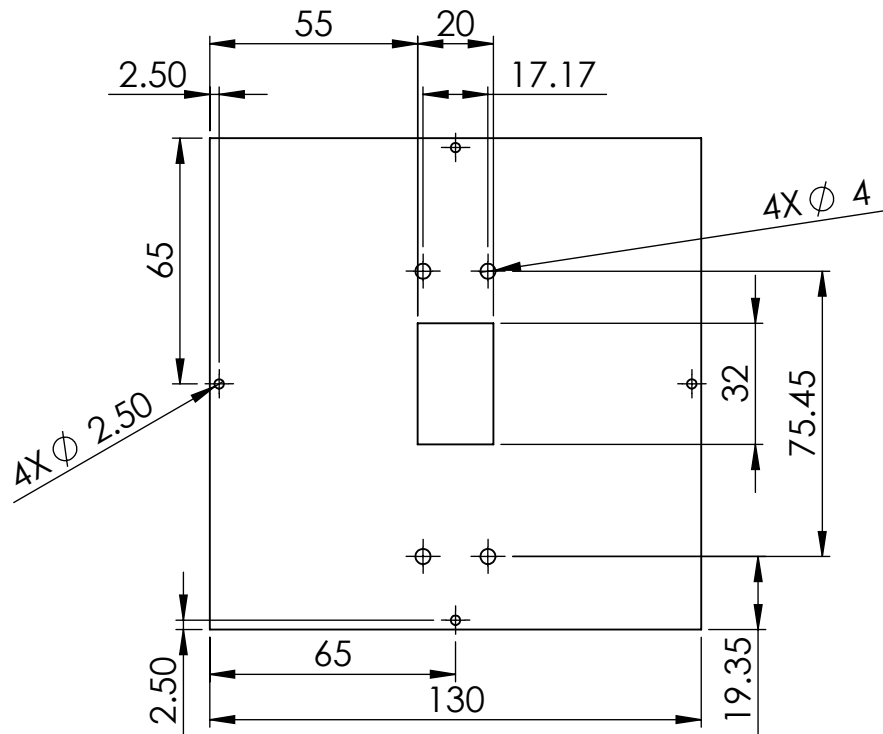
Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	11 de Octubre 2015

TÍTULO:  
**Pared 2 Base**



N.º DE DIBUJO  
**pieza 17**



Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco

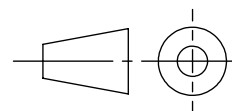
DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez
MATERIAL	Acrílico
ACOTACIÓN	mm
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno
FECHA	11 de Octubre 2015

TÍTULO:

Tapa Base

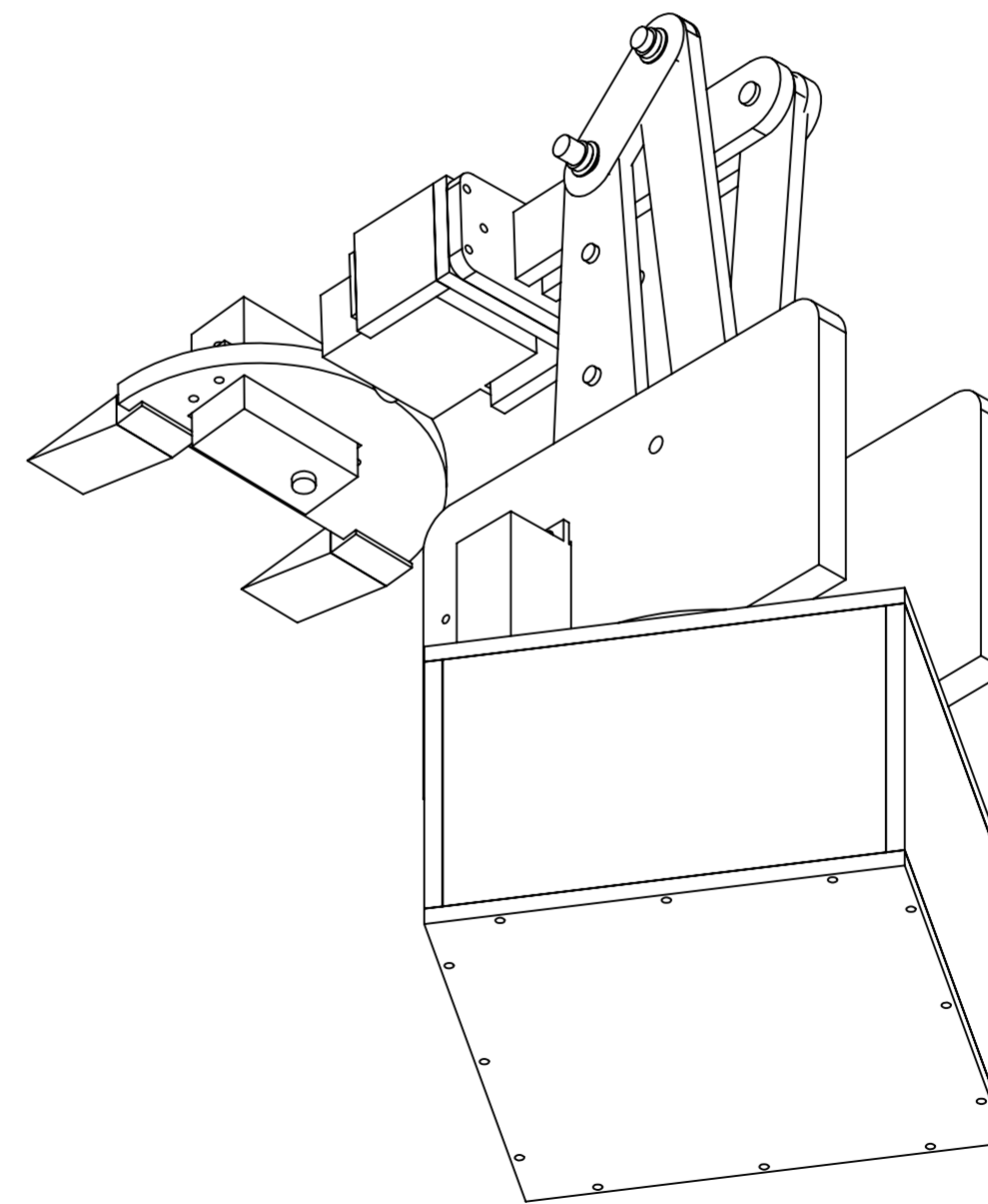
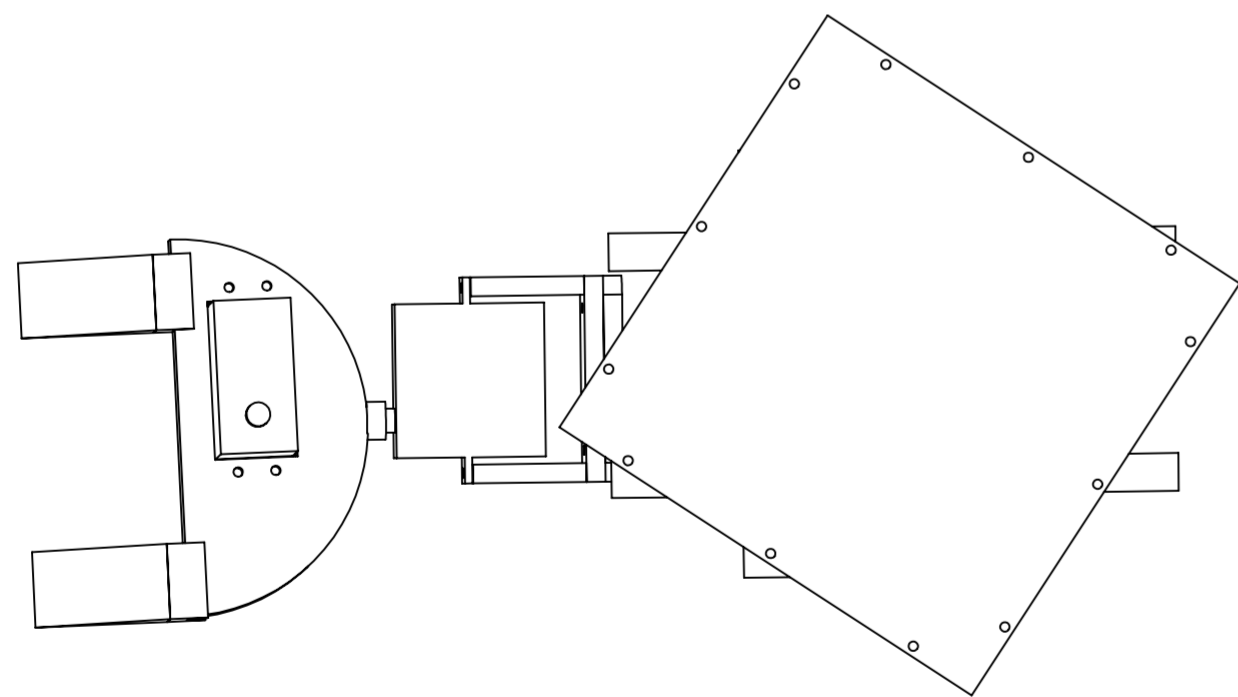
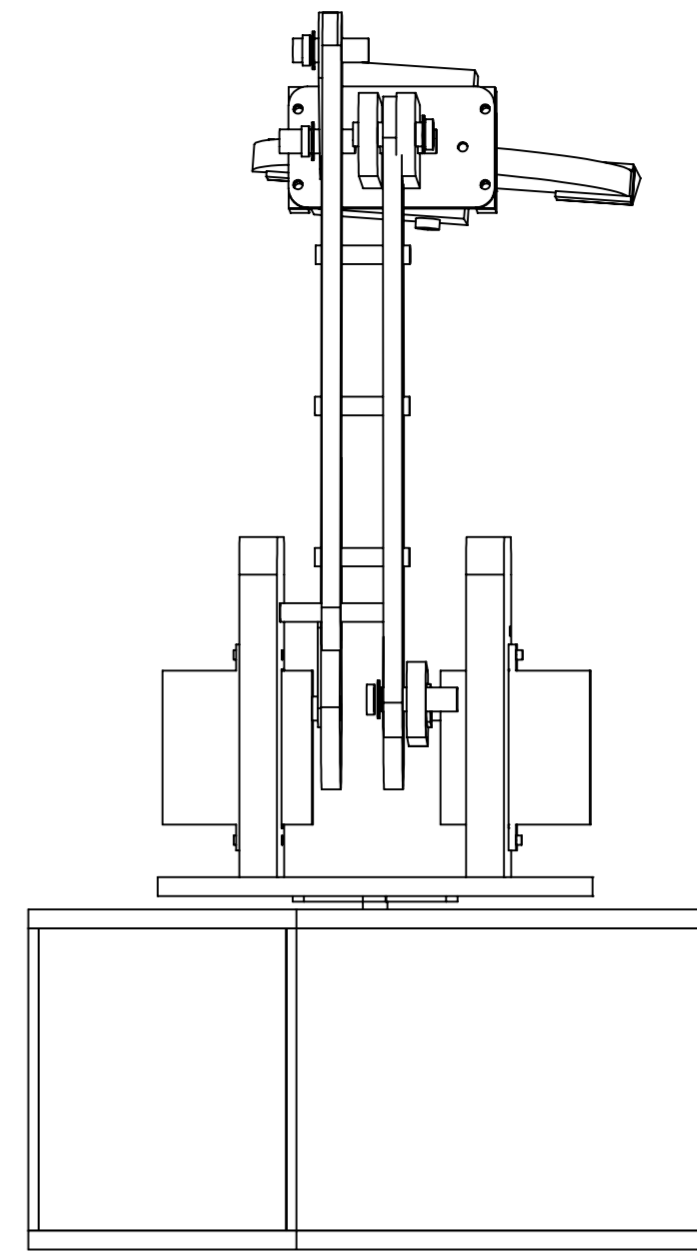
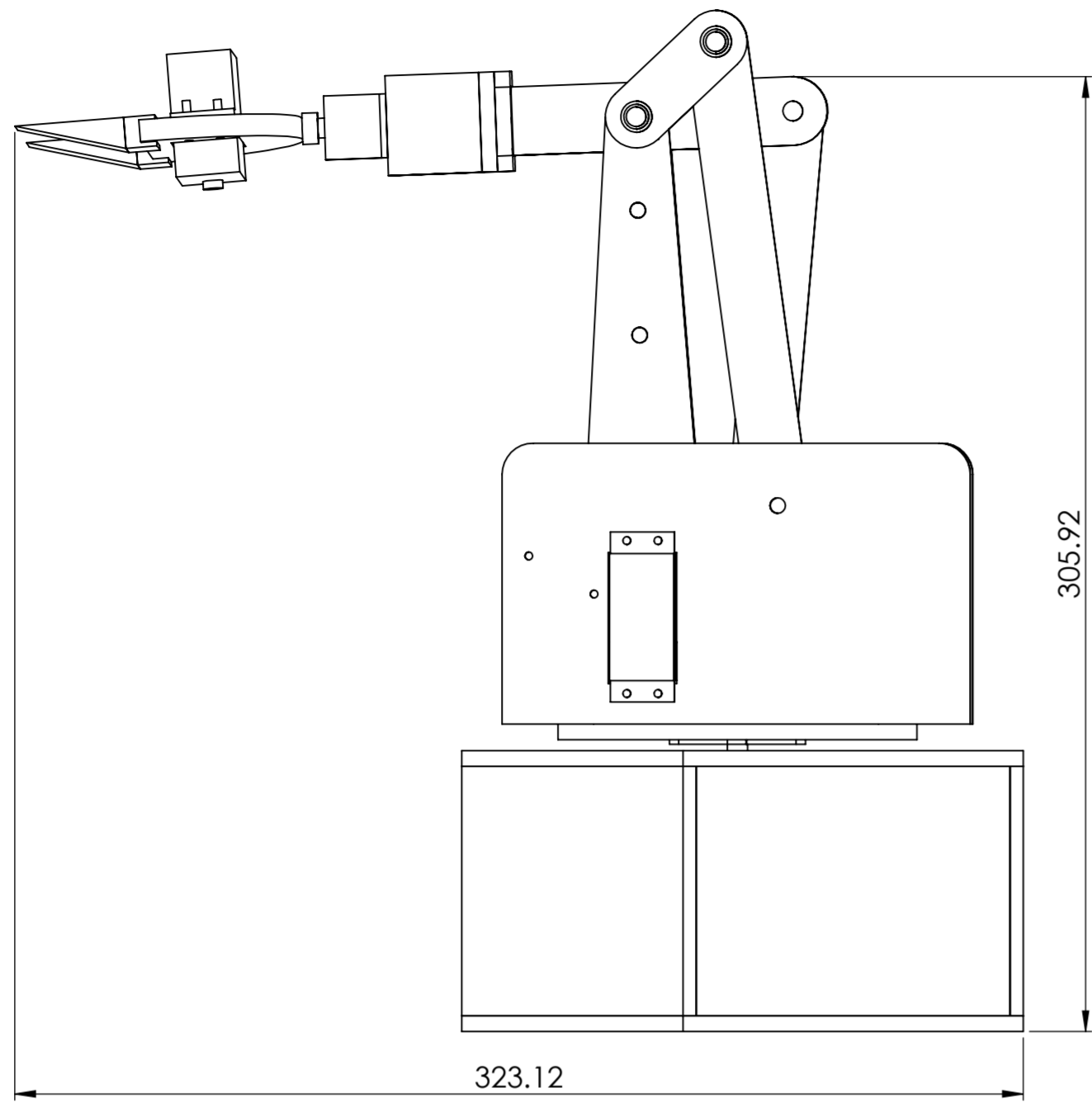
N.º DE DIBUJO

pieza 18

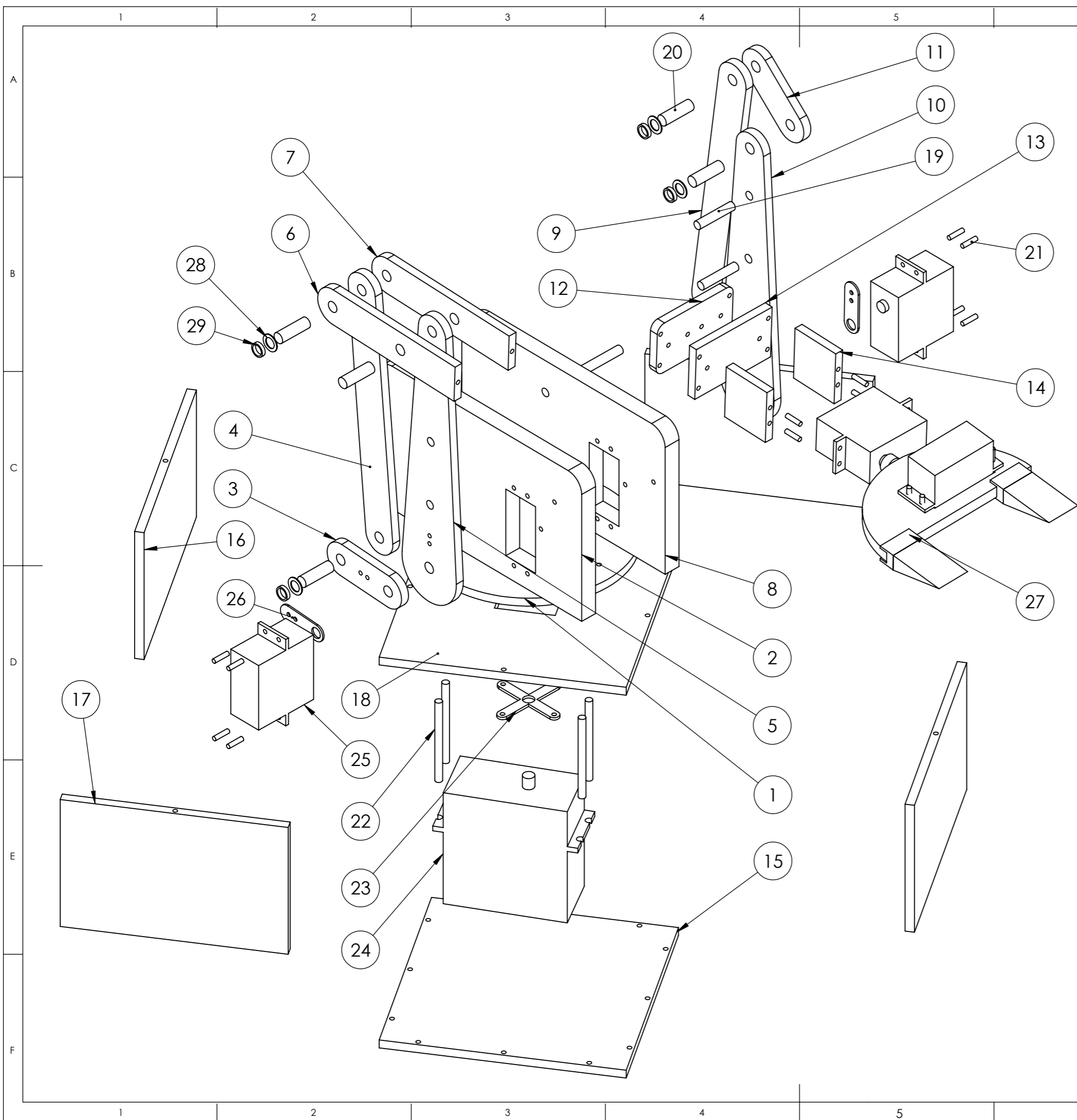


ESCALA: 1:2

HOJA 18 DE 20



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA -AZCAPOTZALCO		
DIBUÓ	César L. Nopal Ramírez	título:
MATERIAL	Acrílico	Brazo de Robot
ACOTACIÓN	mm	
REVISÓ	Ing. Rommy Pérez Moreno	
FECHA	18 de Octubre del 2015	
		N.º DE DIBUJO
		<b>19</b>
		ESCALA:1:2
		HOJA 19 de 20



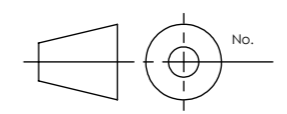
No.	Pieza	Cantidad	Hoja
1	Base Circular	1	1
2	Pared Izquierda	1	2
3	Eslabón de Entrada M1	1	3
4	Eslabón Acoplador M1	1	4
5	Eslabón Referencia M1	1	5
6	Eslabón Salida 1 M1	1	6
7	Eslabón Salida 2 M1	1	7
8	Pared Derecha	1	8
9	Eslabón salida M2	1	9
10	Eslabón Entrada M2	1	10
11	Eslabón Acoplador M2	1	11
12	Base Acopladora	1	12
13	Base Mano	1	13
14	Pared Acoplador	2	14
15	Piso Base	1	15
16	Pared 1 Base	2	16
17	Pared 2 Base	2	17
18	Tapa Base	1	18
19	Varilla de Acrílico 5mm	6	
20	Prisionero Allen 1/4" x 5/8"	4	
21	Tornillo Plano 1/8"	16	
22	Tornillo Plano 5/32"	4	
23	Acoplador Motor Grande	1	
24	Motor 32 kg/cm	1	
25	Motor HD 17 kg/cm	2	
26	Acoplador Motor HD	2	
27	Mano de Robot	1	
28	Arandela de Presión 1/4"	4	
29	Tuerca 1/4"	4	

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA - AZCAPOTZALCO**

DIBUJÓ	César L. Nopal Ramírez	TÍTULO:	<b>Explosionado Brazo de Robot</b>
MATERIAL	Acrílico		
ACOTACIÓN	mm.		
REVISÓ	Ing. Romy Pérez Moreno		
FECHA	18 de Octubre del 2015		

N.º DE DIBUJO 20

ESCALA: 1:10 HOJA 20 DE 20





### 3.8 Costos

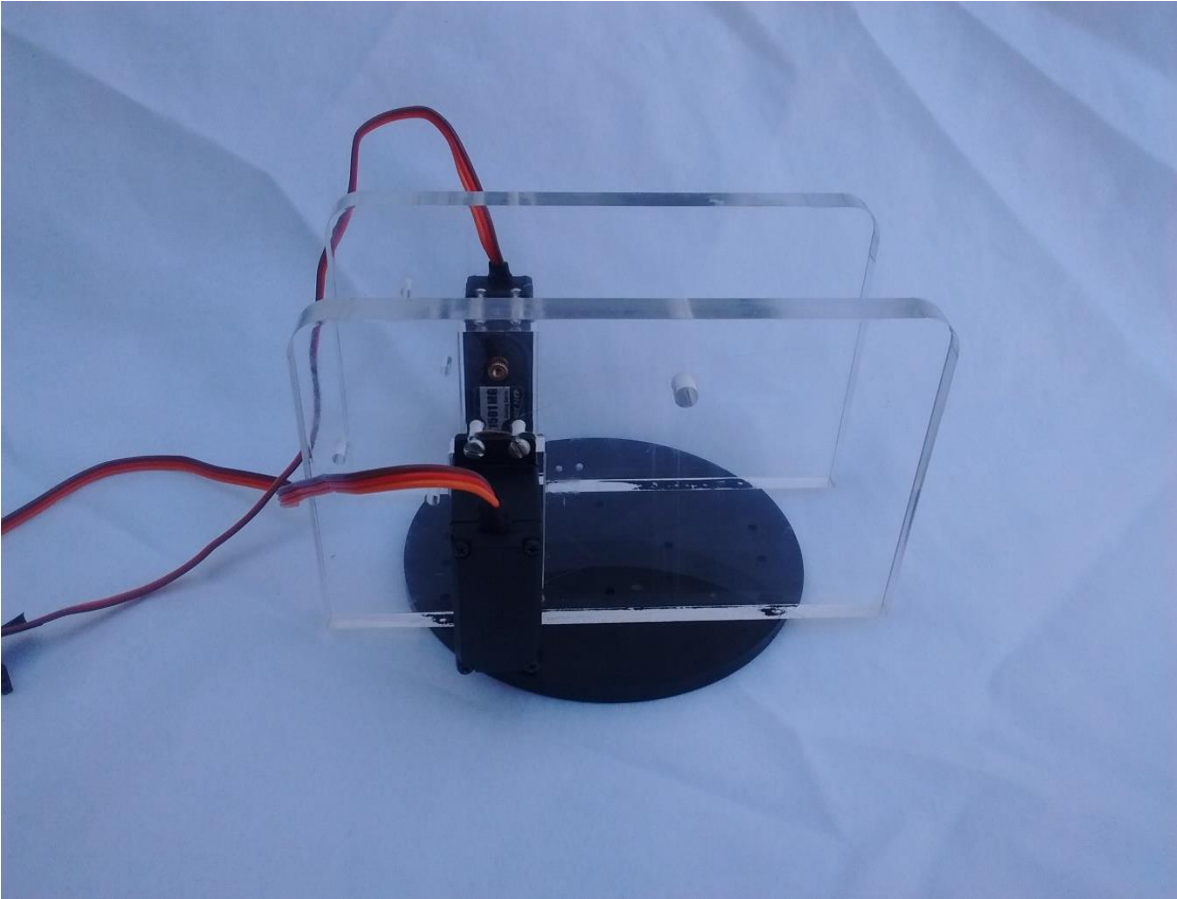
#### 3.8.1 Costos directos

**Tabla 6. Costos de Materiales que se usaron en prototipo de Brazo de Robot.**

No.	Cantidad	Material	Descripción	Precio unitario con IVA(16%)	Subtotal
1	5	Servomotor	Torque 17 kg/cm	\$ 630.20	\$ 3,151.00
2	1	Servomotor	Torque 32 kg/cm	\$ 1,044.00	\$ 1,044.00
3	3	Ruedas esféricas	Pololu	\$ 36.00	\$ 108.00
4	5	Tornillos hexagonales	1/8 "	\$ 45.00	\$ 225.00
5	40	Tornillos de cruz	1/16"	\$ 2.00	\$ 80.00
6	1	Pegamento para acrílico	0.25 litros	\$ 20.00	\$ 20.00
7	1	Varilla de acrílico	5 mm de diámetro	\$ 16.00	\$ 16.00
8	19	Piezas de acrílico	5 mm de espesor	\$ 23.10	\$ 438.90
9	2	Piezas de acrílico	10 mm de espesor	\$ 50.55	\$ 101.10
10	1	Lubricante	Anticorrosión	\$ 30.00	\$ 30.00
				Total	\$ 5,214.00

### 3.9 Fotografías

A continuación se muestran las fotografías de las piezas y el ensamble del brazo de robot.



Fotografía 1. Motores de 17 kg/cm ensamblados en las paredes derecha e izquierda.



**Fotografía 2. Eslabón de entrada segundo mecanismo.**



**Fotografía 3. Eslabón de referencia segundo mecanismo.**



**Fotografía 4. Eslabón de salida segundo mecanismo.**



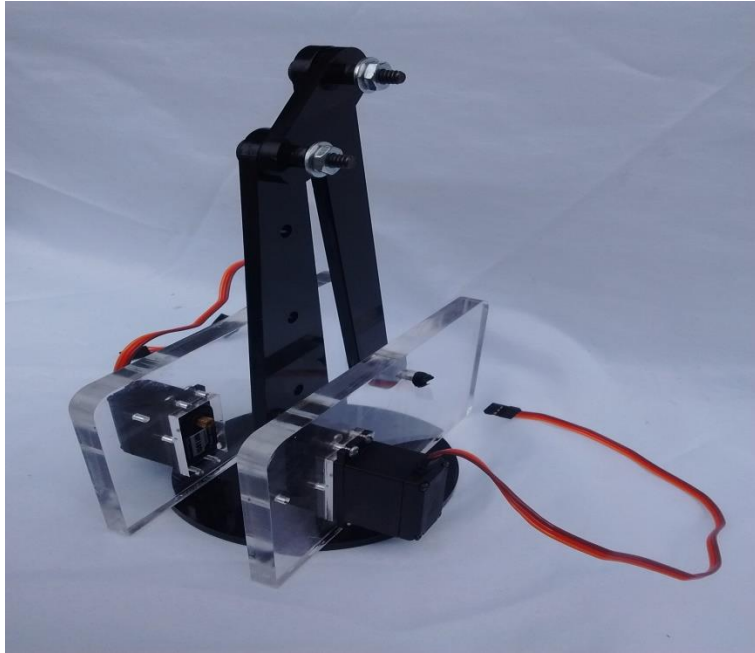
**Fotografía 5. Eslabonamiento del segundo mecanismo (referencia, salida, acoplador y salida, iniciando en el eslabón de referencia en el sentido de las manecillas del reloj).**



**Fotografía 6. Eslabón de entrada primer mecanismo.**



**Fotografía 7. Eslabón acoplador primer mecanismo.**



**Fotografía 8. Eslabonamiento primer mecanismo.**



**Fotografía 9. Unión de los dos mecanismos.**



**Fotografía 10. Base acopladora de actuadores.**



**Fotografía 11. Base acopladora de pinzas de robot.**

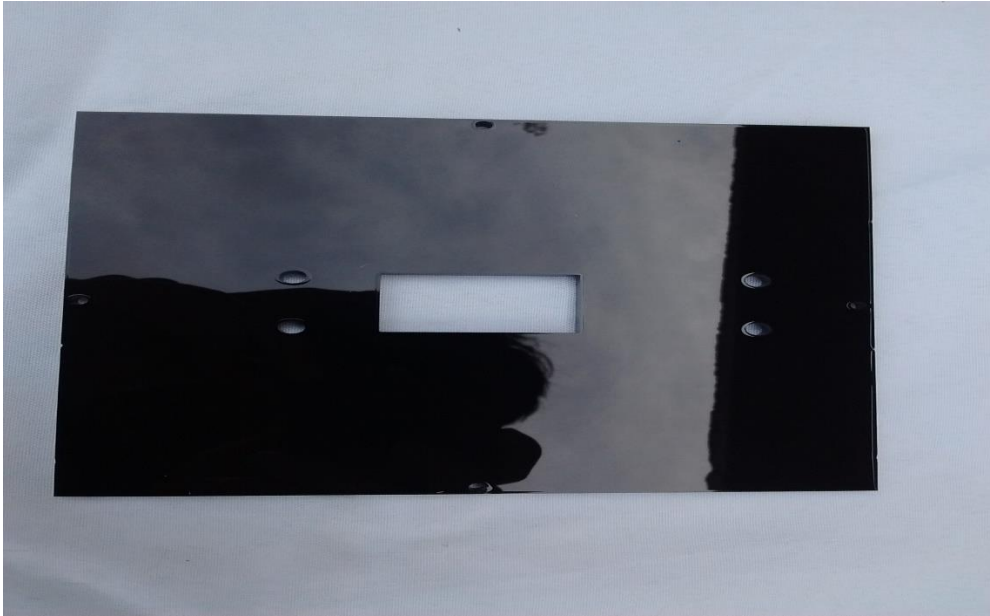


**Fotografía 12. Base del cubo.**



**Fotografía 13. Pared del cubo.**

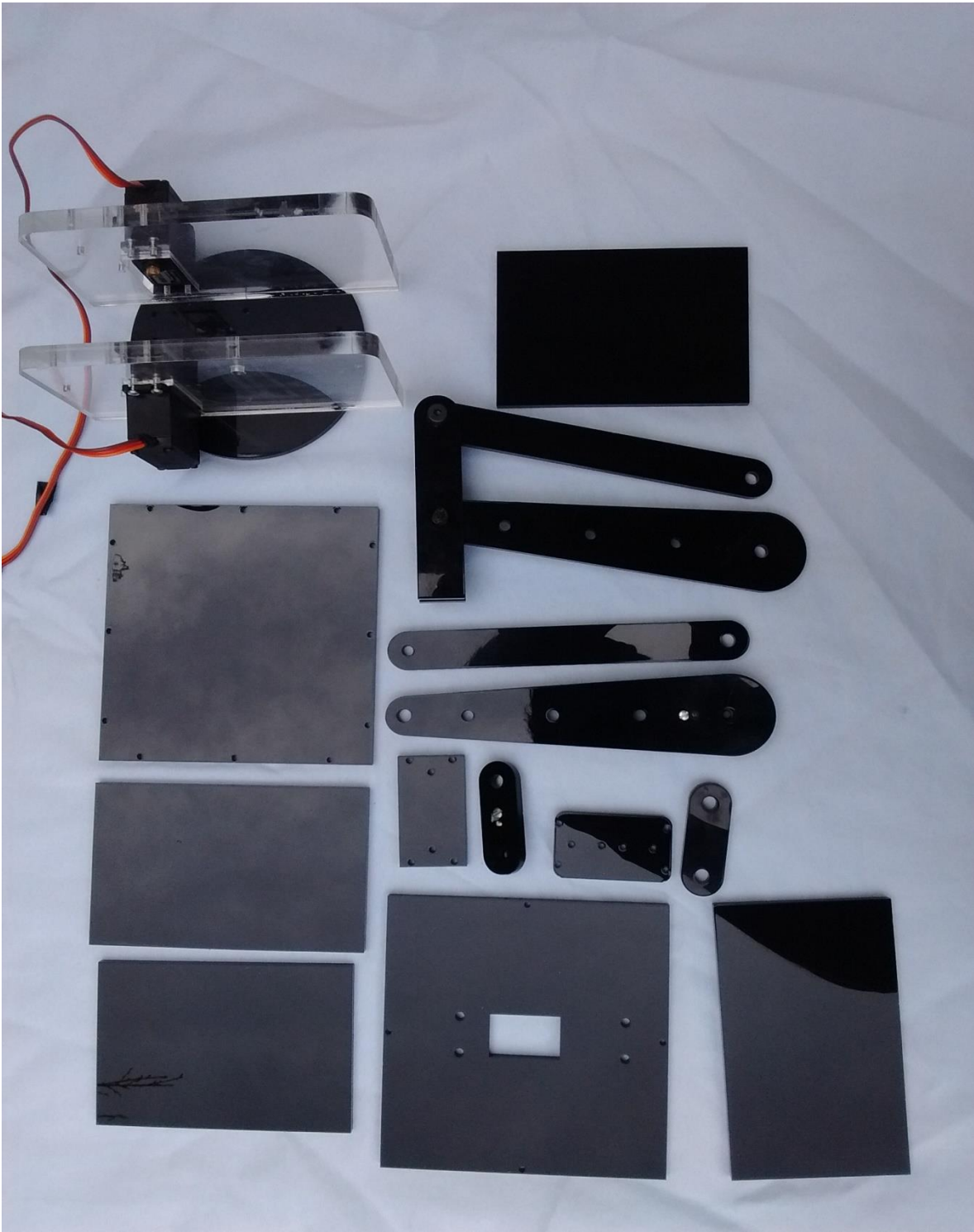




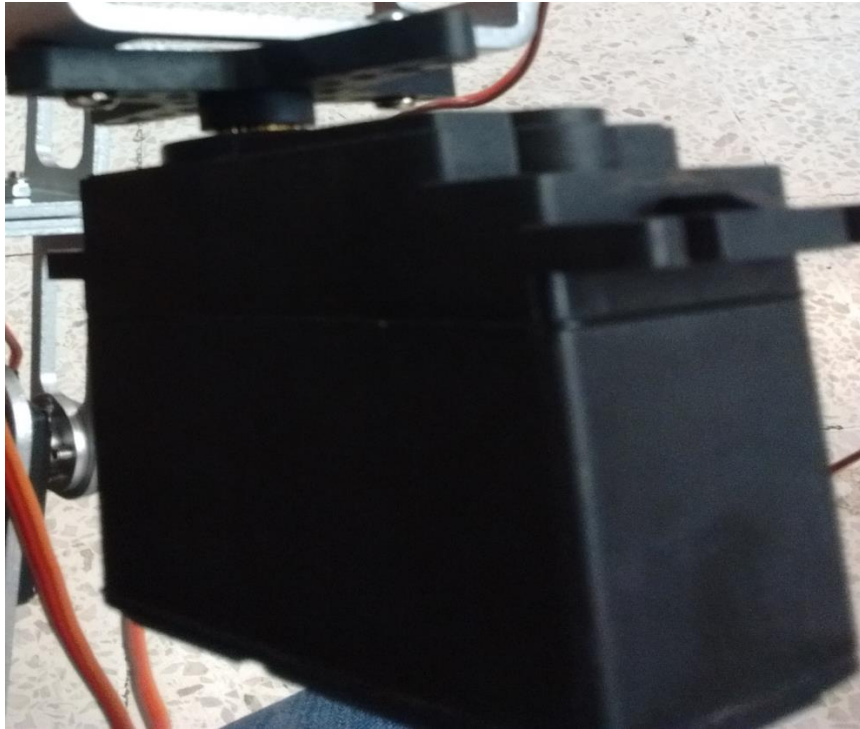
**Fotografía 14. . Tapa del cubo.**



**Fotografía 15. Base cubo, que soportará a todo el brazo de robot**



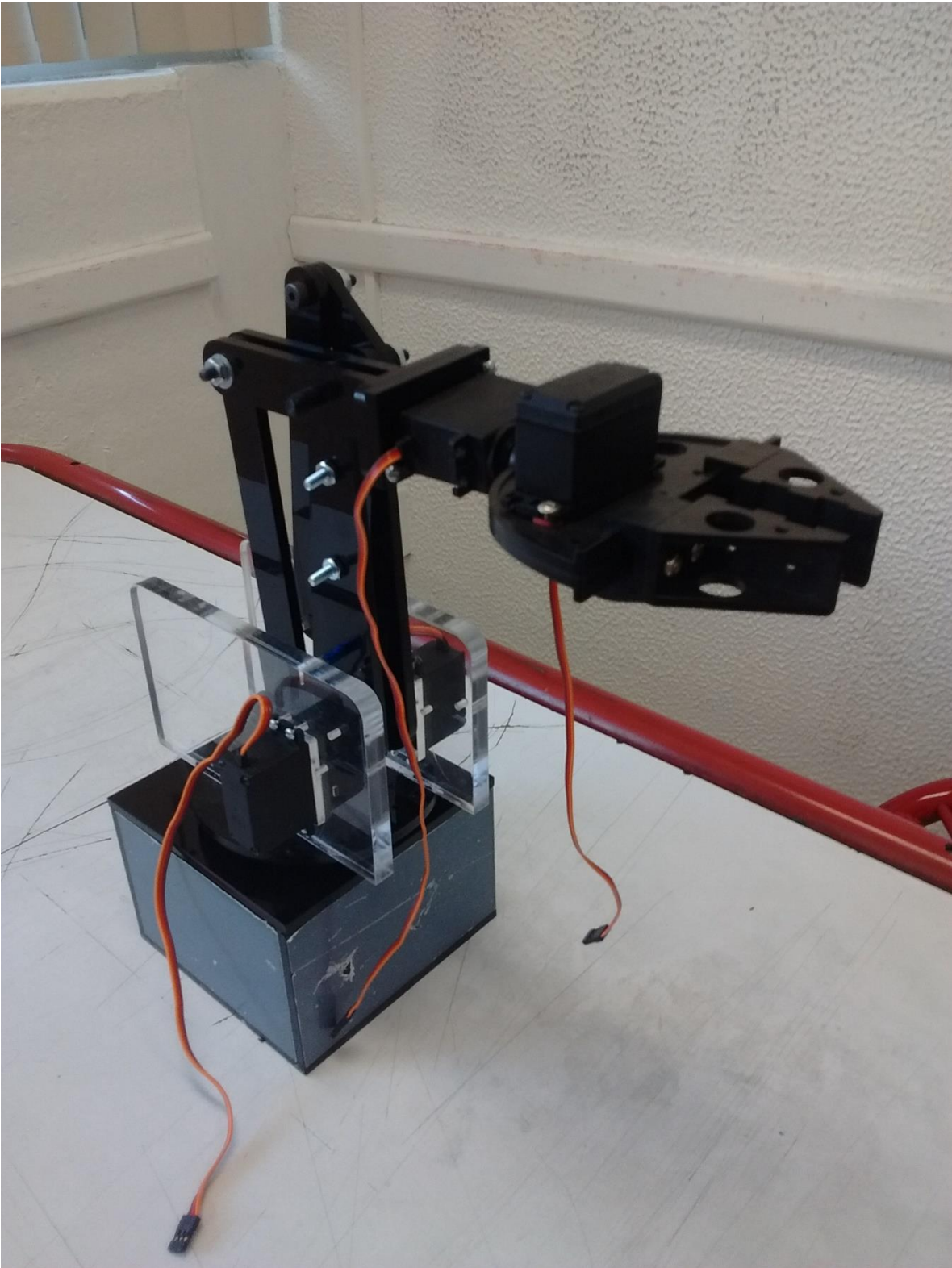
Fotografía 16. Conjunto de piezas que se hicieron en acrílico, excepto los motores.



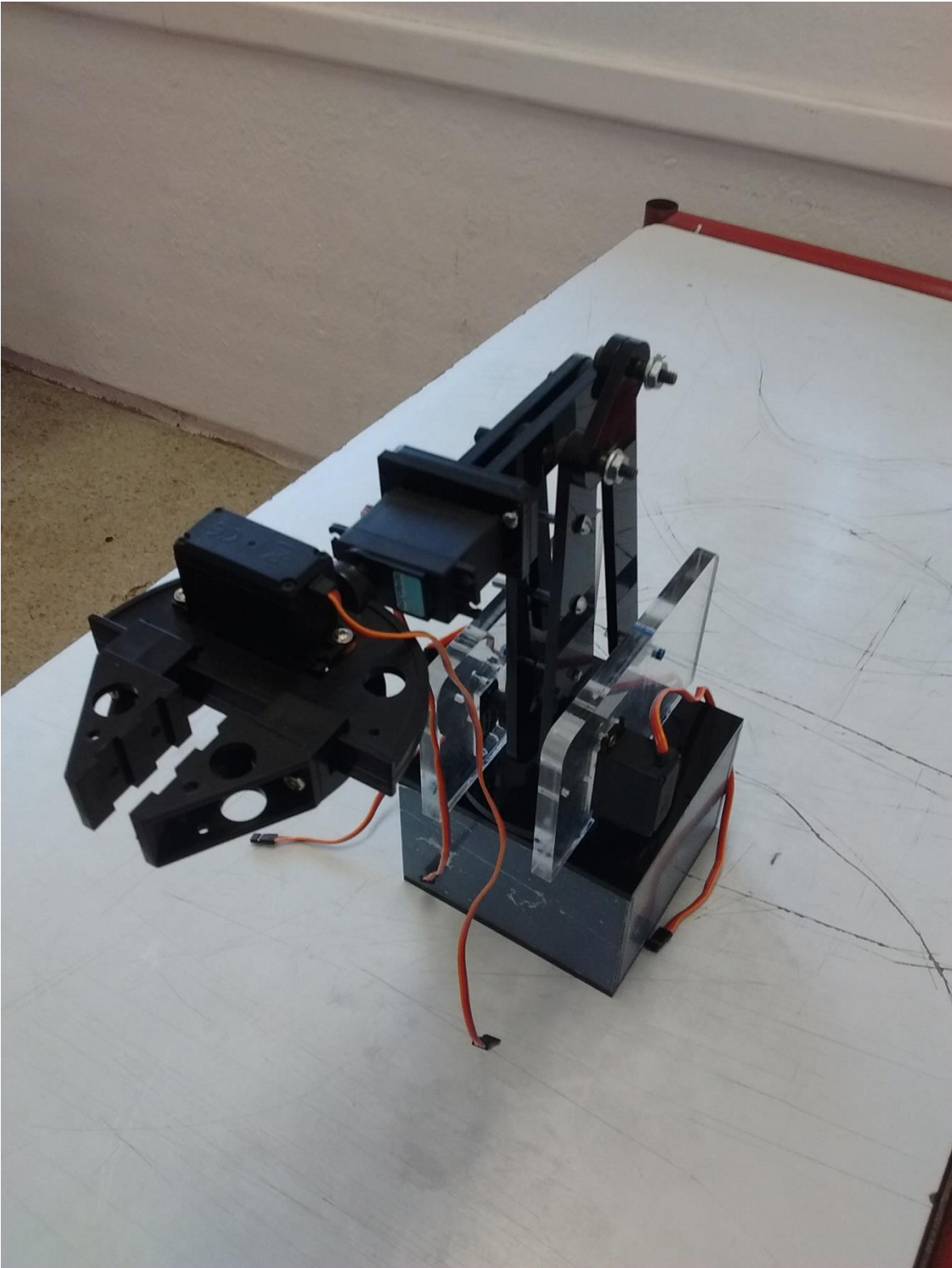
**Fotografía 17. Motor con torque de 32kg/cm.**



**Fotografía 18. Pinzas de Robot.**



**Fotografía 19. Brazo de robot vista izquierda.**



**Fotografía 20. Brazo de robot vista derecha.**

# Capítulo 4 Resultados

## 4.1 Análisis y discusión de resultados

Con el software AutoCAD se logró ahorrar mucho tiempo en el diseño de los eslabones, porque con los requerimientos establecidos se pudo iterar las magnitudes de estos y poco a poco llegar a los mecanismos necesarios para el buen funcionamiento del brazo de robot. Y con la teoría demostrar que los resultados obtenidos en las iteraciones son correctos.

El software SolidWorks que se utilizó para la simulación del brazo de robot, fue una herramienta fundamental en el diseño, en este se pudo observar las posibles complicaciones de movimiento que tendría el brazo, además de poder saber el comportamiento de este conforme se le agregaban y quitaban distintos elementos, también sirvió como señal del inicio de la construcción de piezas, porque una vez revisada la simulación y que está cumplía con las especificaciones de diseño hubo la confianza para empezar el prototipo. Hay que resaltar que el diseño ya terminado en el software tuvo el mismo comportamiento con el prototipo físico.

Las piezas del brazo de robot fueron elaboradas en un taller donde su especialidad es el acrílico por corte de láser, hay que mencionar que fue un poco difícil trabajar con ellos, porque para este taller y otros más que se dedican a elaborar piezas en acrílico no les sirvió los dibujos de definición, así que se tuvo que adentrar un poco en el área de diseño, debido a que necesitaban las piezas vectorizadas, o lo que es igual dibujarlas en otro software (Adobe Illustrator), lo anterior para resaltar que es necesario aprender a vectorizar los dibujos en Illustrator, cuando se quiera trabajar con acrílico y así evitarse varios inconvenientes. Aun con lo sucedido el material acrílico sirvió para reducir mucho la masa del brazo de robot y con ello no se tuvo la necesidad de comprar otros motores a los ya establecidos.

## Capítulo 5 Conclusiones

El objetivo principal para elaborar este prototipo de brazo de robot es para complementar una línea de producción didáctica, pero no se tiene por que limitar sólo a esto, ya que con este se pueden hacer pruebas de que tan viable son los mecanismos en los brazo de robot para levantar masas y en la manipulación de estos, y hacer una comparación con las formas de brazos que se encuentran comúnmente en el mercado.

## Capítulo 6 Referencias bibliográficas

- [1]. Fernando Reyes Cortés, Robótica Control de Robots Manipuladores, primera edición, México: ALFAOMEGA 2011.
- [2]. Noriega Bazán, Julio Cesar., 2011 “Construcción de un brazo mecánico sencillo,” Tesis de Licenciatura, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- [3]. Gutiérrez Tirado, José Alejandro., 2011 “Brazo articulado digitalizador tridimensional,” Tesis de Licenciatura, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.
- [4]. Subir Kumar Saha, Introducción a la Robótica, México: Mc Graw Hill 2010.
- [5]. Romy Pérez Moreno, Análisis de Mecanismos y Problemas Resueltos, segunda edición, México: ALFAOMEGA 2012.
- [6]. Arthur G. Erdman, George N. Sandor, Diseño de Mecanismos Análisis y Síntesis, tercera edición, México: Prentice Hall 1998.
- [7]. Sergio A. Villanueva Pruneda, Jorge Ramos Watanave, Manual de Métodos de Fabricación Metalmecánica, cuarta edición, México: AGT editor 1994.