



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

**DESARROLLO DE UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL
CONTROLADO POR VISIÓN UTILIZANDO MANIPULACIÓN EN
ESPACIO DE CÁMARA**

Tesis

Que para obtener el título de
Maestro en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en
Mecatrónica y Sistemas Mecánicos

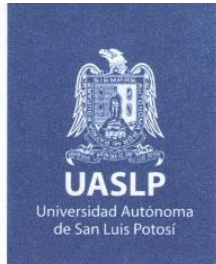
Presenta

Ing. Ricardo Hernández Hernández

Asesor

Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo

San Luis Potosí, S.L.P. a 26 de febrero 2021



19 de noviembre de 2020

**ING. RICARDO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo**, Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en Mecatrónica y Sistemas Mecánicos**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 19 de noviembre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"DESARROLLO DE UN ROBOT MANIPULADOR MÓVIL CONTROLADO POR VISIÓN UTILIZANDO MANIPULACIÓN EN ESPACIO DE CÁMARA"

Introducción.

1. Antecedentes de los manipuladores móviles y la manipulación en espacio de cámara.
2. Diseño mecánico del manipulador móvil.
3. Diseño del control por manipulación en espacio de cámara móvil.
4. Implementación, pruebas experimentales y resultados.

Conclusiones.

Referencias.

Anexos.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

CONSULTA EN
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Copia. Archivo
*etn.

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"1945-2020: 75 años de formación de profesionales en la Facultad de Ingeniería"

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Centro de Investigación y Estudios de Posgrados de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, así como también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por darme la oportunidad de estudiar un posgrado que fortalezca mi formación profesional como ingeniero mecánico.

Quiero agradecer a mi asesor el Dr. Juan Antonio Cárdenas Galindo por darme la oportunidad de ser parte de este trabajo de investigación y por su dedicación al asesorar este trabajo. Al grupo de doctores que conformó mi comité de sinodales por compartir su experiencia durante mi estancia en el posgrado.

Agradezco a mis padres por el inmenso apoyo que me brindan, por todo su esfuerzo por hacerme crecer como persona, que este logro sea un reconocimiento para ellos.

Por último, quisiera agradecer a mis compañeros Osmar Quiroz y Oscar Manolo Flores por el apoyo brindado para la realización de esta tesis.

Contenido

Abreviaturas	v
Nomenclatura matemática	v
Introducción.....	1
Objetivo.....	2
Objetivos específicos.....	3
Hipótesis.....	3
Aportación del trabajo.....	3
1. Antecedentes de los manipuladores móviles y la Manipulación en Espacio de Cámara	4
1.1. Aplicaciones de robots manipuladores móviles en ambientes no estructurados.....	4
1.2. Trabajo previo de robots móviles para ambientes no estructurados realizados en el posgrado de ingeniería mecánica.....	6
1.3. Robot manipulador móvil.....	8
1.3.1. Robot manipulador.....	9
1.3.2. Robot móvil.....	10
1.3.2.1. Robot móvil diferencial	10
1.3.2.2. Robot móvil con dirección tipo Ackermann.....	13
1.4. Manipulación en Espacio de Cámara.....	14
1.5. Manipulación en Espacio de Cámara Móvil	16
1.6. CSM basado en el Modelo de Cámara Lineal.....	18
1.6.1.1. Parámetros intrínsecos.....	19
1.6.1.2. Parámetros extrínsecos.....	21
1.6.2. Estimación de parámetros de visión	22
1.6.3. Estimación de la posición tridimensional.....	23
1.7. Conclusiones del capítulo	23
2. Diseño mecánico del manipulador móvil.....	25
2.1. Rediseño de suspensión cinemática CIEP_1 2020.....	26
2.2. Plataforma de carga	27
2.3. Diseño de brazo robótico	30

2.4.	Soportes para sistema de cámaras.....	37
2.5.	Geometría del robot manipulador móvil	38
2.5.1.	Geometría del robot manipulador	38
2.5.2.	Geometría del robot móvil.....	39
2.6.	Conclusiones del capítulo	39
3.	Diseño del control por Manipulación en Espacio de Cámara Móvil.	40
3.1.	Estimación tridimensional del objetivo.....	41
3.1.1.	Detección de marcas	45
3.2.	Trayectoria	46
3.3.	Conclusión del capítulo	51
4.	Implementación, pruebas experimentales y resultados	53
4.1.	Implementación.....	53
4.1.1.	Implementación estructural.....	53
4.1.2.	Implementación electrónica	54
4.2.	Pruebas experimentales.....	59
4.3.	Resultados	62
4.3.1.	Trayectoria en línea recta	63
4.3.2.	Trayectoria curva	72
4.4.	Conclusión del capítulo	81
	Conclusiones.....	82
	Referencias	85
	Anexos	87
	Anexo A	87
	Anexo B.....	91

Abreviaturas

CSM	Camera Space Manipulation
GDL	Grados De Libertad
LCM	Linear Camera Model
MCSM	Mobile Camera Space Manipulation
PLA	Poli Lactic Acid
USAR	Urban Search And Rescue

Nomenclatura matemática

θ_I	Desplazamiento angular de la rueda izquierda.
θ_D	Desplazamiento angular de la rueda derecha.
$\dot{\theta}_I$	Velocidad angular de la rueda izquierda.
$\dot{\theta}_D$	Velocidad angular de la rueda derecha.
R	Radio de la rueda.
b	Distancia media entre las ruedas.
ϕ	Orientación del robot móvil.
\dot{X}	Cambio de posición del robot móvil en la dirección X respecto del tiempo.
\dot{Y}	Cambio de posición del robot móvil en la dirección Y respecto del tiempo.
$\dot{\phi}$	Velocidad de rotación del robot móvil.
θ_3	Posición angular del brazo robótico.
D	Longitud del brazo.
L_h	Longitud de la horquilla.
x_c, y_c	Coordenadas de las muestras en el plano de imagen.
X_r, Y_r, Z_r	Sistema coordenado ubicado en la base del robot.
$p_1 \dots p_{11}$	Parámetros de visión del modelo de cámara de orificio.
W	Matriz de pesos.
P_{aux1}, P_{aux2}, B	Marcas visuales de referencia en la tarima.
$p^{(j)}$	Parámetros de visión del modelo de cámara de orificio de la j-ésima cámara.
X_o, Y_o, Z_o	Sistema coordenado o, ubicado entre las dos ruedas centrales del robot móvil.
φ_F	Orientación estimada de la tarima.
X_B, Y_B	Posición del punto B.
X_C, Y_C	Posición final del robot móvil.
η	Compensación de geométrica para ubicar el efector final en B.
ρ_c	Radio de curvatura instantáneo de la trayectoria.
v_s	Velocidad tangencial.
f_x, f_y	Son las coordenadas de las marcas visuales en el plano de imagen, calculadas en función de los parámetros de visión y la cinemática del robot.

Introducción

En este trabajo de tesis se presenta el desarrollo de un robot manipulador móvil controlado por visión, que permita realizar tareas que implican interactuar con un objeto manipulable en ambientes no estructurados.

Los robots manipuladores móviles han tenido un alcance importante ya que han sido la solución al problema de llevar la presencia humana a localizaciones inaccesibles o que presentan un riesgo para el ser humano, por ejemplo, la exploración de superficie en otros planetas mediante el uso de rovers o a la búsqueda y rescate en zonas afectadas por desastres naturales [1], [2],[3], [4], [5].

La configuración del robot manipulador móvil es de: un brazo robótico de un grado de libertad instalado sobre un robot móvil basado en la suspensión cinemática CIEP_1 2020, desarrollada previamente en el Posgrado de Ingeniería Mecánica de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. La suspensión cinemática CIEP_1 2020 permiten operar en terrenos irregulares manteniendo la plataforma de carga horizontal. La suspensión cinemática CIEP_1 2020 se fabricó en PLA mediante la impresión 3D [6].

Debido a la imprecisión al posicionar robots móviles o brazos robóticos, surge la necesidad de retroalimentar la posición de estos robots mediante un sistema de sensores independientes a los sensores internos del robot. La Manipulación en Espacio de Cámara es una metodología de control por visión desarrollada para robots manipuladores, la cual funciona en base a una relación entre la posición de las articulaciones del robot y las coordenadas del plano de la imagen de las cámaras. La metodología implementada en este trabajo fue la Manipulación en Espacio de Cámara Móvil, que es una variación de la Manipulación en Espacio de Cámara. La Manipulación en Espacio de Cámara Móvil fue desarrollada para controlar robots manipuladores móviles mediante un sistema de cámaras instaladas a bordo del robot manipulador móvil [7], [14].

Originalmente la Manipulación en Espacio de Cámara Móvil hace uso de un Modelo de Cámara Ortográfico, donde los parámetros de visión son obtenidos mediante una estimación no lineal. En este trabajo se le implementa a la Manipulación en Espacio de Cámara Móvil el Modelo de Cámara de Orificio para la cual los parámetros de visión son obtenidos mediante una estimación lineal, mucho más sencilla de resolver que la del modelo no lineal [8]–[10].

La Manipulación en Espacio de Cámara Móvil ha sido desarrollada empleando robots manipuladores móviles configurados en base a robots móviles con ruedas y dirección diferencial [8]–[10]. Aunque este tipo de robots permiten una implementación sencilla, requieren de un ambiente de trabajo con una superficie plana, ya que, al atravesar terrenos irregulares este tipo de robots no cuentan con una suspensión que permita compensar las irregularidades del terreno. Las irregularidades del terreno pueden afectar el desempeño de las cámaras abordo, por lo que, si se plantea trabajar en terrenos irregulares es necesario implementar una suspensión a este tipo de robots.

La sección experimental presenta el comportamiento del robot manipulador móvil controlado por la Manipulación en Espacio de Cámara Móvil con el Modelo de Cámara Lineal al operar en terrenos irregulares, por lo que se busca aprovechar las características de la suspensión CIEP_1 2020 para compensar las irregularidades del terreno.

El contenido de esta tesis se divide en 4 capítulos fundamentales. El primero describe los fundamentos de la metodología de control por Manipulación en Espacio de Cámara, la configuración de los robots manipuladores móviles y sus aplicaciones. En el segundo capítulo se desarrolla el diseño del robot manipulador móvil propuesto, considerando la impresión 3D como método de fabricación. El tercer capítulo describe la adecuación de la metodología de control al robot manipulador móvil propuesto. Se aplica el procesamiento de imágenes para la detección de objetivos, se realizan estimaciones lineales de la posición y se planea la trayectoria. El cuarto capítulo contiene la fabricación del prototipo, la implementación electrónica y el desarrollo experimental.

Objetivo

Desarrollar un manipulador móvil basado en un vehículo con suspensión pasiva y un brazo robótico de un grado de libertad. Y mediante Manipulación en Espacio de Cámara (CSM) controlar un robot de tres grados de libertad para que lo ubique y oriente a fin de levantar una tarima a escala en un terreno no estructurado.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos planteados para este trabajo se listan de la siguiente manera:

- Diseñar y fabricar una plataforma de carga.
- Diseñar y fabricar un brazo robótico de un grado de libertad.
- Diseñar y fabricar los soportes para las cámaras.
- Rediseñar e integrar la suspensión cinemática CIEP_1 2020.
- Implementar motores, drivers y equipo electrónico.
- Diseñar el control por Manipulación en Espacio de Cámara Móvil.
- Ubicar y orientar al robot manipulador móvil para realizar tarea de levantar una tarima a escala.

Hipótesis

Con el método de CSM es posible controlar el robot manipulador móvil propuesto para realizar la tarea de levantar una tarima a escala, al atravesar un terreno no estructurado.

Aportación del trabajo

Las aportaciones con las que contribuye este trabajo al área de robótica y visión se listan de la siguiente manera:

- El diseño de una plataforma de carga que cuente con un sistema de cámaras y un brazo robótico, fabricados con métodos de prototipado rápido y usando materiales ligeros.
- La adaptación de la suspensión cinemática CIEP_1 2020, para su integración al robot manipulador móvil.
- Presentar el comportamiento de la interacción entre el control basado en visión por CSM y la suspensión pasiva del manipulador móvil.
- Los resultados obtenidos dentro de este trabajo fueron reportados como parte del artículo sometido a revisión "*Vision- based control of a mobile manipulator with an adaptable-passive suspension for unstructured environments*" en la revista de la ASME para su número especial *Journal of Mechanisms and Robotics*.

1. Antecedentes de los manipuladores móviles y la Manipulación en Espacio de Cámara

1.1. Aplicaciones de robots manipuladores móviles en ambientes no estructurados

Al enfrentar situaciones de riesgo ocasionadas por desastres naturales o accidentes provocados por el hombre es común que se presenten tareas en medios de trabajo inaccesibles o que presentan un riesgo para el ser humano, eso ha generado la necesidad de remplazar al ser humano por robots móviles. Ahora bien, ya que los escenarios en estas posibles situaciones son terrenos irregulares, los robots móviles deben ser capaces de transitar sin problemas, así como operar e interactuar con el medio, por lo que las aplicaciones que se mostrarán a continuación muestran una serie de diversas situaciones a las cuales pueden ser dirigidos estos equipos robóticos y como se configuran estos para adaptarse a las tareas que se les presentan.

El primer ejemplo son los robots destinados a búsqueda y rescate urbano o *Urban Search And Rescue (USAR)*, en cual comprende actividades como búsqueda de víctimas y de ser el caso interactuar con el individuo para su rescate, este tipo de robots han sido relevantes al ser usados como apoyo para búsqueda de personas en zonas afectadas por sismos, las cuales pueden llegar a ser peligrosas o inaccesibles para los rescatistas, en la Figura 1 se puede apreciar un robot de búsqueda y rescate llamado SALVOR, el cual es capaz de transitar en terrenos semiestructurados [1].



Figura 1. Robot SALVOR. Tomado de [1]

Este tipo de vehículos suelen desplazarse en terrenos irregulares, escaleras u obstáculos desconocidos, así que ya sea que el sistema de impulso sea por bandas

o por ruedas, éste debe ser capaz de desplazarse sin problema. Es habitual que estas unidades cuenten con cámaras y sensores de proximidad para ubicarse con respecto al medio que lo rodea. Otra forma para interactuar con el medio es cuando se integran sistemas robóticos auxiliares como por ejemplo un manipulador, el cual puede contar con una herramienta adecuada para la tarea que se va a realizar.

Un caso diferente de búsqueda y rescate de personas se presentó durante el accidente en la planta nuclear de Fukushima, Japón, provocado por una catástrofe natural. Dicho evento generó la necesidad de desarrollar una variedad de robots móviles que contribuyeran a apoyar durante situaciones de emergencia de tal magnitud. La mayoría de actividades van dirigidas a búsqueda y rescate de personal y a la interacción con las instalaciones de la planta nuclear. Los escenarios plantean todo un reto ya que existen zonas de difícil acceso, con daños por el accidente o que cuentan con escaleras complejas de atravesar, por lo que las características del robot deben permitir operarlos de manera remota y para facilitar esto, los operadores realizaron capacitaciones con simulaciones del robot en el ambiente de trabajo, ver Figura 2 [2],[3].

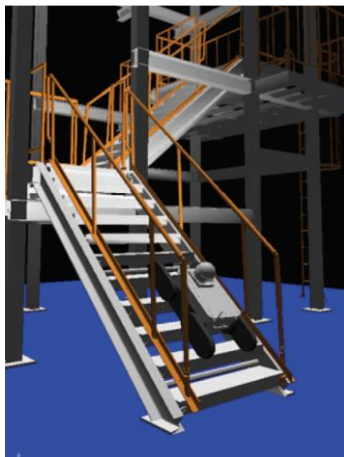


Figura 2. Simulación de entrenamiento de un robot manipulador móvil al subir escaleras industriales. Tomado de [2].

Por último, se presentan aplicaciones de manipuladores móviles en la minería, cabe resaltar que este sector industrial posee una importante presencia en México. Debido a que en el interior de una mina existen múltiples riesgos como derrumbes, explosiones o ambientes tóxicos, al responder a estos escenarios surge la necesidad de sustituir el factor humano con robots que ejecuten tareas de búsqueda, inspección y rescate. Por lo tanto, un manipulador móvil es una solución que ya ha sido usada previamente ante situaciones de desastre en la minería. En la Figura 3 se observa la modificación realizada por la *Mine Health and Safety Administration* (MSHA) del robot militar Wolverine, al que llamaron V-2, el cual ha

sido desplegado durante situaciones de accidentes mineros. Los retos a los que los robots se enfrentan son dificultades con las comunicaciones, requiere de manipulación diestra para retirar escombros o abrir puertas, transitar sobre terrenos no estructurados, zonas inundadas, ver Figura 4 [4], [5].



Figura 3. V-2, tomado de [4].

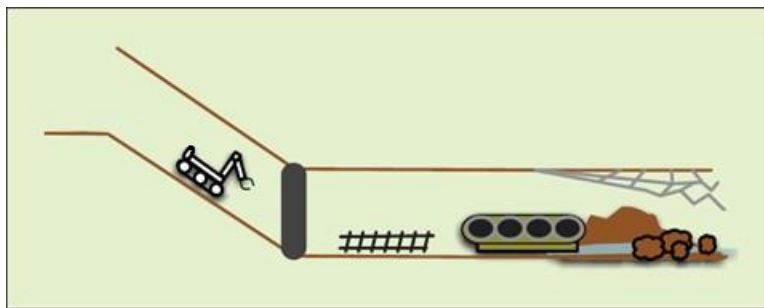


Figura 4 Diagrama de condiciones de trabajo del V-2, tomado de [4].

1.2. Trabajo previo de robots móviles para ambientes no estructurados realizados en el posgrado de ingeniería mecánica.

Debido a que en este trabajo de tesis se propone usar un robot manipulador móvil en el cual, el robot móvil este basado en una suspensión pasiva, se consideró implementar la última versión de la suspensión cinemática CIEP_1, realizada en el año 2020. Si bien existen múltiples trabajos de robótica móvil en el posgrado de ingeniería mecánica, las suspensiones cinemáticas CIEP_1 permiten operar en terrenos irregulares manteniendo la plataforma de carga en una posición aproximada a la horizontal sin la necesidad de actuadores. A continuación, se describe un breve resumen de las características principales de los trabajos de la suspensión cinemática CIEP_1 2011 y 2020.

El primer caso es la síntesis de la suspensión cinemática móvil basada en ruedas CIEP_1 2011, la cual se desarrolló para atravesar terrenos no estructurados, con una mínima variación de estabilidad en la plataforma de carga mediante un sistema pasivo. El sistema pasivo funciona adaptando la geometría del sistema de acuerdo con el terreno al transmitir las fuerzas de contacto entre sus componentes sin la necesidad de actuadores. Las características que se propusieron para el terreno son obstáculos de $\frac{3}{4}$ partes del diámetro de las ruedas, resultando en una pendiente de escalada de 30° , en la Figura 5 se observa una representación de la suspensión al interactuar con un escalón, considerado un obstáculo simétrico [11].

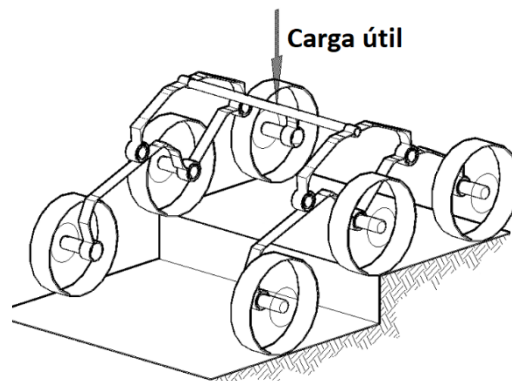


Figura 5 Esquema tridimensional de la suspensión móvil CIEP_1 2011 tomado de [11].

La suspensión cinemática móvil CIEP_1 2011 se rediseñó en el trabajo de la suspensión cinemática móvil CIEP_1 2020. La suspensión cinemática móvil CIEP_1 2020 siguió los mismos requerimientos de diseño y además consideró fabricar el prototipo con técnicas de prototipado, como la Impresión 3D, en material PLA. Esto permitió tener un prototipo de la suspensión más rápido, mucho más ligera y capaz de soportar una plataforma de carga con un peso de hasta 10 kg. En la Figura 6 se observa el diseño de la suspensión y su simetría, unidos por un eje diferencial. En los requerimientos de diseño de este trabajo se definió que la plataforma de carga se puede inclinar en un rango de $0-15^\circ$ al atravesar obstáculos de $\frac{3}{4}$ de diámetro de la rueda, el diámetro propuesto es de 6.8 cm [6].

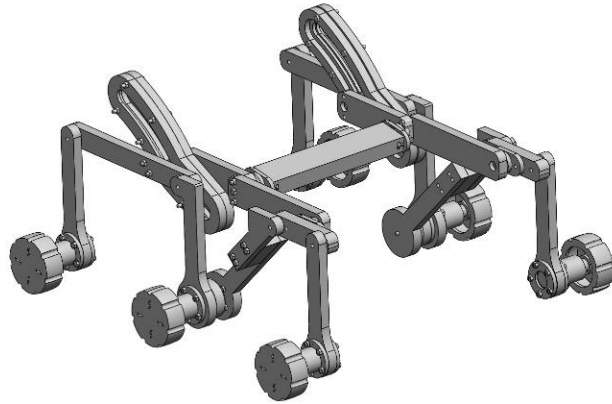


Figura 6 Suspensión cinemática móvil CIEP_1 2020, tomado de [6].

1.3. Robot manipulador móvil

Un robot manipulador móvil es un sistema robótico que consta de un brazo robótico (o manipulador) montado sobre un robot móvil. Este tipo de robots opera reubicando el área de trabajo del brazo robótico ya que al montarlo en una plataforma móvil permite reubicar el brazo robótico de manera conveniente para que este sea capaz de realizar determinada tarea. Por lo tanto, su área de trabajo puede llegar a ser mucho más grande de lo que habitualmente posee un brazo robótico por sí solo.

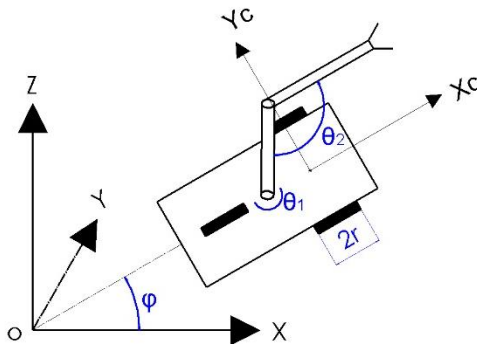


Figura 7 Representación simplificada de robot manipulador móvil con dirección diferencial y brazo robótico de 2 GDL.

Un brazo robótico está definido como un sistema holonómico y una plataforma móvil impulsada por ruedas convencionales es un sistema no holonómico. Por lo tanto, para ubicar al efector final del brazo robótico en un punto de interés, es necesario resolver de manera simultánea el modelo matemático que define a cada sistema.

Una ventaja de estos robots son que la interacción entre ambos sistemas permite hacer más eficiente al manipulador móvil ya que la dirección de la plataforma móvil hace redundante algunos de los grados de libertad del brazo, esto se puede apreciar en la Figura 7, ya que si la junta rotativa θ_1 queda fija en una posición, el cumplimiento de la tarea posicionar y orientar el efector del manipulador móvil no

se ve comprometido. Debido a que la rotación del robot móvil φ puede compensar la orientación del efector [12].

1.3.1. Robot manipulador

El robot manipulador es un brazo mecánico con la capacidad de mover y orientar un objeto en el espacio de trabajo del robot por medio de una computadora. Por lo tanto, es necesario definir que un brazo mecánico robótico es un conjunto de eslabones conectados por diferentes tipos de juntas, las más utilizadas son juntas de revoluta y prismáticas. Las juntas de revoluta permiten la rotación entre dos eslabones, como una bisagra. Por otro lado, las juntas prismáticas describen un movimiento en línea recta entre dos eslabones. Existen múltiples actuadores para accionar cada uno de los diferentes tipos de juntas, ya sea eléctricos, neumáticos o hidráulicos. Es común que, en el interior del manipulador, se integren sensores en las juntas para conocer su posición, el más utilizado es un *encoder* de posición instalado sobre el eje de movimiento de la junta. La cantidad de juntas definen los grados de libertad del robot, para nuestro caso de estudio el número de juntas se define en una sola junta por lo que el robot manipulador es de un solo grado de libertad.

Es bien conocido que al querer posicionar un robot manipulador en un punto específico el sistema presenta baja precisión, esto se debe a que no se hace una medición directa de la posición del extremo del brazo, solo se miden las posiciones de las juntas. Por lo tanto, el sistema depende de las características de los componentes como la rigidez y la precisión de fabricación. Una manera de resolver esto es posicionando al robot en los puntos de interés y mediante una rutina repetirlos nuevamente, a esto se le llama repetibilidad.

El modelo cinemático que describe la posición del punto p ubicado en el extremo del robot manipulador de un grado de libertad (GDL) de la Figura 8, está definido por la Ecuación 1 y la Ecuación 2, donde D es la longitud del eslabón, θ es ángulo variable de inclinación del eslabón respecto a la horizontal finalmente Y_p y X_p son las coordenadas del punto p respecto al sistema de referencia XY .

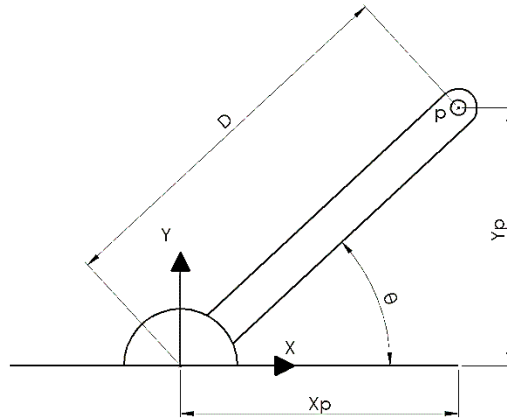


Figura 8. Manipulador de 1 GDL.

$$x = D \cos(\theta_3)$$

$$y = D \sin(\theta_3)$$

Ecuación 1

Ecuación 2

1.3.2. Robot móvil

Este caso de estudio pretende implementar un robot móvil diferencial con ruedas, por lo que este capítulo se enfoca en presentar las características que este modelo robótico implica, adicionalmente se describe el modelo de robot móvil con dirección tipo Ackermann.

Inicialmente se define que un robot móvil tiene la capacidad de desplazarse de un lugar a otro, ya sea autónomamente o con asistencia de un operador. La mayoría de los robots móviles están diseñados para operar en un espacio de trabajo con determinadas características, esto limita la capacidad de los robots móviles terrestres a adaptarse a las diferentes topologías de los espacios de trabajo. La maniobrabilidad de un robot móvil depende del tipo de ruedas y dirección implementados, por lo tanto, definiremos los principales tipos de dirección para robots móviles que se pueden implementar en el robot manipulador móvil propuesto.

1.3.2.1. Robot móvil diferencial

Un robot móvil diferencial con ruedas está definido como un sistema no holonómico, esto debido a que su modelo cinemático está en función de un conjunto de ecuaciones diferenciales que dependen de condiciones de frontera iniciales y finales. Se hace énfasis en que estas ecuaciones modelan el comportamiento del robot móvil de manera ideal ya que en la realidad el robot está sujeto a imprecisiones generadas por el deslizamiento de las ruedas o el desfase de rotación de los actuadores.

Un robot diferencial está compuesto por dos ruedas fijas actuadas y montadas a ambos lados de la plataforma del robot. Las dos ruedas funcionan de forma independiente y para mantener el equilibrio de la plataforma se utiliza una rueda tipo castor, la dirección diferencial es la más simple al no requerir rotar más de un eje de la rueda. Si las ruedas giran a la misma velocidad, el robot se mueve hacia adelante o hacia atrás, caso **a** de la Figura 9. Si una rueda gira más rápido que la otra, el robot sigue una trayectoria curva a lo largo del arco de un círculo instantáneo, caso **b** de la Figura 9. Si ambas ruedas giran a la misma velocidad en direcciones opuestas, el robot gira alrededor del punto medio de las dos ruedas motrices, caso **c** de la Figura 9. El centro instantáneo de rotación de un robot móvil con múltiples ruedas se encuentra en el punto de cruce de todos los ejes de las ruedas [12].

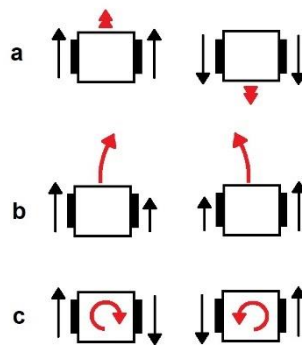


Figura 9. Comportamiento del robot móvil diferencial. Caso **a**, trayectoria en línea recta. Caso **b**, trayectoria curva. Caso **c**, rotación en el punto medio de las ruedas.

Un robot realiza una trayectoria curva a una velocidad v_s tangencial a la curva descrita, como la de la Figura 10, que prescribe un arco de un círculo instantáneo de radio ρ_c y centro q , llamado centro de rotación instantáneo mediante las velocidades tangenciales de las ruedas izquierda V_I , Ecuación 3 y derecha V_D , Ecuación 4, las cuales se obtienen al multiplicar la velocidad angular de las ruedas $\dot{\theta}_I$ y $\dot{\theta}_D$ por el radio de la rueda R [12], [13].

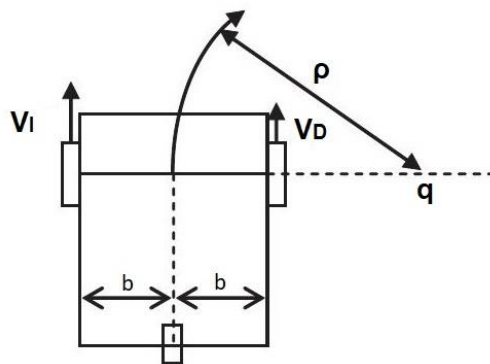


Figura 10. Centro de rotación instantáneo.

$$V_I = R\dot{\theta}_I \quad \text{Ecuación 3}$$

$$V_D = R\dot{\theta}_D \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\frac{v_s}{\rho_c} = \frac{R\dot{\theta}_I}{\rho_c + b} = \frac{R\dot{\theta}_D}{\rho_c - b} \quad \text{Ecuación 5}$$

En función de las características previamente mencionadas las ecuaciones para el modelo cinemático que prescriben la posición y orientación de este tipo de robot se explican a continuación:

La Ecuación 6, Ecuación 7 y la Ecuación 8 definen las variables \dot{X} , \dot{Y} y $\dot{\phi}$. Estas variables describen el historial de cambio de la posición en la dirección X y Y , así como la orientación ϕ del robot móvil respecto al tiempo y que están referenciados a un sistema coordenado fijo XY , mostrados en la Figura 11. El punto de control en el robot móvil puede ubicarse en el punto "P". Las dimensiones $2a$ y $2s$ determinan el área de la plataforma del robot móvil, R es el radio de las ruedas, $2b$ es la distancia entre ruedas, ϕ es la orientación del robot móvil y las velocidades de las ruedas izquierda V_I y derecha V_D .

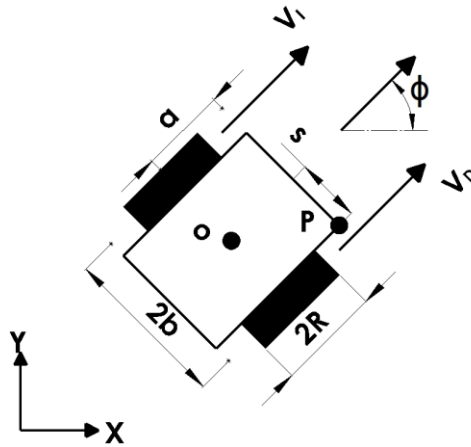


Figura 11. Diagrama de velocidades en el plano XY del robot móvil diferencial.

$$\dot{X} = (s \cos(\phi) - a \sin(\phi))\dot{\phi} + \frac{R}{2}(\dot{\theta}_I + \dot{\theta}_D) \cos(\phi) \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\dot{Y} = (s \sin(\phi) + a \cos(\phi))\dot{\phi} + \frac{R}{2}(\dot{\theta}_I + \dot{\theta}_D) \sin(\phi) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\dot{\phi} = -\frac{R}{2b}(\dot{\theta}_I - \dot{\theta}_D) \quad \text{Ecuación 8}$$

En ocasiones es conveniente definir el historial de desplazamiento no en función del tiempo, sino de una variable que se relacione directamente con el desplazamiento promedio de las ruedas. La Ecuación 11, Ecuación 12 y Ecuación 13 describen el historial de cambio de la posición en la dirección X y Y , así como la orientación ϕ del robot móvil respecto al promedio de las velocidades de las ruedas α .

$$\alpha = \frac{(\dot{\theta}_I + \dot{\theta}_D)}{2} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$u = \frac{d\theta_D - d\theta_I}{d\theta_I + d\theta_D} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$\frac{d\phi}{d\alpha} = \frac{R}{b} u \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\frac{dx}{d\alpha} = \frac{R}{s} (s \cos(\phi) - a \sin(\phi)) u + R \cos(\phi) \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\frac{dy}{d\alpha} = \frac{R}{s} (s \sin(\phi) + a \cos(\phi)) u + R \sin(\phi) \quad \text{Ecuación 13}$$

1.3.2.2. Robot móvil con dirección tipo Ackermann

En general, la dirección tipo Ackermann se define como un robot móvil con varias ruedas convencionales que deben tener el mismo centro de rotación instantáneo. La dirección Ackermann está diseñada para garantizar que en los giros las ruedas de todos los ejes tengan un punto de cruce común denominado centro de rotación instantáneo, para evitar el deslizamiento de las ruedas causado geoméricamente, ver Figura 12. Cada eje de rotación es una restricción al modelo geométrico y deben cumplir con una solución. A diferencia de un robot móvil diferencial, un vehículo con dirección Ackermann no puede girar sobre un punto porque requiere un cierto radio mínimo si no las ruedas sufren deslizamiento al rotar [12],[13].

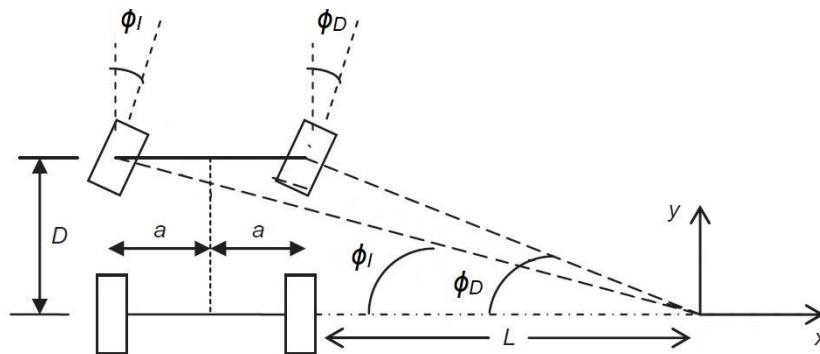


Figura 12. Rotación de los ejes de todas las ruedas con el mismo centro de rotación instantáneo. Modificado de [12].

De acuerdo con las relaciones geométricas mostradas en Ecuación 14 y obtenidas de la Figura 12, $2a$ es la distancia entre ruedas, D es la distancia entre ejes y L es el radio de rotación, ϕ_I y ϕ_D es la rotación para orientar cada rueda perpendicularmente al radio de la curvatura [12].

$$\arctan(\phi_I) = \frac{(2a + L)}{D}, \quad \arctan(\phi_D) = L/D \quad \text{Ecuación 14}$$

Esta construcción geométrica demuestra cómo la movilidad del robot es una función del número de restricciones en el movimiento del robot, es decir, la dirección que se le da a las ruedas y no del número de ruedas que posee el robot. De hecho, la segunda rueda en cada eje no impone restricciones cinemáticas adicionales al movimiento del robot, ya que su eje de rotación es idéntico al de la primera rueda [12], [13].

Para finalizar con la sección de la cinemática del robot manipulador móvil, quedo definido en que consiste un robot manipulador móvil y como su funcionamiento es susceptible a imprecisiones, lo siguiente ahora es compensar estos errores con otro sistema de sensores que retroalimenten la posición del robot manipulador móvil. En la siguiente sección se analiza una metodología de control por visión denominada Manipulación en Espacio de Cámara que ya ha sido implementada para el control de diversos tipos de robots.

1.4. Manipulación en Espacio de Cámara

Manipulación en Espacio de Cámara o en inglés *Camera Space Manipulation* (CSM) es una técnica computarizada de control por visión, que surge de la necesidad de controlar un manipulador en un espacio de trabajo por medio de cámaras ubicadas de manera remota al robot. Este método puede operar de manera autónoma o de manera supervisada por un operador. Algunas de las ventajas de este método son que el sistema de visión y hardware no requieren calibración [7].

El método CSM funciona en base a una relación entre la posición de las articulaciones del robot y las coordenadas del plano de la imagen de las cámaras y para una estimación tridimensional es necesario el uso de al menos dos cámaras. Esta relación se genera mediante técnicas de estimación, en la cual se obtiene una serie de parámetros definidos por un modelo de cámara. Originalmente este método se desarrolló usando un modelo de cámara ortográfico con 6 parámetros de visión. Después, en otros desarrollos se aplicaron métodos adicionales como el *flattening* para corregir el efecto de perspectiva [14].

Para obtener los seis parámetros de visión de cada cámara que están representados por $\mathbf{C} = [C_1, \dots, C_6]$ se minimiza la siguiente función respecto a \mathbf{C}

$$J(\mathbf{C}) = \sum_{i=1}^m \left((x_{ci} - fx(\mathbf{C}, X_i, Y_i, Z_i))^2 + (y_{ci} - fy(\mathbf{C}, X_i, Y_i, Z_i))^2 \right) \quad \text{Ecuación 15}$$

para un m número de marcas visuales adheridas al manipulador con coordenadas x_{ci}, y_{ci} respecto al plano de la imagen y que su locación física está determinada por $(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z})$, que son obtenidas mediante la cinemática del manipulador.

Y de acuerdo con el modelo de cámara ortográfico las relaciones fx y fy están descritas por

$$fx(\mathbf{C}, X_i, Y_i, Z_i) = b_1 X_i + b_2 Y_i + b_3 Z_i + b_4 \quad \text{Ecuación 16}$$

$$fy(\mathbf{C}, X_i, Y_i, Z_i) = b_5 X_i + b_6 Y_i + b_7 Z_i + b_8 \quad \text{Ecuación 17}$$

Las variables b_1, \dots, b_8 mostradas a continuación expresan una relación no lineal de los seis parámetros de visión \mathbf{C} .

$$\begin{aligned} b_1 &= C_1^2 + C_2^2 - C_3^2 - C_4^2 & b_5 &= 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) \\ b_2 &= 2(C_2 C_3 + C_1 C_4) & b_6 &= C_1^2 - C_2^2 + C_3^2 - C_4^2 \\ b_3 &= 2(C_2 C_4 + C_1 C_3) & b_7 &= 2(C_3 C_4 + C_1 C_2) \\ b_4 &= C_5 & b_8 &= C_6 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 18}$$

Una vez que se tienen los parámetros de visión para cada cámara, es posible realizar una estimación tridimensional de un objetivo que cuente con marcas visuales. Utilizando las coordenadas de las marcas en el plano de imagen y los parámetros de visión de al menos dos cámaras es posible realizar una estimación no lineal de la posición tridimensional de cada una de las marcas.

El método CSM puede ser usado en sistemas con restricciones tanto holonómicas como no holonómicas. El primer caso es el CSM estándar que corresponde al control de manipuladores holonómicos, para los cuales la relación entre la posición del efector final y las juntas del manipulador pueden ser expresadas algebraicamente. Este método usa un conjunto de cámaras separadas entre sí y están ubicadas de manera remota al robot que controlan.

Por otro lado, se tiene el CSM estándar en sistemas no holonómicos, un método usado originalmente para sistemas robóticos móviles como por ejemplo un

manipulador móvil, donde la relaciones entre el efector final y las juntas de rotación no son únicamente algebraicas sino diferenciales. Esta aplicación funciona con cámaras fijas instaladas de manera remota e independiente al robot, ver Figura 13, así que la posición global del efector final depende de la trayectoria que toman las juntas para moverse hacia su posición final por lo que esto requiere de estar resolviendo ecuaciones diferenciales para cada estimación. Otro factor importante que podría considerarse como una desventaja en este tipo de sistema es el espacio de trabajo, el cual está limitado por el rango visual de las cámaras [15].

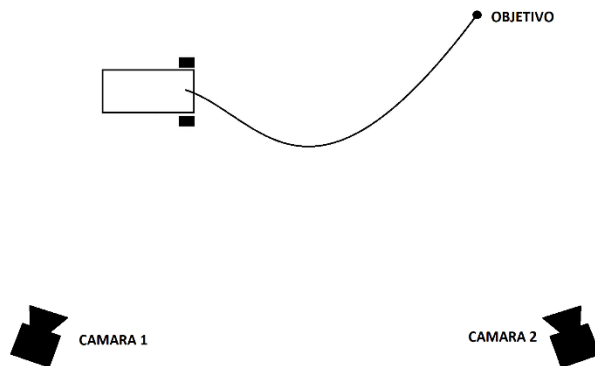


Figura 13 Diagrama de aplicación del CSM estándar en un robot móvil con dirección diferencial.

1.5. Manipulación en Espacio de Cámara Móvil

Manipulación en Espacio de Cámara móvil o *Mobile Camera Space Manipulation* (MCSM) es una derivación del CSM estándar, que mantiene sus fortalezas y supera las limitaciones al momento de utilizar sistemas no holonómicos. MCSM fue desarrollado para sistemas que tiene las cámaras abordo, por lo que el área de trabajo del sistema no está limitada por cámaras fijas como se vio con el CSM no holonómico estándar [8]–[10].

El método MCSM se desarrolló con la finalidad de controlar un manipulador móvil. En la Figura 14 se observa la configuración de un robot manipulador móvil con dos cámaras sobre la plataforma del robot móvil. Al tener instaladas las cámaras y el manipulador sobre la plataforma del robot móvil, es posible ejecutar el procedimiento de Manipulación en Espacio de Cámara Estándar para obtener los parámetros de visión. Hay muchas ventajas en esto, la primera es que los parámetros de visión pueden ser obtenidos sin la integración numérica de las relaciones diferenciales del robot móvil, esto simplifica la estimación de los parámetros de visión. Debido a problemas como el deslizamiento de las ruedas la información proveniente de sistemas robóticos móviles tiende a ser menos precisa y confiable que la de un brazo robótico [10].

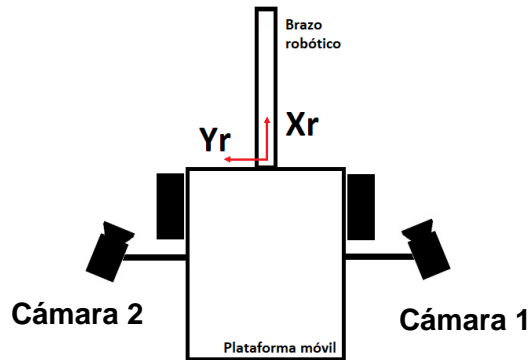


Figura 14 Diagrama de la implementación del MCSM en un manipulador móvil.

Una vez que se tiene los parámetros de visión de cada cámara y que se detectan las marcas de un punto objetivo, entonces, se procede a estimar la posición tridimensional del punto objetivo. Para determinar la posición y orientación del objetivo es necesario interpretar diversos puntos tridimensionales ubicados en el objetivo. Una vez que se tiene la ubicación y orientación del objetivo, esta información se usa para determinar la trayectoria que el robot móvil requiere para posicionar al robot manipulador móvil en el objetivo. En la Figura 15 se observa como un robot manipulador móvil basado en un robot móvil diferencial y un brazo de un grado de libertad ubica el efector final **A** sobre el punto objetivo **B** al desplazar el robot móvil y posicionar el brazo robótico [9].

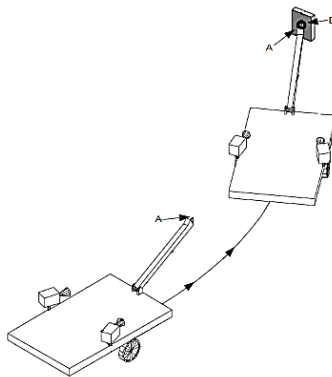


Figura 15. Diagrama esquemático del posicionamiento de robot manipulador móvil modificado de [9].

Ya que el sistema de visión está calibrado en el área de trabajo del brazo robótico, al hacer una estimación tridimensional fuera de esta región, la estimación tendrá errores. Así que es necesario estar evaluando la posición del objetivo conforme el robot móvil ejecuta la trayectoria hacia el objetivo. Para realizar las evaluaciones de la posición del objetivo se ejecuta la trayectoria parcialmente y se programa una pausa al movimiento del robot manipulador móvil en la cual se detecta las marcas

visuales del objetivo. Al tener una nueva posición más precisa que la anterior es necesario actualizar la trayectoria del robot móvil para corregir los errores causados tanto por la estimación anterior como por el comportamiento del robot móvil durante la ejecución. Estas actualizaciones se realizan de manera iterativa hasta que el robot manipulador móvil alcanza el objetivo [8]–[10].

1.6. CSM basado en el Modelo de Cámara Lineal

Esta sección describe la variante del CSM estándar donde se sustituye el modelo de cámara ortográfica por el modelo de cámara de orificio, en inglés “*Pin-hole*”, también es conocido como LCM-CSM *Linear Camera Model Camera Space Manipulation* ya que el modelo está definido por 11 parámetros de visión los cuales son obtenidos mediante una estimación lineal [16].

El modelo de cámara de orificio se basa en establecer una relación entre un punto ubicado en un marco de referencia tridimensional B_i y cómo se proyecta en el plano de imagen de la cámara b_i , a este fenómeno se le denomina proyección de perspectiva, ver Figura 16. La geometría del modelo depende de tres sistemas de referencia el primero es el de origen en el punto C con coordenadas (X, Y, Z) , el cual es el centro de la proyección de la imagen. El segundo es el sistema con origen el punto p con coordenadas (x, y, z) , este sistema de referencia describe el plano de imagen en el plano (x, y) . Por último, el sistema de referencia con coordenadas (X', Y', Z') con origen en el punto O , es el marco de referencia tridimensional del espacio de trabajo del sistema robótico [14],[17].

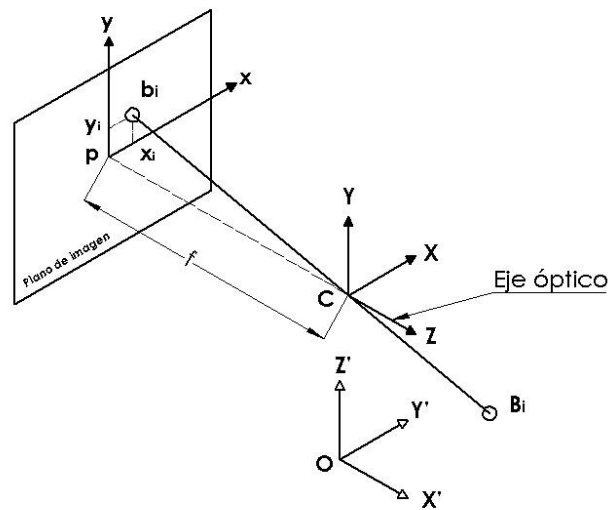


Figura 16 Geometría del modelo de cámara de orificio.

El modelo de cámara de orificio está definido por dos diferentes tipos de parámetros, los intrínsecos y los extrínsecos. Los parámetros intrínsecos están relacionados con la fabricación de la cámara y los parámetros extrínsecos están definidos por el marco de referencia del sistema robótico, el siguiente subcapítulo los describe a detalle y finaliza concluyendo como queda conformado el modelo de cámara.

1.6.1.1. Parámetros intrínsecos

Los parámetros intrínsecos o internos de la cámara comprenden las características ópticas de la cámara, tal como la distancia focal f que ésta a su vez determina la proyección de perspectiva. La distancia focal se encuentra sobre el eje óptico y está en función de los lentes instalados en la cámara [17].

De acuerdo con la Figura 17, para proyectar el i -ésimo punto perteneciente al marco de referencia con origen en el punto C , y con coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) , en el plano de imagen (x_i, y_i) con origen en el punto p , es necesario usar el principio de triángulos semejantes:

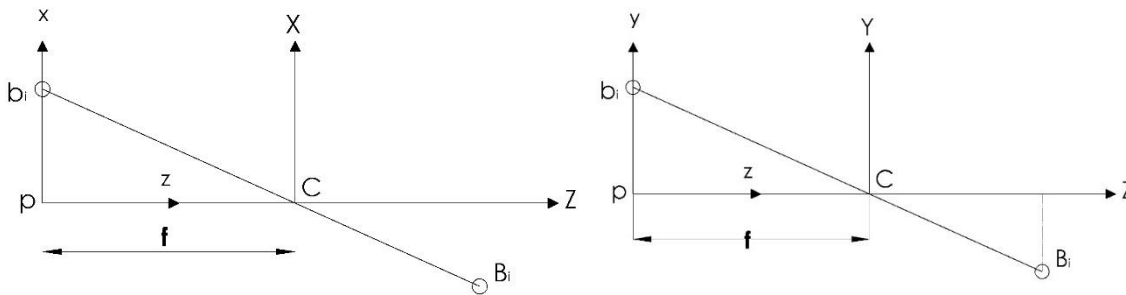


Figura 17 Izquierda: Plano ZX del modelo de cámara de orificio. Derecha: Plano YZ del modelo de cámara de orificio.

$$x_i = f \frac{X_i}{Z_i} \qquad y_i = f \frac{Y_i}{Z_i} \qquad \text{Ecuación 19}$$

Este proceso es una transformación de coordenadas la cual puede quedar expresada en una representación matricial, donde $\rho = Z_i$, que es el factor de escala en la dirección Z .

$$\rho \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \qquad \text{Ecuación 20}$$

Al trabajar con imágenes digitales el conteo de pixeles suele iniciar en una esquina, de acuerdo con el modelo de cámara de orificio, se tiene que trasladar el sistema

de referencia al centro de la imagen, ver Figura 18. Añadiendo las traslaciones a la Ecuación 20, la ecuación queda de la siguiente manera [17]:

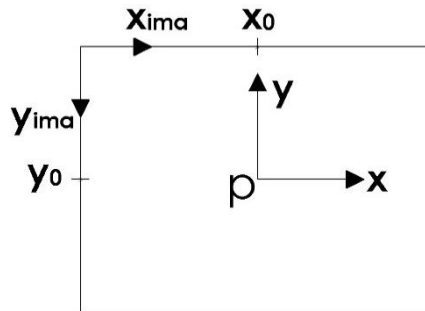


Figura 18 Plano de imagen.

$$\rho \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & x_0 \\ 0 & f & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 21}$$

Si las constantes f , x_0 , y_0 están expresadas en unidades de longitud es necesario convertir las unidades a pixeles. Para esto es necesario usar factores de conversión, para lo cual definimos a los factores m_x y m_y como el número de pixeles por unidad de longitud en las direcciones “ x ” y “ y ” del plano de imagen, por lo tanto, si:

$$\alpha_x = f m_x \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\alpha_y = f m_y \quad \text{Ecuación 23}$$

$$u_0 = x_0 m_x \quad \text{Ecuación 24}$$

$$v_0 = y_0 m_y \quad \text{Ecuación 25}$$

La Ecuación 21 queda expresada como:

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 26}$$

Las variables u_i y v_i son las coordenadas del punto proyectado en el plano de imagen en pixeles. A la matriz de dimensiones 3x3 de la Ecuación 26 se le denomina matriz de calibración, añadiendo un factor de distorsión con el parámetro s , la matriz de calibración queda expresada como:

$$K = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 27}$$

1.6.1.2. Parámetros extrínsecos

Los parámetros extrínsecos no es más que una relación entre el sistema de coordenadas **C** y el sistema de coordenadas **O**, si se observa la Figura 16, esto se resuelve haciendo una transformación de coordenadas por medio de una matriz de transformación homogénea **T** con movimientos de traslación **t** y rotación **r** [17].

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 28}$$

Las rotaciones r_{11} a r_{33} definen las direcciones de los nuevos ejes y las traslaciones t_1 a t_2 es el vector que parte del origen **C** al origen **O**. Y la transformación de coordenadas se resuelve con:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 29}$$

Por lo tanto, al unir los parámetros intrínsecos de la Ecuación 26 y la Ecuación 27 más los parámetros extrínsecos de la Ecuación 29 queda representado completamente el modelo de cámara de orificio y la expresión resultante es:

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & s & u_0 \\ 0 & \alpha_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 30}$$

Es posible reducir las matrices **T** y **K** en una sola matriz y esta es conocida como matriz de proyección de cámara.

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 31}$$

Finalmente, para obtener los 11 parámetros del modelo de cámara de orificio es necesario normalizar la matriz de proyección con respecto a p_{34} :

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \\ p_9 & p_{10} & p_{11} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 32}$$

1.6.2. Estimación de parámetros de visión

El sistema de ecuaciones mostrado en Ecuación 32 puede ser representado en un sistema de dos ecuaciones al sustituir el valor de ρ , el cual se define como un factor de escala y despejando para la matriz de parámetros se tiene la Ecuación 33.

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X' & Y' & Z' & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X'u_i & -Y'u_i & -Z'u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X' & Y' & Z' & 1 & -X'v_i & -Y'v_i & -Z'v_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{11} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 33}$$

Para resolver la matriz de parámetros de visión $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_{11}]$ de una sola cámara es necesario tener al menos 11 ecuaciones, hay que tener en cuenta que por cada muestra observada se tiene 2 ecuaciones, por lo que con 6 muestras basta para obtener los 11 parámetros de visión. Se recomienda utilizar más de 6 muestras, debido a que, un sistema sobre restringido produce mejores resultados al estimar el vector \mathbf{p} , ya que el proceso de minimización promedia el ruido en la estimación de los parámetros \mathbf{p} cuando hay más de 6 muestras de datos y que las marcas visuales están ubicadas sobre el plano de la imagen. Un sistema sobre restringido no implica que no tenga solución ya que la misma ecuación ocurre varias veces en el sistema [16],[18].

Para obtener los 11 parámetros de visión de un conjunto de m muestras del modelo lineal descrito en la Ecuación 33, se requiere representar el sistema en forma matricial para adecuarlo a la solución de un sistema lineal $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x}$, donde \mathbf{x} representa la matriz de parámetros de visión \mathbf{p} . La Ecuación 34 muestra la solución para \mathbf{x} .

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{Y} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde la matriz \mathbf{A} de dimensión $m \times 11$ corresponde a

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X' & Y' & Z' & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X'u_i & -Y'u_i & -Z'u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X' & Y' & Z' & 1 & -X'v_i & -Y'v_i & -Z'v_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 35}$$

Para mejorar precisión del modelo es necesario darles una mayor ponderación a determinados puntos en el muestreo. Entre más cercano sea la muestra a nuestro

objetivo a estimar tridimensionalmente, mayor será la ponderación (w_m). La matriz diagonal W distribuye esta ponderación para cada muestra [14], [18].

$$W = \begin{bmatrix} w_m & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & w_m \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 36}$$

Y corresponde a la matriz de m observaciones

$$Y = [u_i \quad v_i \quad \cdots \quad u_m \quad v_m]^T \quad \text{Ecuación 37}$$

1.6.3. Estimación de la posición tridimensional

Una vez que se tiene los 11 parámetros de visión de cada cámara es posible hacer una estimación tridimensional de la ubicación de las marcas visuales del objetivo. Se entiende por objetivo a un objeto o lugar en el espacio al cual se busca llegar. En el caso del MCSM se busca ubicar el efector del robot manipulador móvil A en el punto B de la Figura 15.

La estimación tridimensional es posible al despejar las coordenadas tridimensionales de la Ecuación 32 y usando la información de al menos dos cámaras, se tiene el sistema de la Ecuación 38.

$$\begin{bmatrix} u_{c1} - p_{1,4} \\ v_{c1} - p_{1,8} \\ u_{c2} - p_{2,4} \\ v_{c2} - p_{2,8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1,1} - p_{1,9}u_{c1} & p_{1,2} - p_{1,10}u_{c1} & p_{1,3} - p_{1,11}u_{c1} \\ p_{1,5} - p_{1,9}v_{c1} & p_{1,6} - p_{1,10}v_{c1} & p_{1,7} - p_{1,11}v_{c1} \\ p_{2,1} - p_{2,9}u_{c2} & p_{2,2} - p_{2,10}u_{c2} & p_{2,3} - p_{2,11}u_{c2} \\ p_{2,5} - p_{2,9}v_{c2} & p_{2,6} - p_{2,10}v_{c2} & p_{2,7} - p_{2,11}v_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 38}$$

La solución de este sistema de ecuaciones para la matriz de coordenadas del sistema de referencia "o" se resuelve usando la pseudo-inversa de Moore-Penrose para matrices no cuadradas.

1.7. Conclusiones del capítulo

El motivo de abordar robots móviles dirigidos a ambientes no estructurados es debido a que el objetivo de este trabajo es mostrar el comportamiento del sistema de visión MCSM bajo las condiciones operativas de la suspensión CIEP_1 2020, al atravesar ambientes no estructurados.

Se describieron las características de los sistemas robóticos y su modelado cinemático, el cual modela el movimiento del robot de manera ideal, pero un sistema robótico en la realidad es susceptible a imprecisiones. A diferencia de los robots

móviles con dirección Ackermann, los robots móviles con dirección diferencial son muy prácticos debido a su simpleza, ya que la orientación del robot se genera con la rotación de las mismas ruedas.

Los robots móviles con ruedas y dirección diferencial son susceptibles a imprecisiones como el deslizamiento de las ruedas o el desfase de rotación de los actuadores. Esto obliga a usar más sensores de los ya instalados inicialmente y retroalimentar la posición actual del robot tomando en cuenta que las imprecisiones alteraron la trayectoria original, de ahí la necesidad de implementar un sistema de visión que permita ubicar la posición del robot con respecto a un objetivo.

De la misma forma, debido a la baja precisión que presentan los robots manipuladores, es imprescindible implementar un sistema de visión que genere una medición externa de la posición del robot manipulador con respecto a un punto de interés.

Para el control del manipulador móvil de este trabajo se propone usar la metodología de Manipulación en Espacio de Cámara Móvil (MCSM) haciendo uso del Modelo de Cámara Lineal (LCM). De acuerdo con la búsqueda bibliográfica no se encontraron trabajos donde se aplique la metodología de LCM-MCSM. Este trabajo hace una variación de la configuración de robot manipulador móvil comúnmente utilizado con la MCSM, al implementar una suspensión cinemática al robot móvil.

2. Diseño mecánico del manipulador móvil

La metodología de Manipulación en Espacio de Cámara móvil se desarrolla haciendo uso de un robot manipulador móvil, en este capítulo se desarrollará el diseño mecánico de un robot manipulador móvil con un sistema de cámaras abordo que permita controlarlo por Manipulación en Espacio de Cámara Móvil.

Para generar un diseño conceptual de nuestro robot manipulador móvil prototipo, se comenzó tomando en cuenta las características que definen a un manipulador móvil, presentadas en el sección 1.3 y la adaptación de la suspensión cinemática CIEP_1 2020, trabajo previamente desarrollado. Una vez establecido esto, se prosiguió con el diseño de los subsistemas teniendo en cuenta una serie de requerimientos que a continuación se listan.

Los requerimientos del manipulador móvil propuesto en la Figura 19 se enumeran a continuación:

1. Integrar una suspensión cinemática que mantenga la estabilidad de la plataforma de carga, como es el caso de la suspensión cinemática CIEP_1 2020.
2. Contar con una Plataforma de carga ligera que pueda acoplarse a la suspensión del punto número 1.
3. La plataforma debe permitir ubicar una tarjeta controladora de motores.
4. La plataforma debe contar con un brazo robótico de un grado de libertad, y una herramienta en el efector final adecuada para la tarea que se pretende ejecutar.
5. Diseñar soportes para instalar equipo de cámaras.

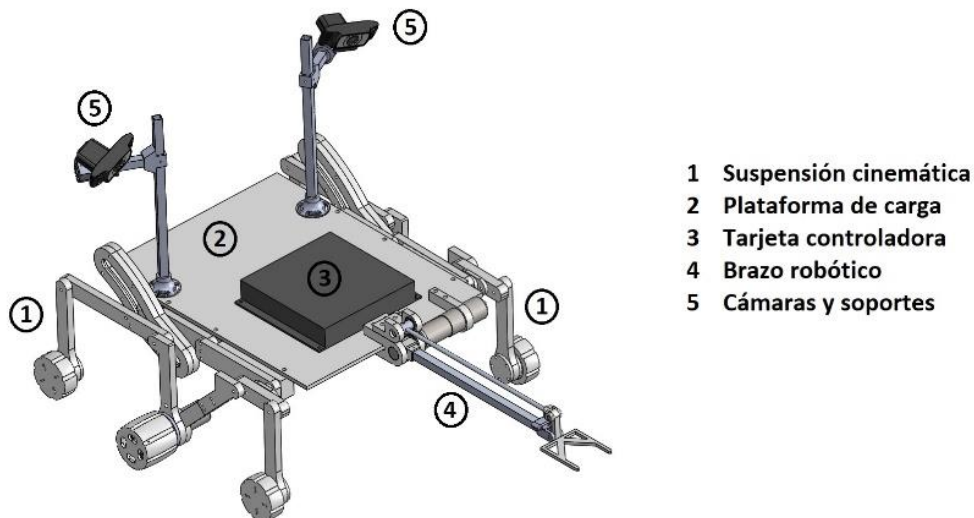


Figura 19 Diseño de manipulador móvil.

2.1. Rediseño de suspensión cinemática CIEP_1 2020

En base a los beneficios que brinda, la suspensión que se integró al diseño fue la suspensión cinemática móvil CIEP_1 2020, ya que se pretende operar el manipulador móvil en ambientes no estructurados y es necesario mantener orientado el sistema de visión para que el objetivo se mantenga dentro del rango de visión de las cámaras. Añadiendo además que el prototipo está fabricado en PLA haciendo uso de la impresión 3D, por lo que su peso es muy bajo, esto directamente reduce la carga sobre los motores. Cabe resaltar que el diseño de la suspensión CIEP_1 2020 no está adaptada para la instalación de motores en las ruedas. Para adecuar la suspensión CIEP_1 2020 al manipulador móvil, fue necesario rediseñar algunas secciones considerando fabricarlas con técnicas de prototipado rápido, ver Figura 20.

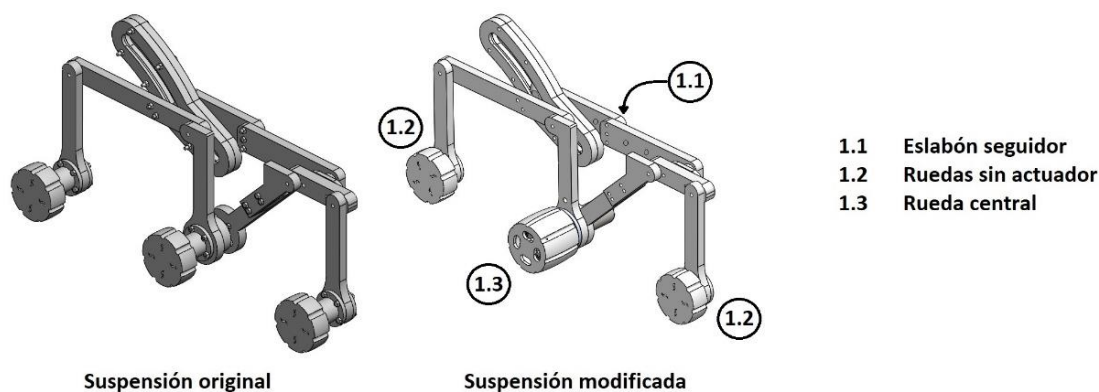


Figura 20 Comparativa de Suspensión cinemática móvil CIEP_1 2020 con respecto a las modificaciones hechas.

De la Figura 20, la primer modificación fue el conjunto de perforaciones en el eslabón seguidor para los elementos de sujeción que unirán la suspensión a la plataforma de carga. La segunda modificación fue el recorte de los ejes de las ruedas para aumentar la estabilidad de la suspensión ya que las juntas entre los bogies y el eslabón seguidor presentan una rotación no deseada. Esta rotación se presenta de manera perpendicular al movimiento natural de las juntas de la suspensión, ver Figura 21. Donde \mathbf{F}_r es la fuerza de reacción de la rueda sobre el piso y \mathbf{W}_p es el peso de la plataforma.

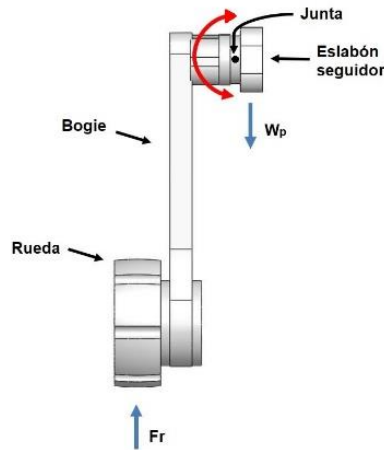


Figura 21. Diagrama de cuerpo libre de la suspensión cinemática CIEP_1 2020.

La tercera modificación fue el rediseño de la sección de la rueda central. Se rediseñó el sistema de rotación entre el eslabón del *bogie* trasero y el eslabón del *bogie* frontal. Paralelo a esta rotación, la rueda requiere que la suspensión transmita la carga del peso de la plataforma directamente a las ruedas sin transmitirla al motor y simultáneamente que el motor transmita movimiento a la rueda, ver Figura 22.

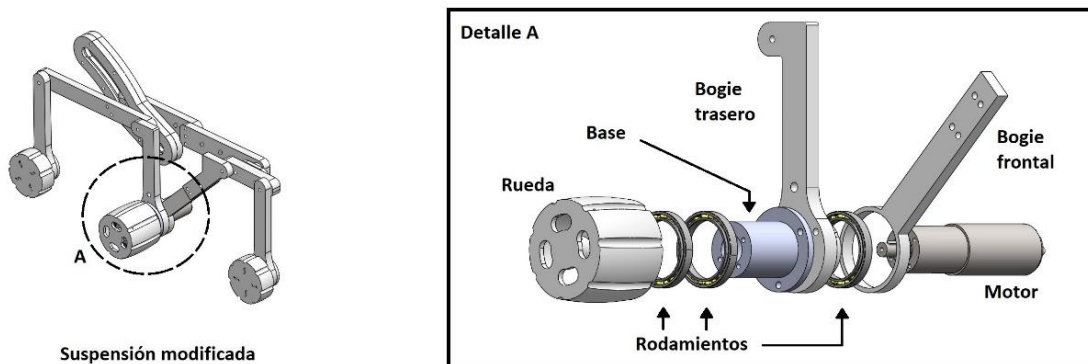


Figura 22 detalle Sección de la rueda central.

2.2. Plataforma de carga

De acuerdo con los requerimientos de diseño la plataforma debe contar con el espacio suficiente para instalar todo el equipo necesario. El equipo que suele abarcar más espacio son las tarjetas controladoras. Además, debe contar con todas las adecuaciones para los elementos de sujeción de todo el equipo, eso incluye el diseño de las piezas “uniones”, ver Figura 23, que permiten unir la plataforma con cada uno de los flancos de la suspensión cinemática.

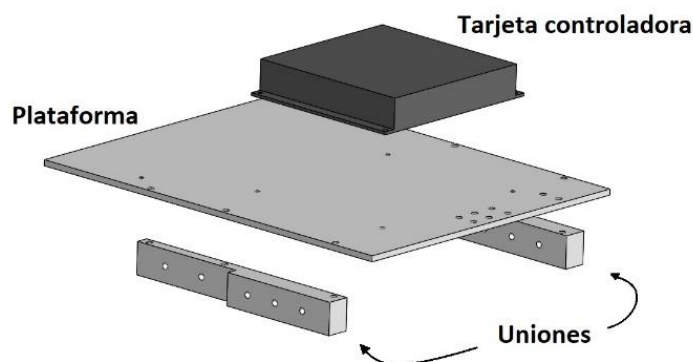


Figura 23. Plataforma de carga.

Para disminuir el peso de la plataforma se propone usar materiales ligeros como los polímeros, por ejemplo, el Nylamid posee propiedades mecánicas que permiten soportar altas cargas. Para la fabricación de la plataforma se propone usar Nylamid blanco, la Tabla 1 muestra sus propiedades mecánicas, las cuales se usarán para realizar una simulación de la plataforma sometida a una carga aproximada al peso total del equipo instalado (4 kg), con esto se verifica que no se comprometa la integridad de la plataforma. Las dimensiones de la plataforma son 35 [cm] de ancho, 45 [cm] de largo y un espesor de ¼ [in].

Tabla 1. Propiedades del Nylamid blanco

Propiedad	Dimensiones	
(ρ_r) Gravedad específica 73[°F]	1.15	
Resistencia a la tensión 73[°F]	12000 [psi]	82.737 [MPa]
Módulo de elasticidad a la tensión 73[°F]	425000 [psi]	2.9303 [GPa]
Elongación a la ruptura 73[°F]	50%	
Resistencia a la flexión 73[°F]	15 000 [psi]	103.42 [MPa]
Resistencia a la Compresión, 10% de Deformación, 73[°F]	12500 [psi]	86.184 [MPa]
Limite a la cedencia		70 [MPa]

La simulación se realizó en *SolidWorks®* y los resultados se muestran en la Figura 24 y la Figura 25 donde se observan los esfuerzos de von Mises y los desplazamientos en la dirección **Z**. De acuerdo con el criterio de falla de von Mises σ_{vm} , es posible contrastar un esfuerzo equivalente con el esfuerzo de cedencia del material σ_y , ver Ecuación 39. El esfuerzo equivalente está en función de los esfuerzos principales. Este criterio también permite generar un factor de seguridad en función de estos mismos esfuerzos, ver Ecuación 40.

$$\sigma_{vm} \leq \sigma_y$$

Ecuación 39

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{vm}}$$

Ecuación 40

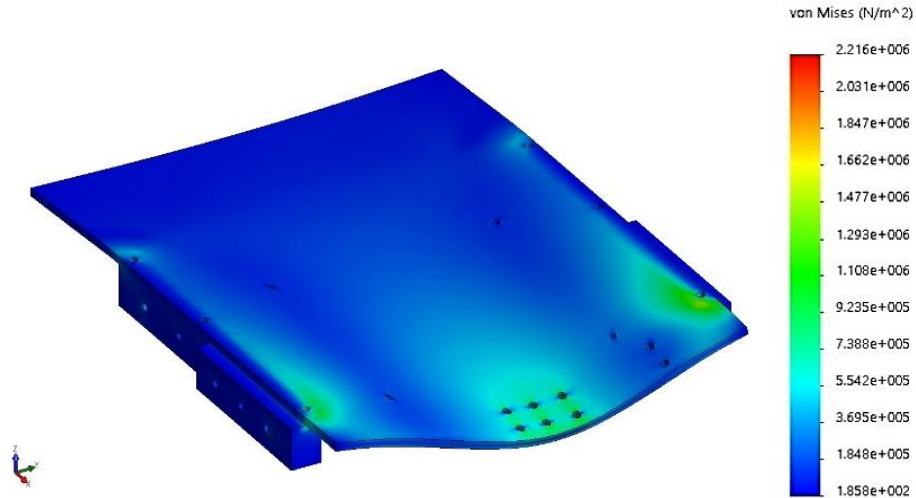


Figura 24. Esfuerzos de Von Mises en plataforma de carga, escala de deformación 78.3703.

Evaluando el valor crítico de los esfuerzos de von Mises mostrados en la Figura 24 y el esfuerzo de cedencia del Nylamid blanco en la Ecuación 39, se tiene que $2.216MPa \leq 80 MPa$. Y evaluando en la Ecuación 40 se tiene un factor de seguridad de 31. Considerando que los desplazamientos en la plataforma de carga llegan a alterar la posición del efector ubicado en el brazo robótico, en la Figura 25, se muestran los desplazamientos en la dirección **Z**, que es donde se presentan los más significativos, los cuales no alteran drásticamente la geometría de la plataforma ya que el valor máximo es de 0.5 mm.

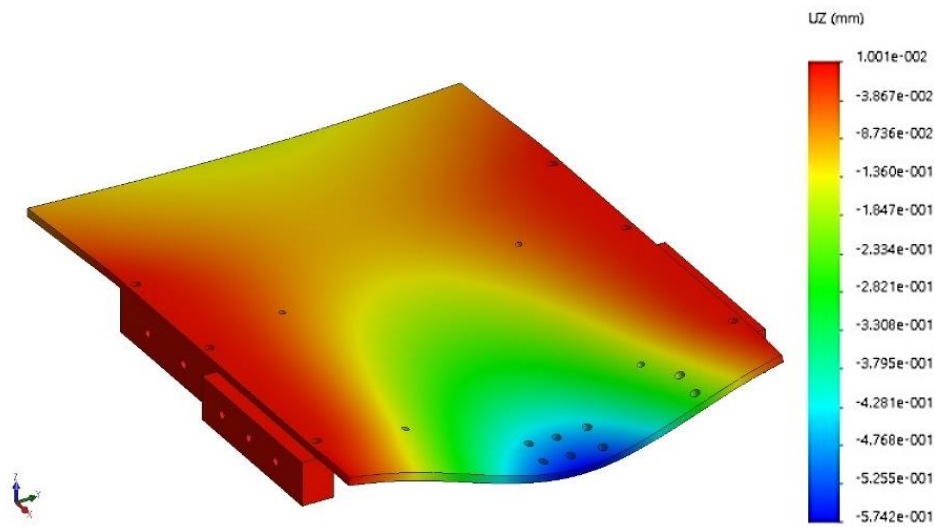


Figura 25. Desplazamientos en la dirección Z, escala de deformación 78.3703.

2.3. Diseño de brazo robótico

Continuando con el diseño del manipulador móvil de la Figura 19, el brazo robótico debe ser de un grado de libertad y debe contar con una herramienta en su efector final adecuado para una tarea de recoger un objeto. El herramental que se propone es una horquilla que permite ejecutar la tarea como un montacargas y manipular una tarima. Para mantener la orientación del efector final y evitar añadir actuadores en el extremo del brazo robótico, se integró al diseño un mecanismo de 4 barras con una configuración tipo paralelogramo que se obtuvo de una síntesis gráfica usando las posiciones del brazo y la orientación del efector final, ver Figura 26.

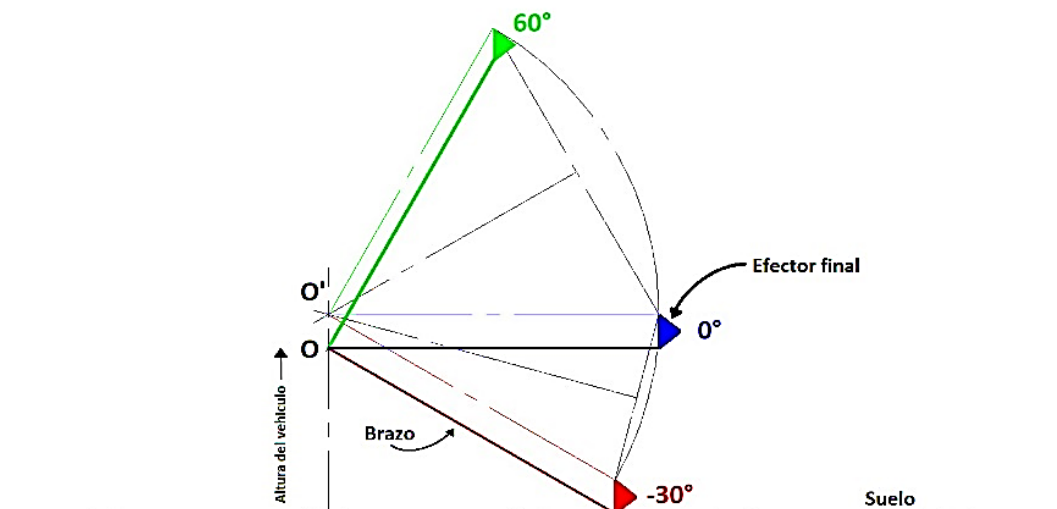


Figura 26 Síntesis gráfica.

Si bien el mecanismo del brazo no va a dar toda una revolución completa, se aplicó la ley de Grashof para asegurar que la geometría de los eslabones permita el movimiento adecuado del mecanismo. Partiendo del punto **A** y siguiendo la cadena cinemática de la Figura 27, se puede obtener la proyección horizontal y vertical del mecanismo como se muestra a continuación.

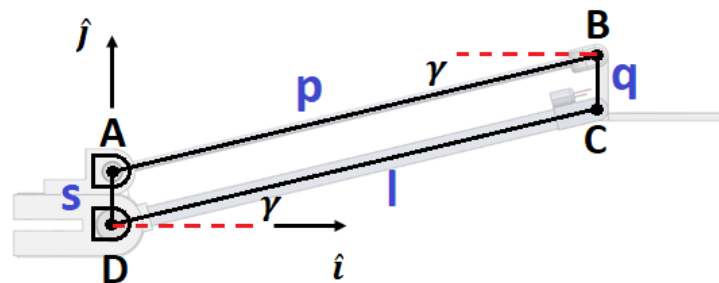


Figura 27. Diagrama mecanismo de 4 barras.

Proyecciones en \hat{i}
 Proyecciones en \hat{j}

$$p \cos(\gamma) - l \cos(\gamma) = 0$$

$$p \sin(\gamma) - q - l \sin(\gamma) + s = 0$$

Ecuación 41

Ecuación 42

Simplificando estas relaciones se tiene que $p=l$ y por lo tanto $q=s$. La ley de Grashof está descrita por $s+l \leq p+q$ y evaluando las longitudes de los eslabones $s=3.5\text{cm}$, $l=32.8\text{cm}$, $p=32.8$ y $q=3.5\text{cm}$ la relación del mecanismo cumple la ley de Grashof al quedar definida por $36.3=36.3$.

Ahora para conocer la movilidad de nuestro mecanismo, dado por m parámetros de entrada, se aplicó la ecuación de Kutzbach-Grübler, Ecuación 43.

$$m = 3(n - 1) - 2j_1 - j_2$$

Ecuación 43

Donde n es el número de eslabones, j_1 es el número de pares de un solo grado de libertad (par inferior) y j_2 es el número de pares de dos grados de libertad. En la Figura 28 se muestran las juntas del mecanismo.

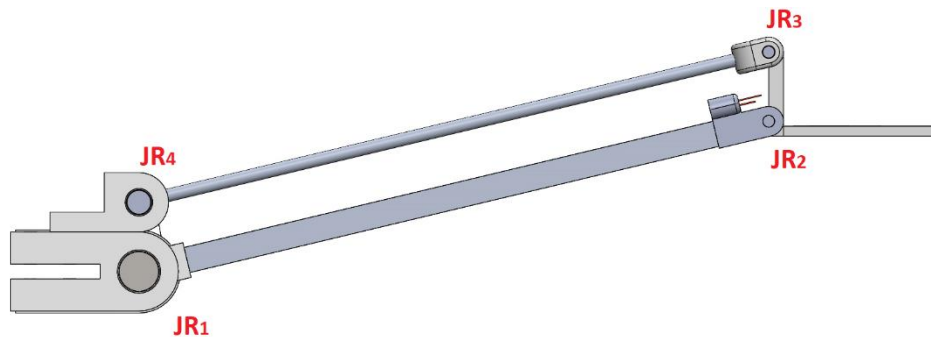


Figura 28. Identificación de juntas del mecanismo de 4 barras.

Por lo tanto:

$$n = 4$$

$$j_1 = 4$$

$$j_2 = 0$$

Por consiguiente, $m=1$, así que es necesario un solo actuador para mover el mecanismo.

Al acoplar el mecanismo de cuatro barras al eslabón principal, se comprobó el par resultante en el punto D, donde se encuentra el actuador. Las fuerzas representadas en la Figura 29 son el peso de la tarima W_T , de la horquilla W_H , del eslabón \overline{AB} con un peso W_{AB} y del eslabón principal W_{DC} . A continuación, se desarrolla un análisis

de las fuerzas presentes en el brazo al estar en posición horizontal, debido a que es el caso donde se presenta el mayor momento en el punto **D**.

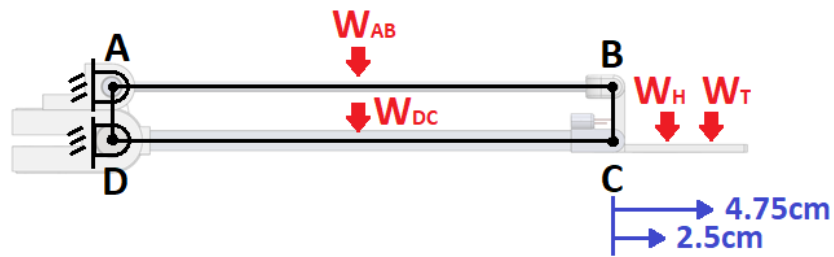


Figura 29. Diagrama de fuerzas del mecanismo 4 barras.

Tabla 2. Pesos de componentes del brazo robótico.

Pesos de componentes	
[N]	
W_{AB}	0.2735
W_{DC}	0.4
W_H	0.1499
W_T	1.4715

Entonces se analiza inicialmente la sección \overline{AB} como se muestra continuación.

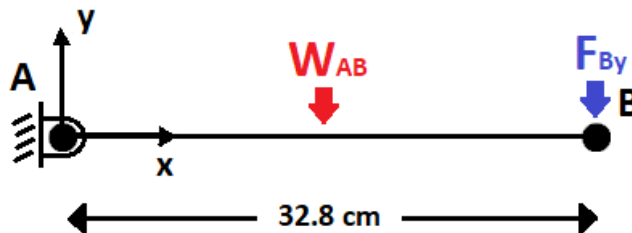


Figura 30. Diagrama de cuerpo libre de la sección AB del mecanismo 4 barras.

M_A es el momento en el punto **A** generado por las cargas en el eslabón \overline{AB} .

$$M_A = W_{AB} \frac{\overline{AB}}{2}, \quad W_{AB} = 0.2735 \text{ N} \quad F_{By} = \frac{M_A}{\overline{AB}} = \frac{W_{AB}}{2} = 0.13675 \text{ N}$$

Después se analiza la sección \overline{BC} , que representaría al efector final, en nuestro caso es una horquilla para el levante de la carga.

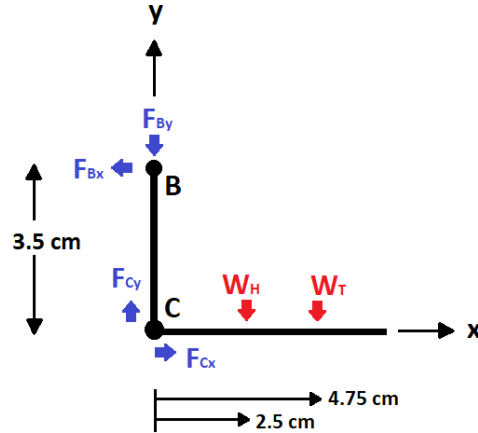


Figura 31. Diagrama de cuerpo libre de la sección BC del mecanismo 4 barras.

Del cual se analizan las componentes F_{bx} , F_{by} , F_{cx} y F_{cy} definidas como las fuerzas en la dirección X y Y en los puntos B y C .

$$\sum F_x = 0, \quad -F_{Bx} + F_{Cx} = 0; \quad \sum F_y = 0, \quad -W_T - W_H + F_{Cy} - F_{By} = 0$$

M_C es la sumatoria de momentos en el punto C generado por el peso de la tarima, de la horquilla y la componente F_{Bx} . El momento M_{Bx} es causado por la componente de fuerza en x en el punto B .

$$\sum M_C = 0, \quad M_C = M_H + M_T - M_{Bx} = 0$$

$$W_H = 0.1499N, \quad W_T = 1.4715N, \quad F_{Cy} = 1.75815N$$

$$M_{Bx} = 0.07365Nm, \quad \overline{BC} = q = 0.035m \quad F_{Cx} = \frac{M_{Bx}}{\overline{BC}} = 2.1 N$$

Las fuerzas resultantes mostradas en el diagrama de la Figura 32 permiten calcular el par de torsión en el punto D, que representa al actuador. Por lo que se tiene que el par en el punto D es $M_D = 0.58 Nm$, parámetro a comparar cuando se seleccione el actuador.

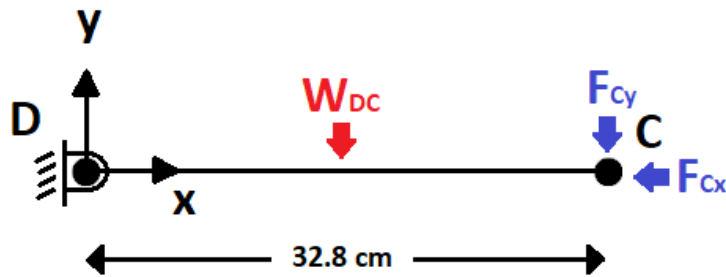


Figura 32. Diagrama de cuerpo libre de la sección CD del mecanismo 4 barras.

Con las fuerzas F_{cx} , F_{cy} y fijando uno de los extremos del brazo se realizó una simulación en *SolidWorks*® de la sección \overline{CD} del brazo robótico al soportar la carga de todo los componentes, la simulación se realizó usando un perfil con sección transversal cuadrada hueca de 13 mm de lado y la longitud de la sección \overline{CD} , el material del brazo es Aluminio 6061 y sus propiedades se muestran en Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades nominales del aluminio 6061.

Propiedades	Descripción
Densidad	2700 [kg/m ³]
Módulo de elasticidad	69 [GPa]
límite de cedencia	275 [Mpa]
Coficiente de Poisson	0.33

Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 33 y la Figura 34, donde se observan los esfuerzos de von Mises presentes y los desplazamientos en el perfil de aluminio.

En la Figura 33 se observa claramente el plano neutro al centro de la viga y la disminución de esfuerzos en el extremo del brazo. Los mayores esfuerzos se encuentran del lado de la sección fija. De acuerdo con el criterio de falla de von Mises, el esfuerzo crítico no excede el límite elástico del material $2.586MPa \leq 270MPa$, y el factor de seguridad es de 105.

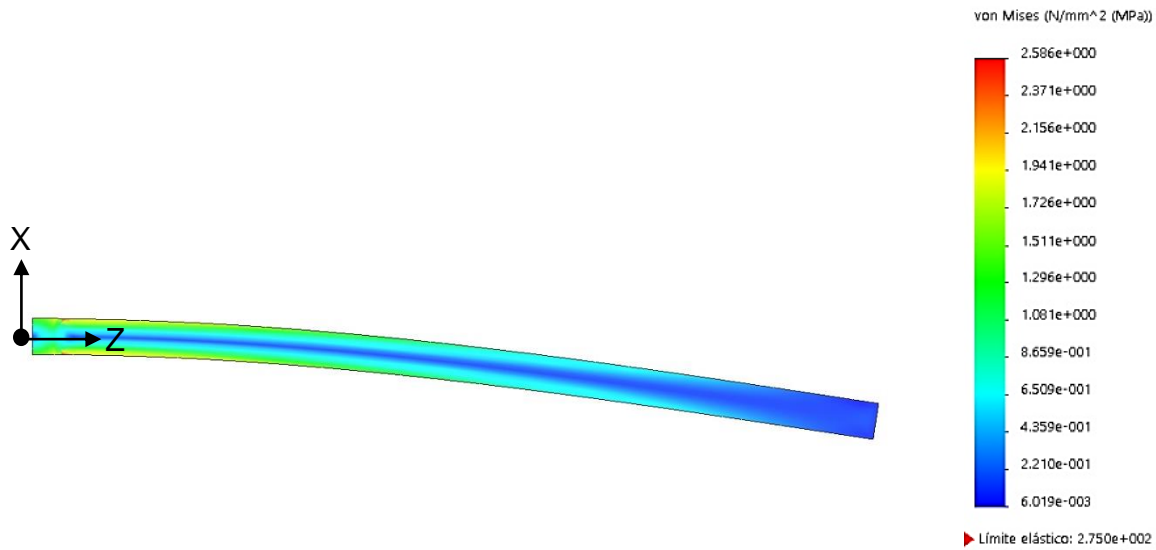


Figura 33. Esfuerzos de Von Mises, en el brazo robótico.

Por otro lado, de la Figura 34 los desplazamientos más significativos están presentes en la dirección **X**, con un valor máximo de -0.14 mm, por lo tanto, al querer ubicar el brazo robótico en una posición deseada, no se verá afectado por las imprecisiones generadas por la deformación del material.

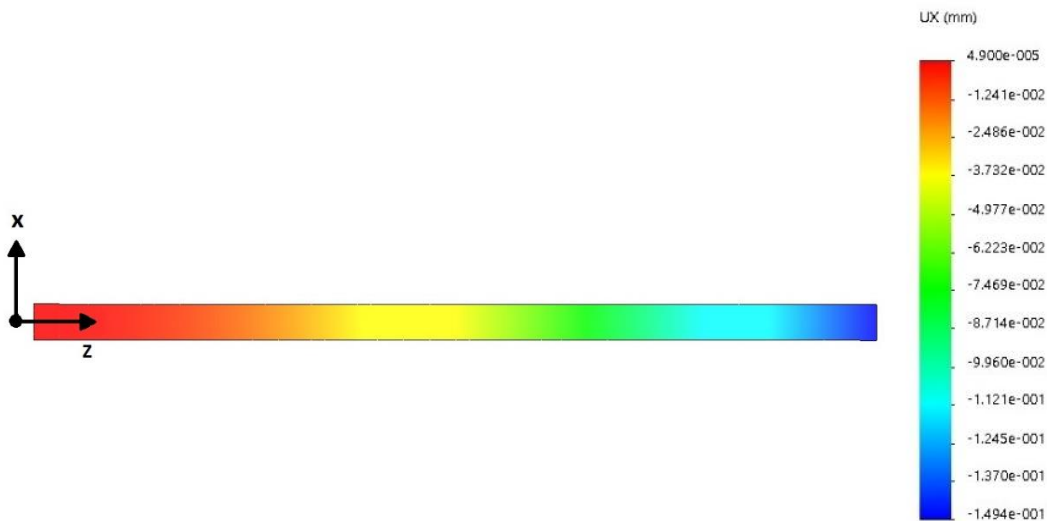


Figura 34. Desplazamientos en el brazo robótico.

En la Figura 35 se observan los componentes del ensamble del brazo robótico desarrollado previamente. Para instalar el sistema del brazo robótico a la plataforma de carga se diseñaron soportes de carga **1**, **2**, **15** y **16** para el brazo y el actuador **17**, los cuales cuentan con barrenos para tornillería como elementos de fijación. Para mejorar la rotación de las articulaciones se agregaron rodamientos **4** y **5** entre los soportes **1** y **2** y los ejes **3** y **7**. Para transmitir movimiento de los ejes **3** y **7** a los

eslabones **9** y **10** se implementó un adaptador **8** y se modificó el eje **3**. En el extremo del brazo se completaron las articulaciones del mecanismo de cuatro barras mediante las piezas **11**, **12** y **13** y el eslabón restante forma parte del herramental del brazo. Se entiende como herramental a la herramienta ubicada como efector final y en nuestro caso una horquilla **14**.

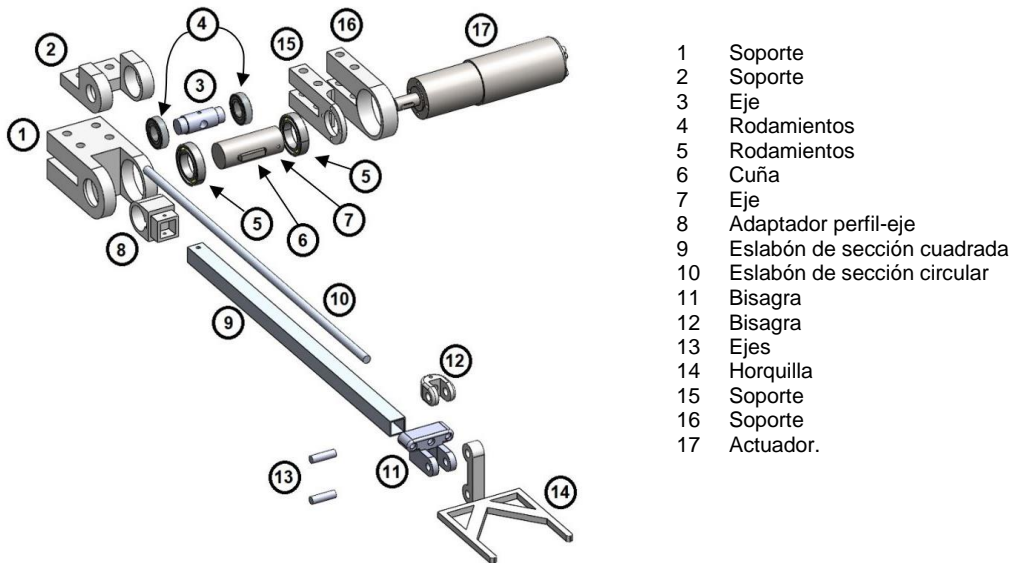


Figura 35. Vista explosionada del ensamble brazo robótico.

De la Figura 35, el eje **7** permite transmitir el movimiento del motor al brazo robótico por medio de una cuña y el eje cuenta con un barreno y un cuñero para acoplar el eje del actuador y transmitir el movimiento, como elemento de fijación se agregó un opresor, ver Figura 36.



Figura 36. Eje motor-brazo.

De la Figura 35, al componente **11** se le agregaron marcas circulares generadas por luces led mediante un prisma cilíndrico semi translucido. Esto permitirá detectar la posición del brazo mediante el control por CSM.

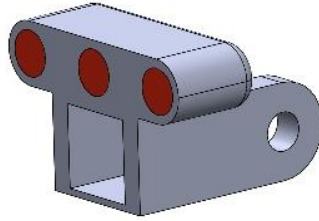


Figura 37. Marcas led.

De la Figura 35, el componente 14 es el herramental instalado en el efector final del brazo robótico. Este herramental es una horquilla de un ancho de 70mm y una longitud de 80 mm. Como se observa en la Figura 38 se utilizó unos de los eslabones para generar el herramental.

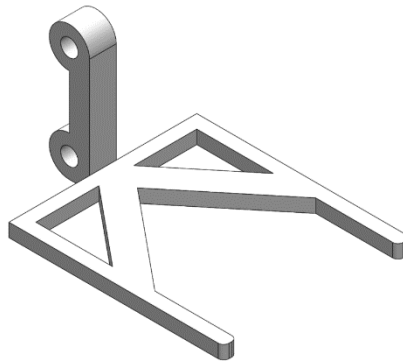


Figura 38. Horquilla.

2.4. Soportes para sistema de cámaras

Los soportes para el sistema de cámaras están basados en un arreglo de elementos estructurales en L. El material del que están hechos es de perfil cuadrado hueco de aluminio 6061 y coples en impresión 3D. La base de fijación de la cámara permite orientarla adecuadamente al rotarla en dos direcciones y desplazarla a lo largo del perfil.

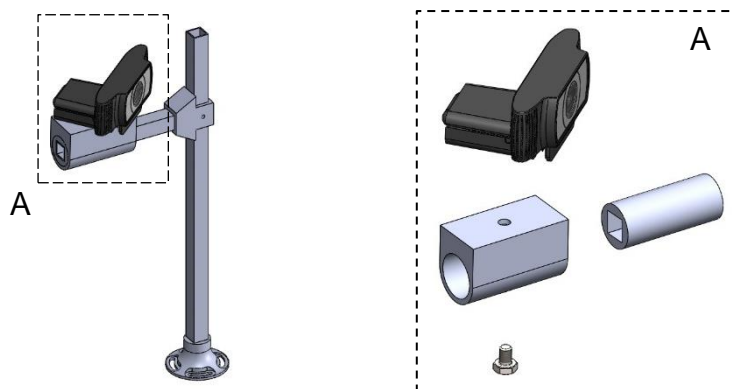


Figura 39. Sistema de cámaras.

2.5. Geometría del robot manipulador móvil

Para el control del manipulador móvil es necesario adaptar los modelos matemáticos de cada uno de los sistemas robóticos previamente descritos. Una vez adaptadas todas las variables, los modelos quedan definidos para resolver la posición del manipulador móvil propuesto.

2.5.1. Geometría del robot manipulador

La Figura 40 muestra los parámetros geométricos del robot manipulador de un grado de libertad, instalado sobre la plataforma de carga. Los parámetros son la longitud del brazo $D=328\text{mm}$, el ángulo variable θ_3 , que es el ángulo medido desde la horizontal hasta el brazo robótico y la longitud de la horquilla $Lh=80\text{mm}$. El sistema de referencia del robot (X_r, Y_r, Z_r) se ubica sobre el eje de la junta de rotación del brazo y está a una altura de 190 mm respecto del suelo.

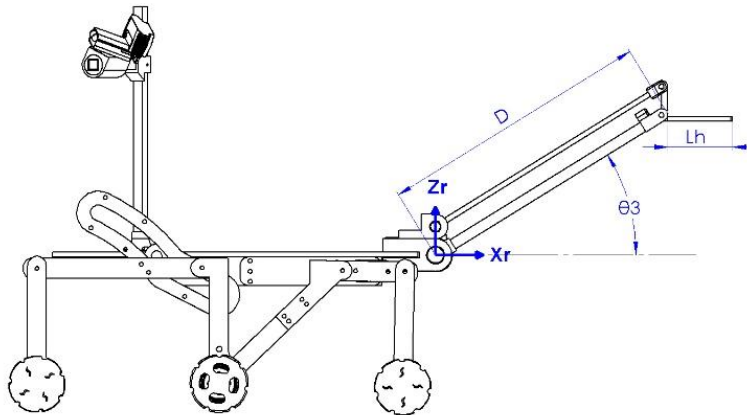


Figura 40. Características geométricas del brazo robótico, unidades en milímetros.

La posición del punto de interés **A** en el efector final de la Figura 41, está dado por las coordenadas $Lhx=7.5\text{ mm}$ y $Lhy=2.5\text{ mm}$ del sistema de referencia h ubicado en la junta que está en el extremo del manipulador.

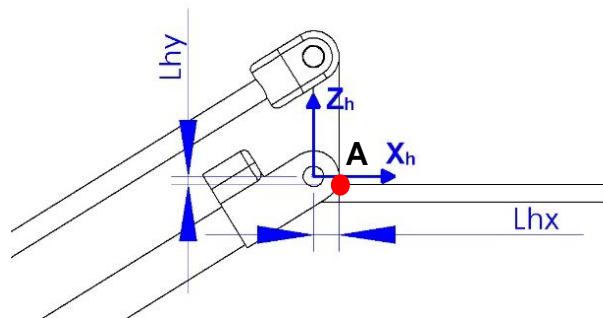


Figura 41. Coordenadas del efector final respecto a sistema de coordenadas h .

2.5.2. Geometría del robot móvil

La Figura 42 muestra las características del robot manipulador propuesto, bajo una configuración de robot móvil diferencial, los parámetros que definen este modelo cinemático en el robot propuesto son la distancia entre ruedas $2b$, donde $b=560$ mm, los ángulos de desplazamiento de la rueda central izquierda θ_1 y de la rueda central derecha θ_2 y el radio de la rueda central $D=73$ mm. La variable η corresponde a la suma de la traslación del sistema de referencia r al sistema de referencia o (270 mm) más la proyección horizontal del brazo respecto a θ_3 . Las ruedas traseras y delanteras no cuentan con un actuador, por lo que el control del robot móvil se realizara con las ruedas centrales mediante dirección diferencial.

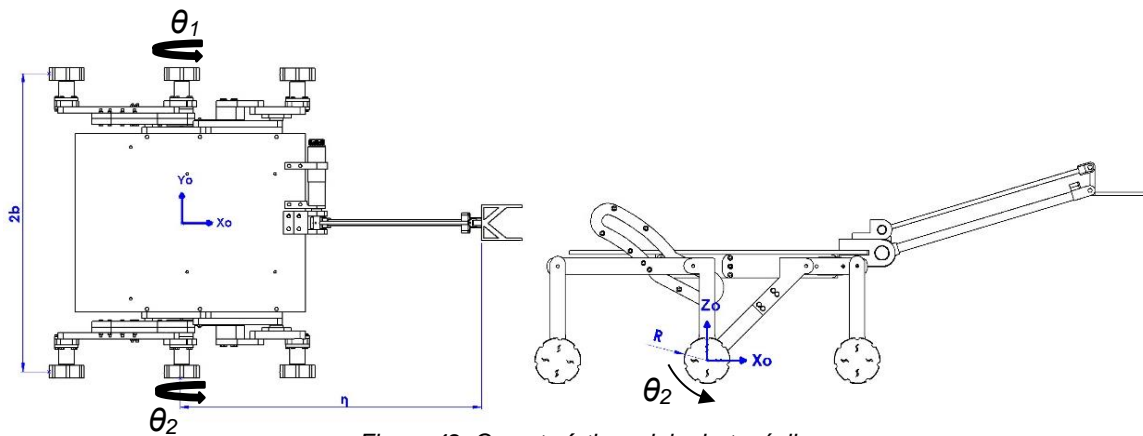


Figura 42. Características del robot móvil.

2.6. Conclusiones del capítulo

Fue necesario realizar diversas modificaciones a la suspensión CIEP_1 2020 para mejorar la estabilidad de los flancos de la suspensión, una vez implementados, debería mejorar su desempeño durante su funcionamiento. Y además se realizó la modificación de la sección de las ruedas centrales considerando implementar un actuador.

Se simplificó la operación del brazo robótico al instalar un mecanismo de cuatro barras, que mantuviera la orientación del herramienta sin añadir un actuador en el extremo del brazo, esto disminuyó el par ejercido en el actuador del brazo. El herramienta es una horquilla y es capaz de manipular una tarima sin la necesidad de añadir actuador al herramienta.

Los soportes de las cámaras permiten al usuario ubicarlas, orientarlas y fijarlas de manera que el rango de visión permita captar al objetivo con ambas cámaras.

3. Diseño del control por Manipulación en Espacio de Cámara Móvil.

En la siguiente sección se describe como se implementa el Modelo de Cámara Lineal (LCM-CSM) al modelo de Manipulación en Espacio de Cámara Móvil (MCSM). Para adaptar el modelo de LCM-MCSM a nuestro caso de estudio, se tomó en cuenta la geometría y la configuración de los actuadores del robot manipulador móvil desarrollado en la sección anterior. La finalidad de esta sección es que por medio de LCM-MCSM el robot manipulador móvil sea capaz de posicionarse para interactuar con un objetivo.

Siguiendo la metodología de la Manipulación en Espacio de Cámara Móvil MCSM mostrada en el diagrama de flujo de la Figura 43, la primera tarea del manipulador es estimar la ubicación tridimensional del objetivo, el procedimiento para realizar esta estimación se revisó en la sección 1.6.3.

Para realizar la estimación tridimensional, es necesario calcular los parámetros de visión de cada cámara usando la metodología de LCM-CSM de la sección 1.6.2 por medio de los sistemas instalados en la plataforma móvil, que son el sistema de visión y el brazo robótico.

Para iniciar esta sección se plantea la serie de posiciones que el robot manipulador ejecutará, considerando su geometría y posición de las marcas visuales instaladas sobre el efector. Luego serán detectadas por las cámaras para obtener los parámetros de visión de cada cámara.

Una vez descrita la estimación tridimensional se continúa describiendo los pasos subsecuentes del diagrama de flujo de la Figura 43. Como el cálculo de la trayectoria del robot móvil, el procedimiento de actualización de la posición del objetivo y la actualización de los parámetros de visión mediante el muestreo local de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico. Local hace referencia a la posición actual del robot manipulador móvil.

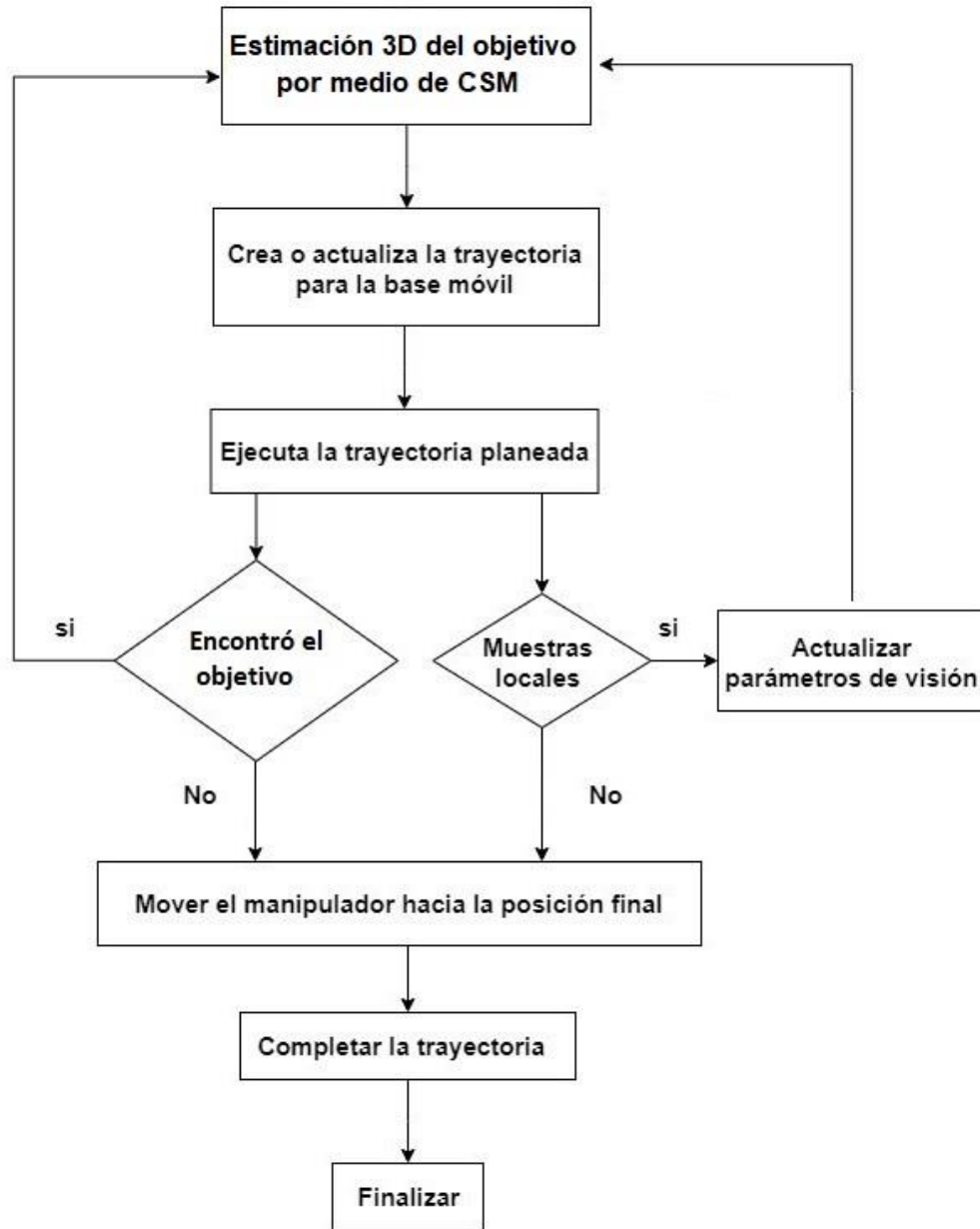


Figura 43. Diagrama de flujo la metodología MCSM.

3.1. Estimación tridimensional del objetivo

De acuerdo con la metodología de LCM-CSM, presentada en la sección 1.5, para hacer la estimación 3D inicialmente es necesario determinar los 11 parámetros de visión mostrados en la Ecuación 33 para cada cámara. Adaptando la ecuación tanto al sistema de referencia del manipulador como al sistema de referencia de las imágenes obtenidas de las cámaras, que se muestran en la Figura 44, se obtiene la Ecuación 44.

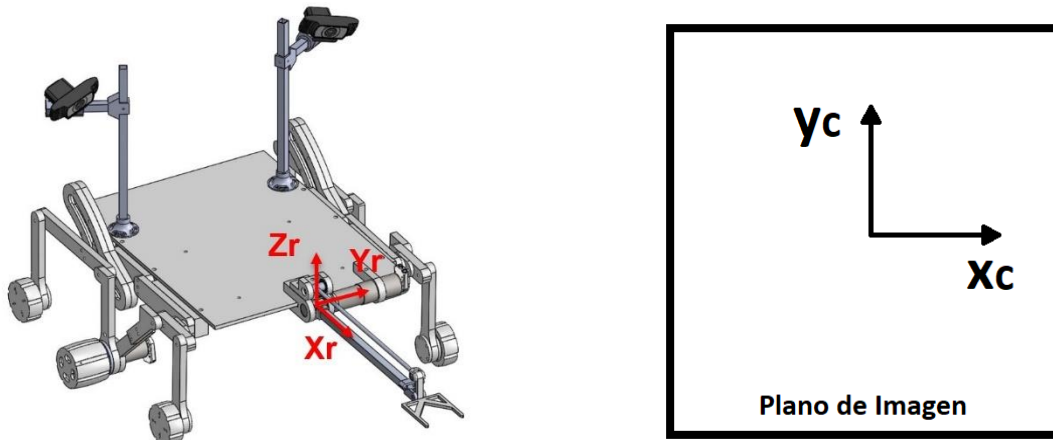


Figura 44. Sistemas de referencia para CSM.

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & Y_r & Z_r & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_r x_c & -Y_r x_c & -Z_r x_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_r & Y_r & Z_r & 1 & -X_r y_c & -Y_r y_c & -Z_r y_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_{11} \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 44}$$

Para resolver la estimación es necesario obtener el conjunto de m número de muestras en el plano de imagen de cada cámara (x_c, y_c) y esto se obtiene ejecutando una trayectoria previamente planeada en el manipulador y por medio de las cámaras detectar las marcas en el extremo del manipulador en cada posición [9], [16]. Las coordenadas (X_r, Y_r, Z_r) pertenece al sistema de referencia r ubicado en la base del brazo robótico. La trayectoria planeada que el brazo manipulador de un grado de libertad puede describir es una trayectoria semicircular en el plano Z_r, X_r y donde Y_r es constante. Por la geometría del prototipo la trayectoria semicircular abarca desde los -30° a los 40° con un paso de 5° generando 15 muestras, por lo tanto, $m=15$. El orden de las muestras se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Trayectoria angular de las muestras.

Pose	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$\theta_3(^{\circ})$	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40

Para obtener las coordenadas de (X_r, Y_r, Z_r) de las marcas visuales en cada muestra se utilizó el modelo cinemático del brazo que está definido por la Ecuación 45 y la Ecuación 46. De la Figura 45 se observan las variables $D=328$ mm, $Dx=7.5$ mm y $Dy=49$ mm.

$$X_r = D \cos(\theta_3) + Dx \quad \text{Ecuación 45}$$

$$Z_r = D \sin(\theta_3) + Dy \quad \text{Ecuación 46}$$

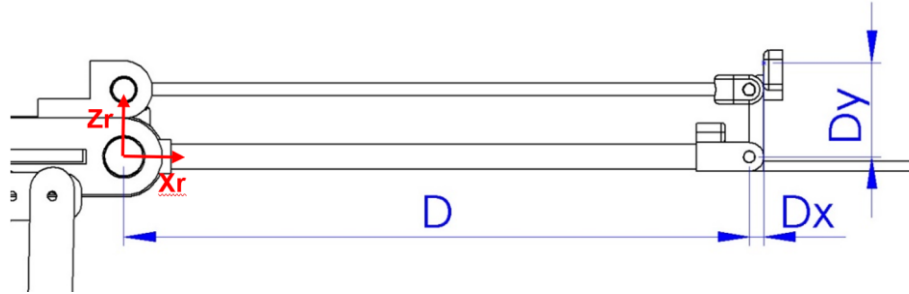


Figura 45. Posición de las marcas led.

Para resolver la Ecuación 44 mediante la solución de la Ecuación 34 es necesario definir la matriz de pesos, para el cual se utiliza la relación.

$$W = k/l_i \quad \text{Ecuación 47}$$

Para establecer la cercanía de cada muestra con respecto al objetivo. Donde l_i es la distancia euclidiana desde las posiciones de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico hasta la posición del objetivo y k es un parámetro que permite a la variable W agregar más peso a las muestras que se encuentran más cercanas al objetivo [18].

Una vez que se tiene esta información se realiza el proceso de estimación de parámetros de visión para cada cámara. Al tener el vector de parámetros de visión de la cámara derecha $P^{(1)}$, Ecuación 48, de la cámara izquierda $P^{(2)}$, Ecuación 49, y las observaciones de las marcas del objetivo en cada cámara se procede a realizar la estimación tridimensional (X_r, Y_r, Z_r) de el punto central B y los puntos auxiliares P_{aux1} y P_{aux2} pertenecientes al objetivo. Para nuestro caso de estudio, nuestro objetivo es la tarima a escala mostrada en la Figura 46. Para obtener las coordenadas tridimensionales de la Ecuación 50 se utilizala pseudo-inversa para despejar (X_r, Y_r, Z_r) .

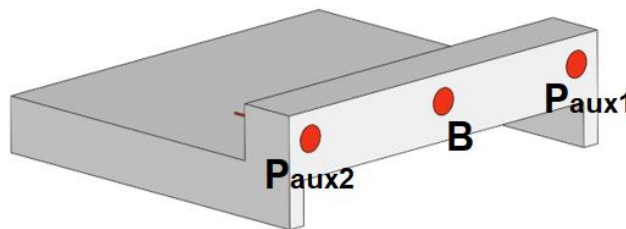


Figura 46. Marcas en la tarima.

$$P^1 = \{p_{1,1}, p_{1,2}, p_{1,3}, p_{1,4}, p_{1,5}, p_{1,6}, p_{1,7}, p_{1,8}, p_{1,9}, p_{1,10}, p_{1,11}\} \quad \text{Ecuación 48}$$

$$P^2 = \{p_{2,1}, p_{2,2}, p_{2,3}, p_{2,4}, p_{2,5}, p_{2,6}, p_{2,7}, p_{2,8}, p_{2,9}, p_{2,10}, p_{2,11}\} \quad \text{Ecuación 49}$$

$$\begin{bmatrix} x_{c1} - p_{1,4} \\ y_{c1} - p_{1,8} \\ x_{c2} - p_{2,4} \\ y_{c2} - p_{2,8} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{1,1} - p_{1,9}x_{c1} & p_{1,2} - p_{1,10}x_{c1} & p_{1,3} - p_{1,11}x_{c1} \\ p_{1,5} - p_{1,9}y_{c1} & p_{1,6} - p_{1,10}y_{c1} & p_{1,7} - p_{1,11}y_{c1} \\ p_{2,1} - p_{2,9}x_{c2} & p_{2,2} - p_{2,10}x_{c2} & p_{2,3} - p_{2,11}x_{c2} \\ p_{2,5} - p_{2,9}y_{c2} & p_{2,6} - p_{2,10}y_{c2} & p_{2,7} - p_{2,11}y_{c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 50}$$

Debido a que la posición de la horquilla se mantiene horizontalmente, para nuestro caso de estudio la posición de la tarima debe estar en horizontal para que la horquilla pueda interactuar con la tarima sin colisionar. Por lo que en la sección Trayectoria, se describe como se obtiene la posición y orientación de la tarima en el plano **XY** del robot móvil.

Al tener los puntos tridimensionales **B**, P_{aux1} y P_{aux2} pertenecientes al objetivo respecto del sistema de referencia **r** es necesario transformarlos al sistema de referencia **o**, que se encuentra ubicado en un punto intermedio en el eje de las ruedas de tracción (**Xo, Yo, Zo**). Para la transformación de coordenadas se utiliza la Ecuación 51, mediante una matriz de transformación homogénea.

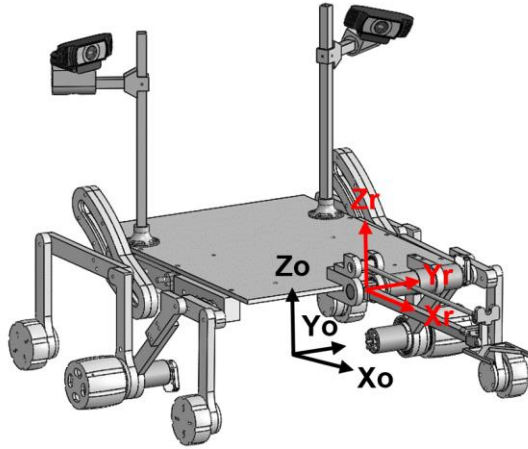


Figura 47. Sistemas de referencia en el robot manipulador móvil.

$$\begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 270 \\ 0 & 1 & 0 & 153.5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 51}$$

Al tener las coordenadas del objetivo en el sistema referencia **o** es posible plantear una trayectoria para el robot móvil que permita posicionar el efector del robot manipulador móvil de un punto arbitrario al punto **B** de la Figura 48. La trayectoria debe estar en función de la posición y orientación del objetivo, de la geometría del robot manipulador móvil y de la posición del brazo robótico.

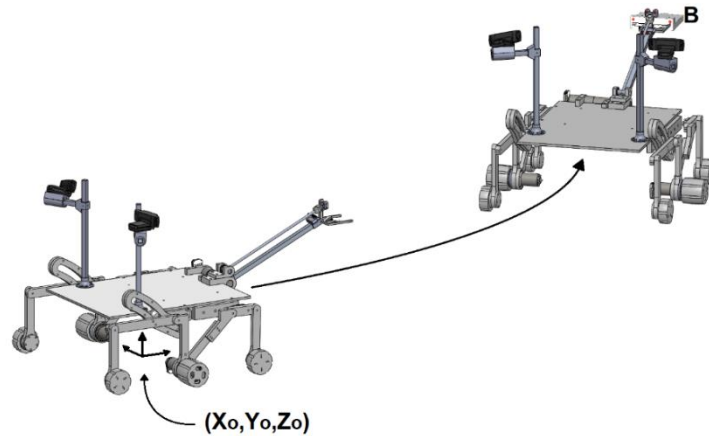


Figura 48. Posicionamiento del Robot manipulador móvil.

El diseño de la trayectoria se continua en la sección 3.2. La siguiente sección describe como se obtienen las coordenadas en el plano de imagen de todas las marcas visuales implementadas.

3.1.1. Detección de marcas

Para localizar las marcas visuales basadas en luces led implementadas en el brazo robótico mostradas en la Figura 37 y las del objetivo por medio de cámaras se siguió el método de diferencia de imágenes. Esto implica tomar una captura de la marca visual encendida y apagada, para luego contrastarlas, ver Figura 49, se recuerda que la geometría de la marcas generadas son circulares para facilitar su procesamiento. Cada una de estas imágenes es representada en una matriz de tamaño $c \times r$ donde c y r corresponden al tamaño de la imagen capturada. Para facilitar el procesamiento de imagen, la captura de imagen a color en RGB se transformó a escala de grises. Una imagen a color en formato RGB está formada por la combinación de 3 matrices de escala de intensidad de color, una por cada color base (rojo, verde y azul) y una imagen a escala de grises cuenta con una sola matriz con valores en un rango de 0 a 255, 0 es negro y 255 blanco.

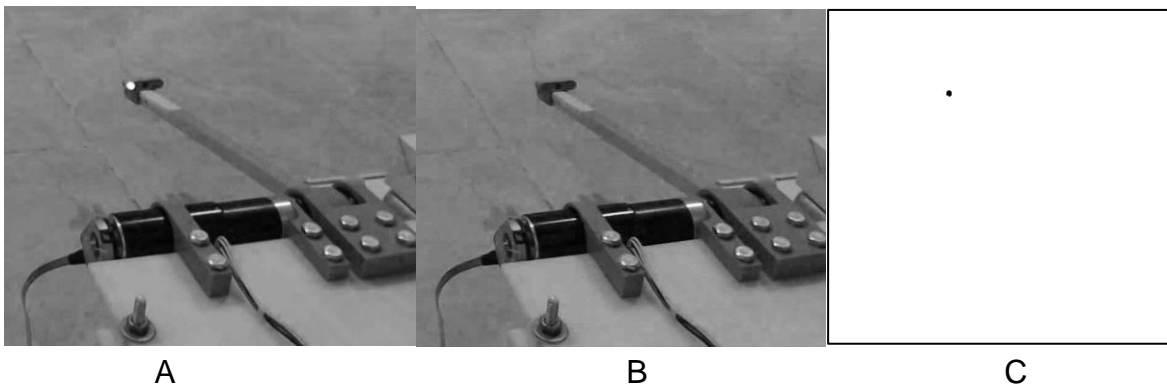


Figura 49. Detección de marcas. Imagen A led encendido, B led apagado y C diferencia de imágenes.

Para sustraer la marca visual en el brazo y representarla en una imagen I_m es necesario hacer una diferencia de la imagen con el led encendido I_{on} mostrada en la Figura 49A con respecto a la imagen del led apagado I_{off} mostrada en la Figura 49B, ver Ecuación 52.

$$I_m = I_{on} - I_{off} \quad \text{Ecuación 52}$$

Una vez que sustrajo la marca visual y que se tiene aislada en una imagen I_m , Figura 49C, es necesario obtener la coordenada del centroide de la marca en el plano de imagen. Existen diversas formas de calcular el centroide de una figura plana y esto también depende del software que se use para la implementación. En la Figura 49 se muestra el procesamiento de las imágenes en *Matlab*® y se utilizó la función “*centroid*” en la Figura 49C para obtener la coordenada de la marca.

3.2. Trayectoria

Para ubicar al manipulador móvil de manera que quede en la posición adecuada para realizar la tarea de ubicar y posicionar, es necesario plantear una trayectoria en el plano X_r, Y_r para el robot móvil diferencial tomando en cuenta la posición del efector final del manipulador en la coordenada Z_r del objetivo.

Debido a que al estimar un solo punto no te permite conocer la orientación de la tarima en el plano X_r, Y_r , se añadieron un par de marcas visuales a la estructura de la tarima. Los puntos colineales en la tarima que se muestran en la Figura 50 y que provienen de Figura 46 son el punto central B y los puntos auxiliares P_{aux1} y P_{aux2} . Que sean colineales es debido a que los tres puntos pertenecen a la geometría del objetivo esto permite el trazo de una línea recta entre los puntos P_{aux1} y P_{aux2} , a la cual se le puede determinar su pendiente y ángulo de inclinación.

De acuerdo con la geometría mostrada en la Figura 50 la condición final es que el efector del robot manipulador móvil alcance la posición B de la tarima y además se posicione perpendicular a la superficie de la tarima.

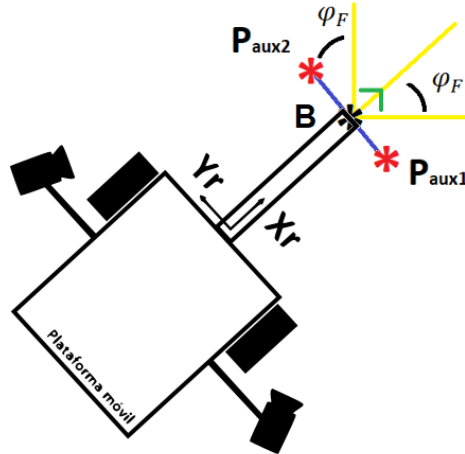


Figura 50. Robot manipulador móvil posicionado sobre la tarima.

La Ecuación 53 define el ángulo inclinación ϕ que determina la orientación de la tarima en el plano XY , dicho ángulo está medido desde el eje X . ΔX y ΔY es el diferencial de la posición de los puntos P_{aux1} y P_{aux2} respecto al sistema de referencia r del robot. Al posicionar la tarima dentro del rango visual de las cámaras, ΔX y ΔY pueden tomar valores positivos o negativos determinando así la orientación de la pendiente. En función del rango visual de las cámaras, la orientación de la pendiente ϕ posee en un rango de ± 45 , por lo que la trayectoria del robot móvil puede tender a rotar tanto a la izquierda como a la derecha o moverse en línea recta.

$$\phi_F = \tan^{-1} \left(\frac{\Delta Y}{\Delta X} \right) \quad \text{Ecuación 53}$$

Una vez que se tiene la posición y orientación del objetivo se procede a calcular la trayectoria que el vehículo necesita realizar para posicionar al efector final en el punto B . La trayectoria se obtiene mediante un polinomio de cuarto orden que genera una trayectoria con curvas suaves que permiten al robot seguirla sin realizar movimientos bruscos, el polinomio se muestra en la Ecuación 54.

$$Y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad \text{Ecuación 54}$$

Para lograr que el manipulador móvil se posicione, el polinomio debe cumplir con al menos 5 condiciones de frontera, ver Ecuación 55-Ecuación 61, que permitan resolver el sistema de ecuaciones lineales para los 5 parámetros del polinomio. Donde la primera y segunda condición son la posición y la orientación inicial, $X = 0$, $Y = 0$, $\phi = 0$. La tercera es la coincidencia de curvatura final e inicial u_0 . La cuarta es la posición final, $X = X_C$, $Y = Y_C$ y la quinta es la orientación final ϕ_f . La Ecuación

60 y la Ecuación 61 son restricciones geométricas complementarias de la Ecuación 58. El punto (X_c, Y_c) es la ubicación donde se debe posicionar el sistema de referencia \mathbf{o} del robot móvil para que el efector del robot manipulador móvil quede orientado en φ_f [19].

$$Y(0) = 0 \quad \text{Ecuación 55}$$

$$\left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=0} = \tan(\varphi) \quad \text{Ecuación 56}$$

$$\left. \frac{d^2Y}{dX^2} \right|_{X=0} - u_0 = 0 \quad \text{Ecuación 57}$$

$$Y(X_c) - Y_c = 0 \quad \text{Ecuación 58}$$

$$\left. \frac{dY}{dX} \right|_{X=X_c} = \tan(\varphi_f) \quad \text{Ecuación 59}$$

$$X_c + \eta \cos(\varphi) - X_B = 0 \quad \text{Ecuación 60}$$

$$Y_c + \eta \sin(\varphi) - Y_B = 0 \quad \text{Ecuación 61}$$

Para obtener η , ver Ecuación 62, es necesario sumar la distancia desde el origen en el sistema 'o' hasta el sistema 'r' (270 mm) en la dirección X_o , más la proyección horizontal del brazo al estar ubicado en la coordenada Z_r del objetivo y la geometría del herramental, $L_{hx}=7.5$ mm, ver Figura 41 [19].

$$\eta = 270 + D \cos(\theta_3) + L_{hx} \quad \text{Ecuación 62}$$

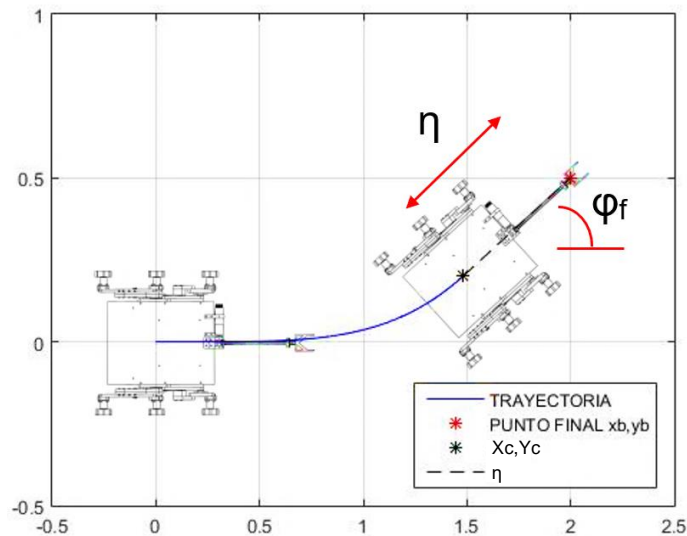


Figura 51. Trayectoria para objetivo en $(2, 0.5, -0.003)$ respecto a (X_o, Y_o, Z_o) con una orientación de 30° , donde X_c, Y_c es la posición del robot móvil al terminar la trayectoria y η es una compensación debido a la geometría del robot.

Para que el robot describa la trayectoria de la Figura 51, es necesario transformar la trayectoria plana en incrementos angulares para la rotación de las ruedas, esto es posible mediante la Ecuación 5, que está definida por la geometría del robot y el radio de curvatura, que puede ser obtenido mediante la Ecuación 63. El radio de curvatura proviene de las fórmulas del triedro de Frenet-Serret que definen como una curva “**y**” traza su trayecto en el espacio, para nuestro caso de estudio solo se aplica en dos dimensiones ya que el robot móvil se desplaza en el plano **XY**, ver Figura 52 [20].

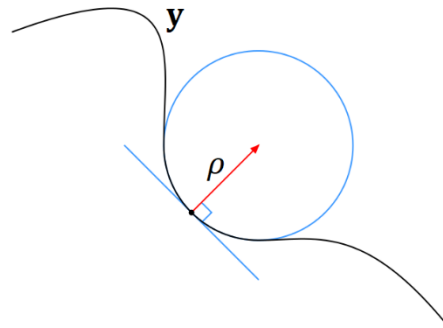


Figura 52. Radio de curvatura.

$$\rho_c = \frac{(1 + y')^{\frac{3}{2}}}{y''} \quad \text{Ecuación 63}$$

Despejando $\dot{\theta}_I$ y $\dot{\theta}_D$ de Ecuación 5, donde $\dot{\theta}_I = \dot{\theta}_1$, $\dot{\theta}_D = \dot{\theta}_2$ y v_s es la velocidad tangencial a la curva instantánea, se tiene que:

$$\dot{\theta}_1 = \frac{v_s}{R} \left(1 + \frac{b}{\rho_c} \right) \quad \text{Ecuación 64}$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{v_s}{R} \left(1 - \frac{b}{\rho_c} \right) \quad \text{Ecuación 65}$$

En la Figura 53 se observa una simulación del modelo CAD del manipulador móvil propuesto que sigue la trayectoria de la Figura 51 para alcanzar la posición de la tarima ubicada en (2,0.5, -0.003) [m] con una orientación de 30° respecto del sistema de referencia \bullet inicial.

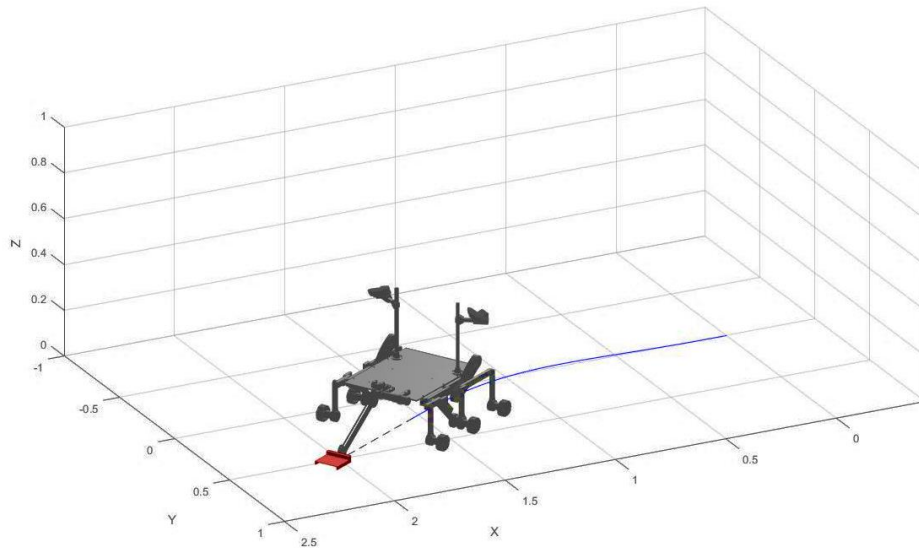


Figura 53. Simulación del manipulador móvil siguiendo una trayectoria para alcanzar la posición de la tarima.

Durante la ejecución de la trayectoria el manipulador móvil debe actualizar la posición de la tarima ya que las primeras estimaciones al estar más alejadas de la zona de muestreo son menos precisas. Por lo tanto, es necesario definir puntos de control para realizar la estimación de la posición actual y de ser necesario una actualización de parámetros de visión ejecutando nuevamente la trayectoria planeada del brazo. Cuando se alteran los sistemas que generan el CSM estándar para el robot manipulador móvil, como lo son la posición de las cámaras o el sistema del brazo robótico, es necesario realizar una actualización de los parámetros visión y evitar errores en las estimaciones.

Al tener la posición actualizada se recalcula el polinomio de cuarto orden donde se establecen las condiciones iniciales en (0,0) y orientación 0° y solo se actualizan las condiciones de frontera finales, por lo que en cada evaluación es un origen nuevo y se calcula una nueva trayectoria. Al generar un nuevo origen, se evita usar la posición final del robot generada al ejecutar parcialmente la trayectoria. Ésta posición puede no ser del todo precisa debido a los posibles errores en el comportamiento del robot al ejecutar la trayectoria [9], [10].

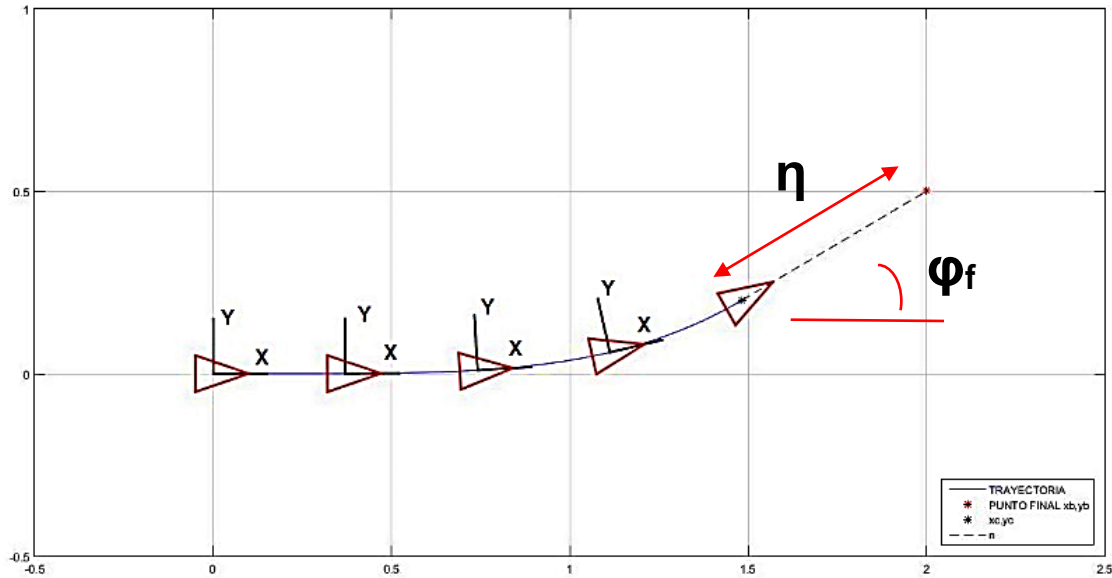


Figura 54. Actualización de la ubicación del objetivo.

Es necesario definir en cada punto de actualización al sistema de referencia “o” como un nuevo origen, debido a que la información del desplazamiento previo es susceptible a imprecisiones que pueda presentar el comportamiento del robot al desplazarse. Es por esto, por lo que se recomienda la ejecución parcial de la trayectoria, para dar lugar a actualizaciones consecutivas de la posición del objetivo en lugar de realizar la trayectoria completa desde el origen inicial. Para la segmentación de la trayectoria se considera que entre más actualizaciones se realicen más precisa será la trayectoria y también que entre más pausas se realicen más tiempo tomará completar la trayectoria [9], [10].

3.3. Conclusión del capítulo

Este capítulo describe como mediante la implementación del Modelo de Cámara Lineal a la Manipulación en Espacio de Cámara Móvil (LCM-MCSM) es posible controlar la posición y orientación del robot manipulador móvil que se desarrolló en la sección 2. Esto es posible ya que la metodología de LCM-MCSM permite actualizar la posición de destino y compensar los errores que suelen presentar este tipo de robots.

Para el robot manipulador móvil propuesto quedaron 3 variables de control, $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \theta_3\}$, las primeras dos determinan la posición y orientación del manipulador móvil en el plano XY y la tercera define la posición del brazo en la coordenada Z . Gracias al mecanismo de cuatro barras del brazo robótico se restringe la rotación en el eje X y Y del herramienta de la Figura 55. Y debido a las rotaciones θ_1 y θ_2 de las ruedas del robot móvil se generan la rotación en el eje Z .

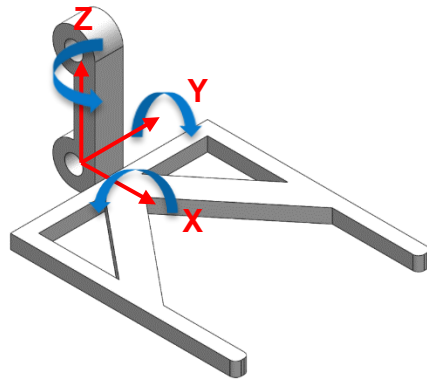


Figura 55. Orientación del herramental.

El diseño de la trayectoria del robot móvil permite que el efector final se posicione para interactuar con el objetivo propuesto (tarima). Esto se comprobó mediante la simulación de la trayectoria generada por el polinomio de cuarto orden y la cinemática tanto del vehículo diferencial como del brazo robótico en condiciones ideales.

4. Implementación, pruebas experimentales y resultados

4.1. Implementación

La construcción del modelo conceptual de la Figura 19, se fabricó con base a las características descritas en el capítulo de diseño mecánico del manipulador móvil. Es importante resaltar que para la implementación de este trabajo se hace uso de la suspensión cinemática CIEP_1 2020 previamente fabricada en impresión 3D.

4.1.1. Implementación estructural

Para la implementación estructural del manipulador móvil se inició con la fabricación de la plataforma de carga y las piezas que unen el flanco derecho e izquierdo de la suspensión cinemática CIEP_1 2020. De manera paralela a esto, se modificaron los eslabones seguidores de la suspensión para integrarla a la plataforma. Estas operaciones de fabricación se describen a continuación.

La plataforma de carga y las uniones se fabricaron en Nylamid blanco, mediante técnicas de corte convencional. Además, se le añadieron todas las operaciones de taladrado necesarias para instalar cada uno de los sub-sistemas.

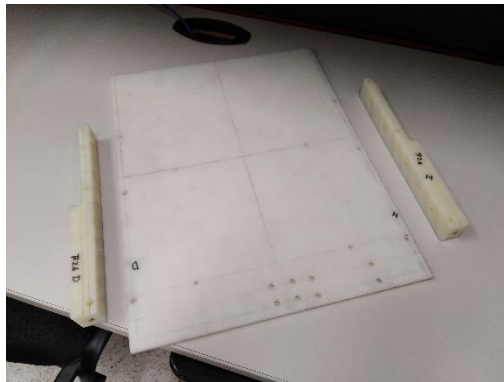


Figura 56. Manufactura de plataforma de carga.

Todas las modificaciones de la suspensión, ver Figura 57, se realizaron en impresión 3D con PLA, bajo las mismas características de impresión del diseño original para no comprometer la integridad estructural. Los eslabones de la sección transversal se imprimieron con un patrón de relleno tipo *honeycomb* tal como se fabricaron los originales con una densidad del 5% y el espesor de las paredes de 2mm.

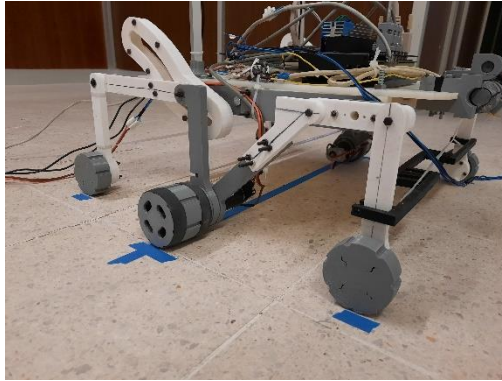


Figura 57. Suspensión CIEP_1 2020 adaptada al manipulador móvil.

Una vez que se tenía el ensamble del robot móvil se trabajó en el brazo manipulador, ver Figura 58, y los elementos estructurales para ubicar las cámaras. Donde los componentes del brazo que no son de aluminio se imprimieron en PLA con una densidad del 100%. De igual manera los componentes de los soportes para las cámaras son piezas sólidas de PLA.



Figura 58. Brazo manipulador implementado.

4.1.2. Implementación electrónica

Para controlar los dos motores del robot móvil y el motor del brazo, se instaló una tarjeta controladora. La tarjeta controladora es una *Galil DMC-2142* con un amplificador AMP-20540, ver Figura 59, esta combinación de dispositivos permite controlar 4 motores y operarlos como servomotores ya que cuentan con retroalimentación de encoder para cada motor. Los motores pueden ser con escobillas y sin escobillas. La alimentación máxima a cada motor es de 12 volts a 1 A y a su vez la tarjeta requiere de una alimentación de 20 a 80 volts con una corriente de 10.

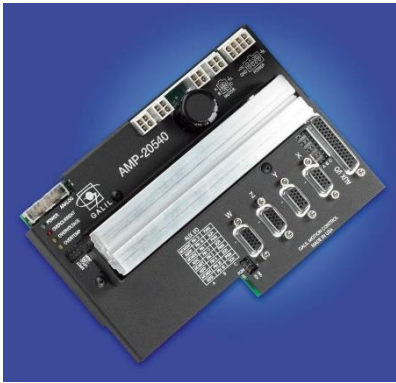


Figura 59. Tarjeta 2142 y AMP 20540 Galil®.

Para realizar la conexión de la tarjeta a cada uno de los tres actuadores que se pretenden instalar, se siguió el diagrama de la Figura 60, donde la fuente de poder que se implemento fue una SP-320-24 con salida de 24 volts y 10 Amperes DC por medio de un cable calibre 16. La tarjeta es operada mediante una PC vía ethernet.

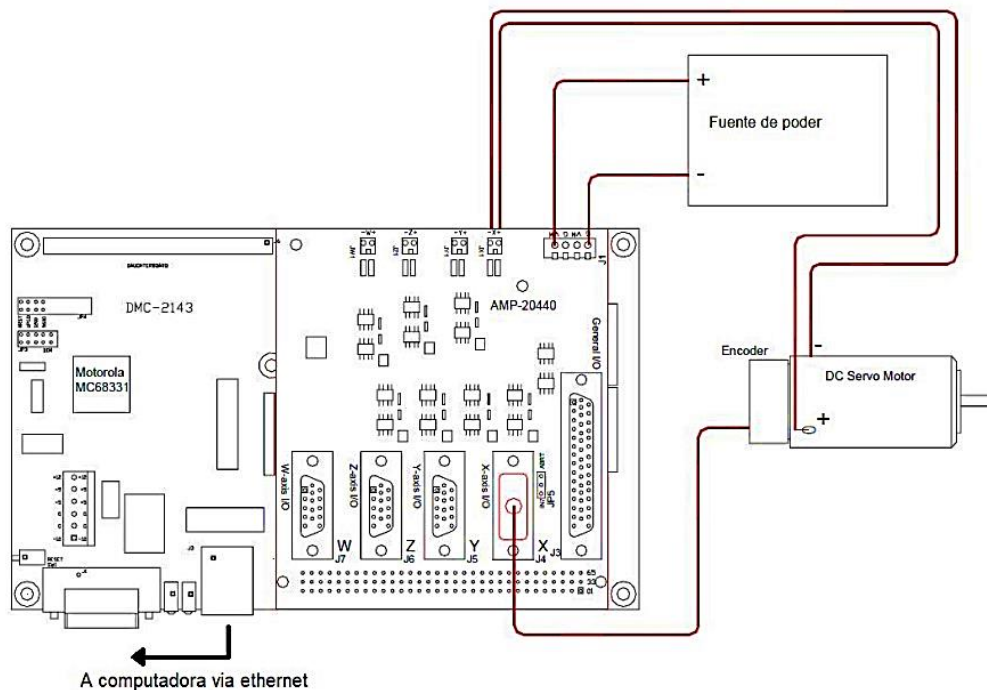


Figura 60. Diagrama de conexiones para el amplificador AMP-20540 Galil®.

Los motores eléctricos que se instalaron son motores con reductor *Maxon*® de 12v DC capaces de soportar la carga de sus respectivos sistemas, sus características se muestran en la Tabla 5. El sistema con las cargas más críticas es el del robot móvil por lo que en la sección Anexo A se calculó el toque necesario para los motores de las ruedas y en la sección de diseño mecánico se encuentra el par

ejercido con el brazo robótico. El motor solo cuenta con dos terminales las cuales se conectan directamente al amplificador por medio de cable calibre 16.

Tabla 5. Características motores Maxon.

Reductor	
Diámetro	32 mm
Torque	4-8 Nm
Versión	Metal High Power, Planetario GP 32
Motor	
Diámetro	35 mm
Potencia	90 watts
Escobillas de grafito	

Los encoders instalados son encoders incrementales marca CUI modelos AMT102 que cuentan con resolución variable, la cual se fijó en 2048 pulsos por revolución (PPR) e índices 8 pulsos por revolución, su diagrama de conexión se muestra en la Figura 61. Y en la Figura 62 se puede observar el diagrama de distribución de los conectores tipo DB15 ubicados en la tarjeta controladora para conectar los encoders.

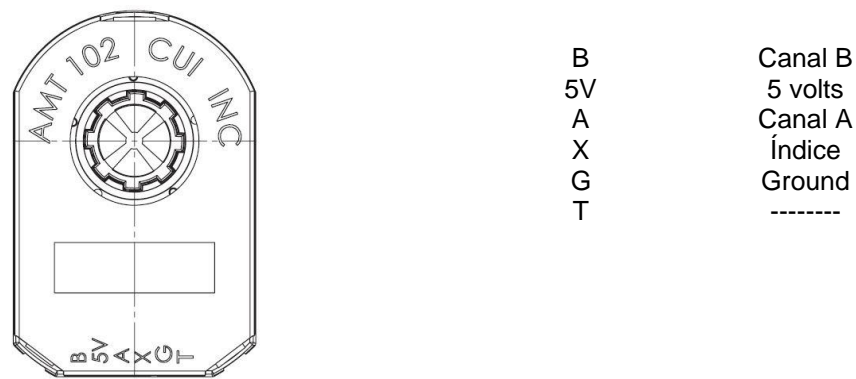


Figura 61. Encoder CUI AMT102.

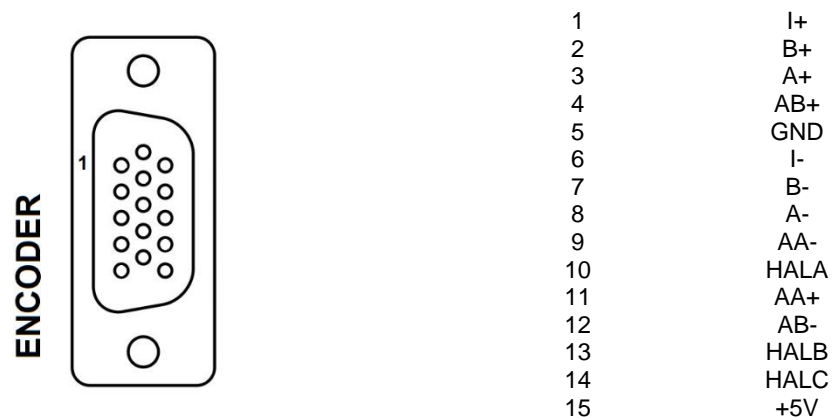


Figura 62. Conector para encoder en AMP-20540

Como elementos de seguridad al control de los motores, se instalaron interruptores limitadores de carrera en el eje del brazo ya que este es el único actuador con limitación de topes físicos que evitan la rotación de 360°. Para esto se extendió la longitud del eje y se añadieron dos brazos al eje para activar cada uno de los interruptores de acuerdo con las posiciones de restricción del brazo, ver Figura 63. Los interruptores son dos micro interruptores modelo D2F-L, con terminales C-NO-NC.

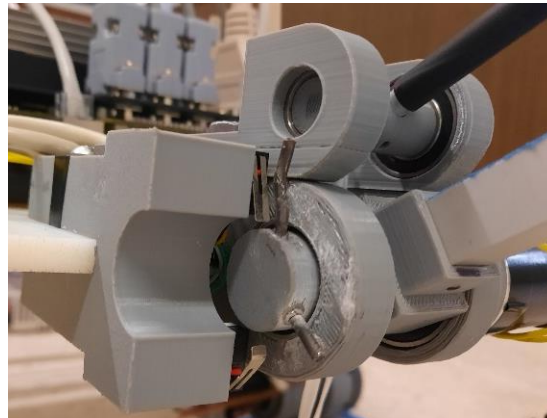


Figura 63. Interruptores limitadores de carrera del brazo.

La Figura 64 muestra la bahía de conexiones digitales auxiliares para el control de los ejes con la tarjeta controladora, la cual es un conector DB44. De este conector solo se va a utilizar los limitadores del eje Y, el cual corresponde al brazo robótico. Los pines utilizados corresponden al interruptor de avance y al de reversa, para activarlos se conectan a tierra por medio de los interruptores.

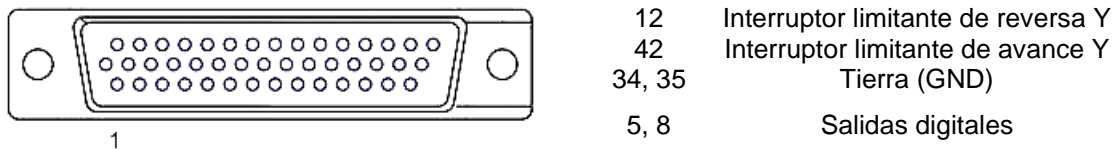


Figura 64. Conector Aux I/O.

Para detectar la posición del brazo, se instalaron marcas visuales generadas por luces tipo led, ver Figura 65, que se energizan mediante los pines 5 y 8 de la Figura 64, designadas como salidas digitales.

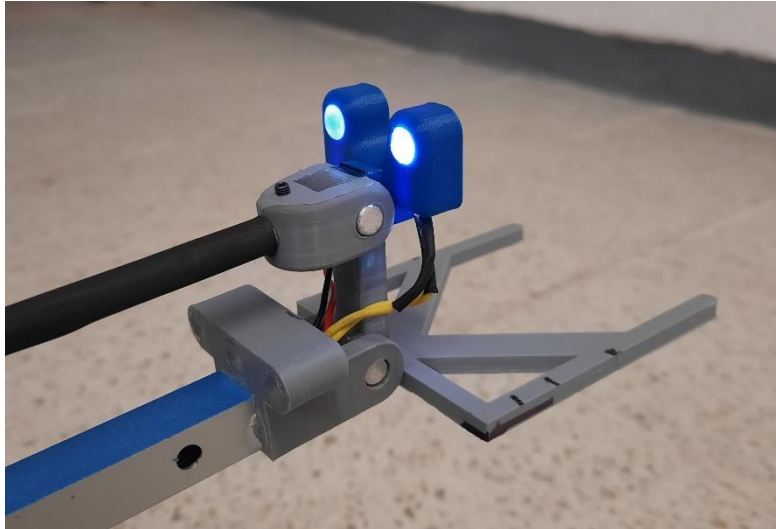


Figura 65. Marcas Led en el brazo robótico.

Por último, las cámaras instaladas son dos Logitech HD Pro Webcam c920, Full HD 1080p a 30 cuadros por segundo, 15 Mega Pixeles y conexión USB 2.0. Estas cámaras brindan una visión panorámica que aumenta el alcance visual del manipulador móvil. La imagen configurada en las cámaras es de un tamaño de 1920 pixeles por 1080 pixeles.



Figura 66. Webcam Logitech c920. Tomado de www.logitech.com.

La fuente de poder que alimenta la tarjeta controladora no se encuentra a bordo del manipulador móvil, ni tampoco la computadora, por lo que se depende de una línea de comunicación para energizar y controlar el robot. Esto se debe a que la fuente de poder se alimenta de una toma fija de 110v AC y la computadora es una laptop convencional, equipo suficiente para la validación de este prototipo. La conexión entre la laptop y la tarjeta controladora se realiza mediante ethernet y la conexión de las cámaras son mediante USB, ver Figura 67.

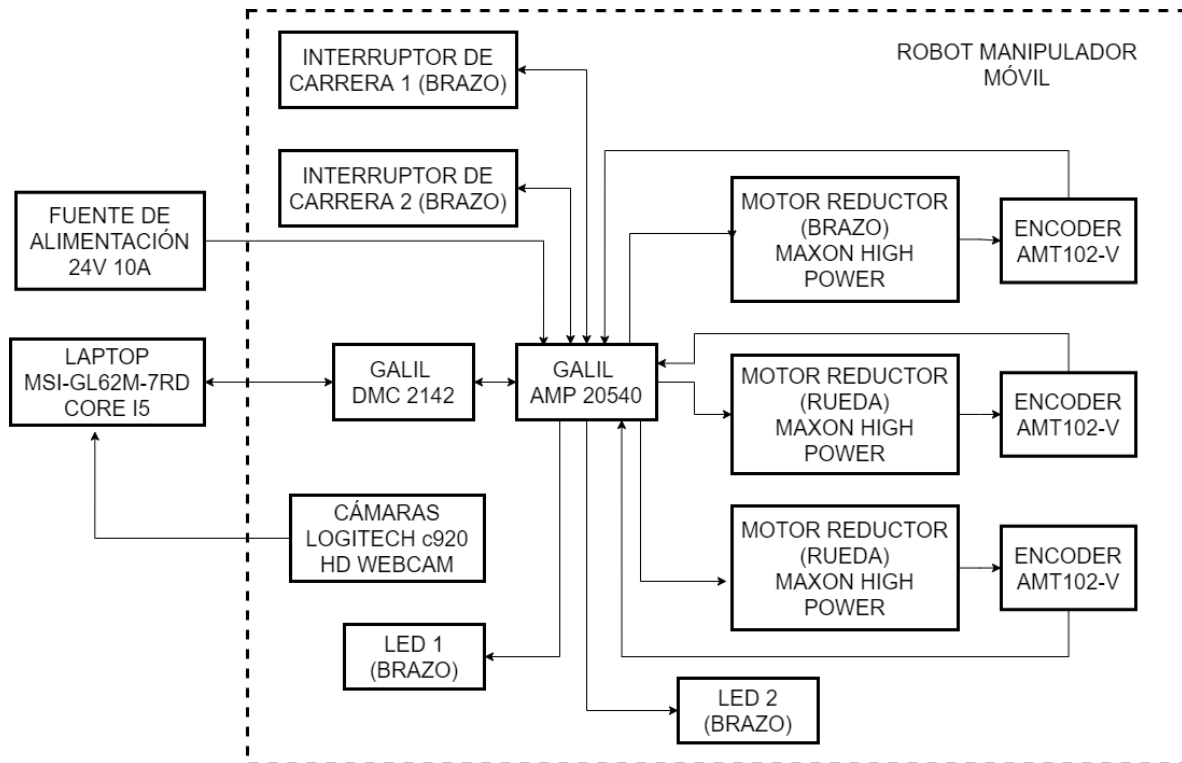


Figura 67. Diagrama conexiones general.

4.2. Pruebas experimentales

La pieza objetivo que se pretende manipular es una tarima a escala, a la cual se le implementaron tres marcas visuales generadas por luces led independientes, lo cual permite encender y apagar cada una individualmente. Para energizar y operar la tarima se implementó un microcontrolador *NI myRIO*® la cual cuenta con conexión wifi. La Figura 68 muestra la implementación de la tarima fabricada en impresión 3D con PLA y el microcontrolador usado.

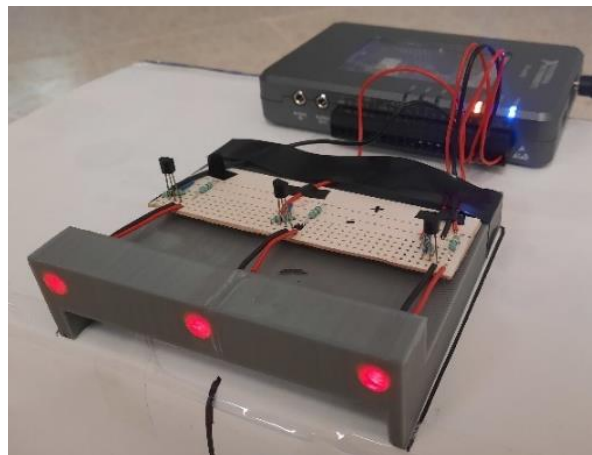


Figura 68. Implementación de la tarima.

Para ubicar la tarima en el espacio de trabajo es necesario considerar que debe estar dentro del rango visual de las cámaras al menos para la primer estimación de la posición de la tarima y poder iniciar la ejecución del proceso de control por Manipulación en Espacio de Cámara Móvil mostrado en la Figura 43.



Figura 69. Capturas de cámaras, imagen A cámara izquierda e imagen B cámara derecha.

La trayectoria que el manipulador móvil recorre para alcanzar el objetivo debe atravesar obstáculos. Estos obstáculos están diseñados en función de las capacidades del diseño de la suspensión. Los obstáculos propuestos son rampas creadas en base a prismas con una geometría trapezoidal de una altura de 12 mm.

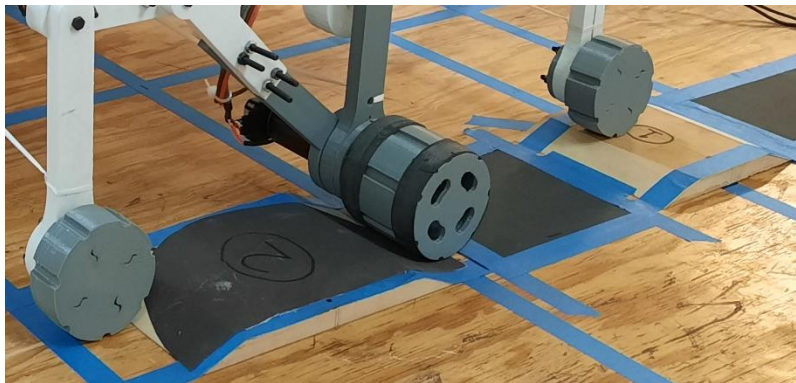


Figura 70. Obstáculos/rampas.

Para que la horquilla interactúe de manera correcta con la tarima, ver Figura 71, es necesario que la horquilla ingrese en su totalidad para aprovechar toda su superficie de contacto y mantener centrada la carga entre las cuchillas. Es necesario que el contenido de la tarima esté balanceado al centro de la pieza, para evitar que la tarima se vuelque durante el traslado en terreno irregular.

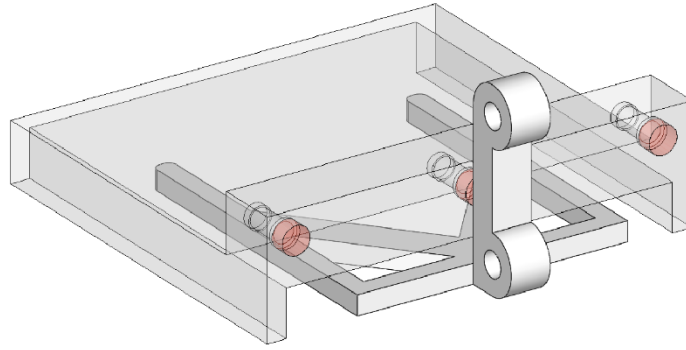


Figura 71. Enganche horquilla-tarima.

De no estar balanceada la carga de la tarima, la tolerancia para que la horquilla levante la tarima sin exponerla a una volcadura, es cuando la horquilla tenga una orientación de $\pm 10^\circ$ con respecto a la tarima. La tolerancia en la posición debe ser una diferencia de 5 mm en **X** y 4 mm en **Y**, ver Figura 72 e Figura 73.

De acuerdo con la Figura 73, para la tolerancia en la posición **Z** se tiene un margen de 3.5 mm entre la superficie de la ranura de la tarima y la horquilla. El mecanismo de cuatro barras está diseñando para mantener en posición horizontal a la horquilla, esto permite cargar y descargar la tarima sin que se presenten deslizamientos o roces entre ambos componentes.

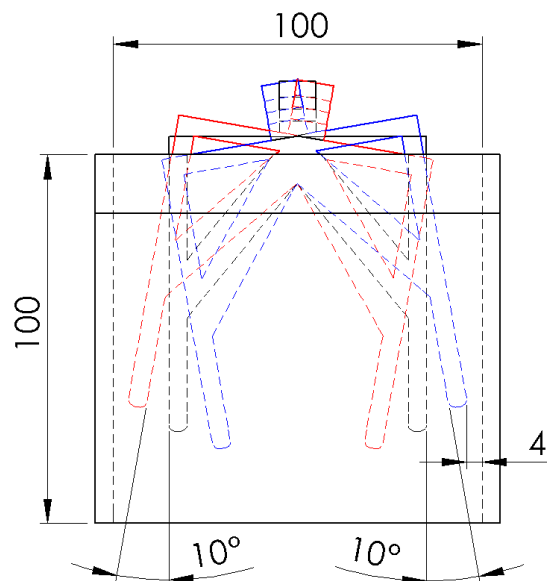


Figura 72. Vista planta de la interacción horquilla-tarima, unidades en mm.

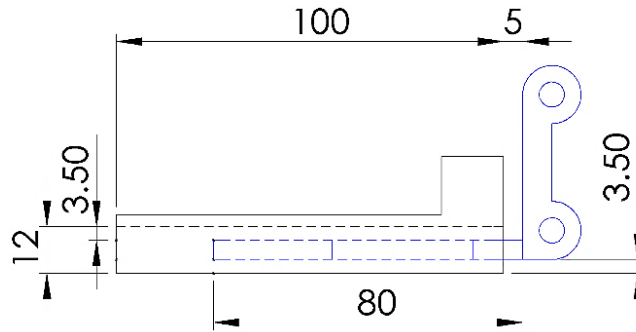


Figura 73. Vista lateral de la interacción horquilla-tarima, unidades en mm.

4.3. Resultados

Los experimentos constan en realizar dos tipos de trayectorias, que son generadas por la posición del objetivo en el plano $Xr-Yr$ y las cuales permiten posicionar al robot manipulador móvil para interactuar con el objetivo, la primera es una trayectoria en línea recta y la segunda es una trayectoria curva ambas generadas por el polinomio de cuarto orden definido en la sección 3.2.

Para que el manipulador móvil realice la trayectoria en línea recta es necesario que las velocidades de las ruedas sean iguales, este tipo de desplazamiento se considera como el más sencillo ya que solo se controla la posición en la dirección Xr y la posición del brazo con θ_3 , ver Figura 74a. Para generar la segunda trayectoria es necesario que se presente una diferencia de velocidades entre $\dot{\theta}_1$ y $\dot{\theta}_2$ con esto es posible controlar la posición y orientación (φ) del manipulador móvil en el plano $Xr-Yr$, así como también la posición del brazo con θ_3 , ver Figura 74b.

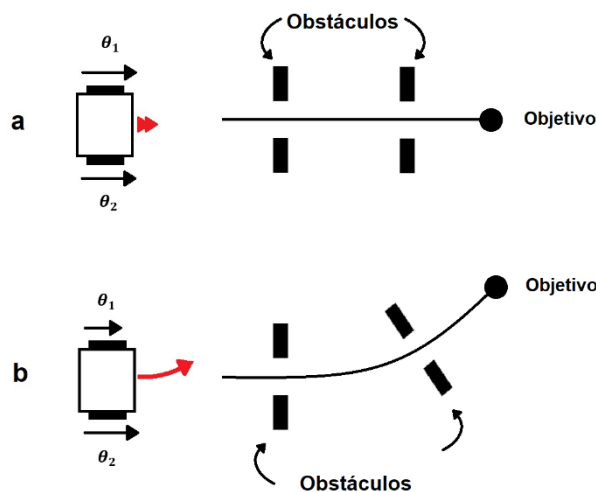


Figura 74. Trayectorias desarrolladas. Caso a, trayectoria en línea recta. Caso b, trayectoria con curvatura.

4.3.1. Trayectoria en línea recta

De acuerdo con la Figura 43 para realizar la primera estimación de la posición tridimensional del objetivo es necesario obtener los parámetros de visión de la cámara derecha $\mathbf{P}^{(1)}$ y la cámara izquierda $\mathbf{P}^{(2)}$. La Figura 75A y la Figura 75B muestran en puntos de color azul las marcas visuales que se ubican en el brazo robótico, al ejecutar la trayectoria previamente planeada de la Tabla 4, detectadas por la cámara derecha e izquierda respectivamente. Para cada posición de la Tabla 4 del brazo robótico se tiene dos marcas visuales, ver Figura 65, una en la coordenada tridimensional del sistema del robot $\mathbf{Yr}=-11.5$ mm y otra en $\mathbf{Yr}=11.5$ mm. Con las muestras de las cámaras y las posiciones tridimensionales de las marcas visuales del brazo robótico, los parámetros de visión son obtenidos mediante la Ecuación 44.

Al despejar las coordenadas (x_c, y_c) del plano de imagen de la Ecuación 32, ecuación general del Modelo de Cámara Lineal, se obtiene la Ecuación 66 y la Ecuación 67. Donde la coordenadas (x_c, y_c) están en función de los parámetros de visión de la n-ésima cámara y de las coordenadas tridimensionales que se quieren representar en el plano de la imagen.

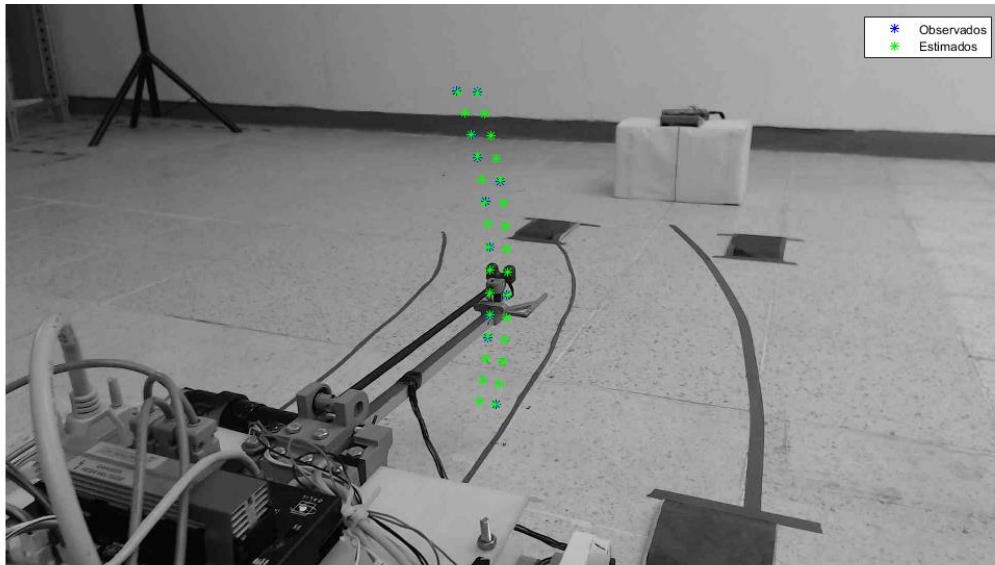
$$x_c = fx(\mathbf{P}^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i) = \frac{p_1 X_i + p_2 Y_i + p_3 Z_i + p_4}{p_9 X_i + p_{10} Y_i + p_{11} Z_i + 1} \quad \text{Ecuación 66}$$

$$y_c = fy(\mathbf{P}^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i) = \frac{p_5 X_i + p_6 Y_i + p_7 Z_i + p_8}{p_9 X_i + p_{10} Y_i + p_{11} Z_i + 1} \quad \text{Ecuación 67}$$

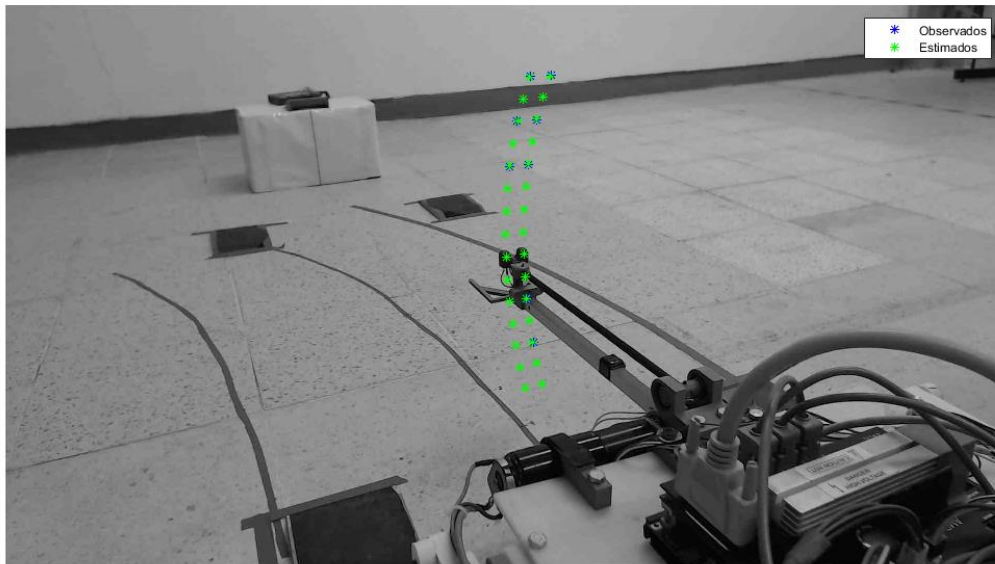
En la Figura 75A y la Figura 75B se observan puntos en color verde que pertenecen a las coordenadas tridimensionales de la posición de las marcas visuales del brazo robótico. Estas marcas son obtenidas con la Ecuación 66, la Ecuación 67 y las posiciones tridimensionales de las marcas visuales en el brazo durante la trayectoria previamente planeada.

La minimización de los residuos, Ecuación 68, de las marcas de la trayectoria previamente planeada, Figura 75, permite contabilizar estadísticamente la información de ambas cámaras que se muestra en la Tabla 6. Esta tabla muestra el valor promedio, la desviación, el valor mínimo y el valor máximo de los residuos.

Por medio de la distancia tanto en pixeles como en mm, entre las primeras dos marcas observadas de la trayectoria previamente planeada es posible obtener una relación de 1.5 pixeles/mm. Mediante la relación anterior y la Tabla 6 se tiene que el error promedio es de 0.33 mm y un error máximo de 0.72 mm al hacer una estimación de posición dentro del rango de la trayectoria previamente planeada.



A



B

Figura 75. Marcas de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico. Imagen A, captura de la cámara derecha e imagen B captura de la cámara izquierda.

$$J(\mathbf{P}) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left((x_{ci} - fx(\mathbf{P}^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i))^2 + (y_{ci} - fy(\mathbf{P}^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i))^2 \right) \quad \text{Ecuación 68}$$

Donde m es el número total de muestras y n el número de cámaras usadas.

Tabla 6. Residuos de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico en pixeles.

Cámara	Residuos			
	Promedio	Desviación	Mínimo	Máximo
Derecha	0.5542	0.2488	0.1086	1.0962
Izquierda	0.5397	0.2928	0.0246	1.0969

Ahora bien, para generar la primera estimación de la posición tridimensional del objetivo es necesario detectar la ubicación de las marcas led del objetivo en las imágenes de cada cámara, ver Figura 76A e Figura 77A, y por medio de la Ecuación 50 calcular sus coordenadas respecto al brazo robótico (X_r, Y_r, Z_r).

Las coordenadas de la posición en la que se ubicó la tarima fueron de 2000 mm en la dirección X , 0 mm en la dirección Y y 24.5 mm en la dirección Z respecto al sistema de referencia \mathbf{o} . Y la orientación de la tarima está en 0° medidos desde el eje X del robot manipulador móvil.

Al conocer la posición tridimensional de la tarima respecto al sistema de referencia del brazo robótico, se calcula el desplazamiento en la dirección X para el robot móvil considerando η , que depende de la posición del efector, la cual se obtiene por:

$$\theta_3 = \text{sen}^{-1} \left(\frac{Z_r}{D} \right) \quad \text{Ecuación 69}$$

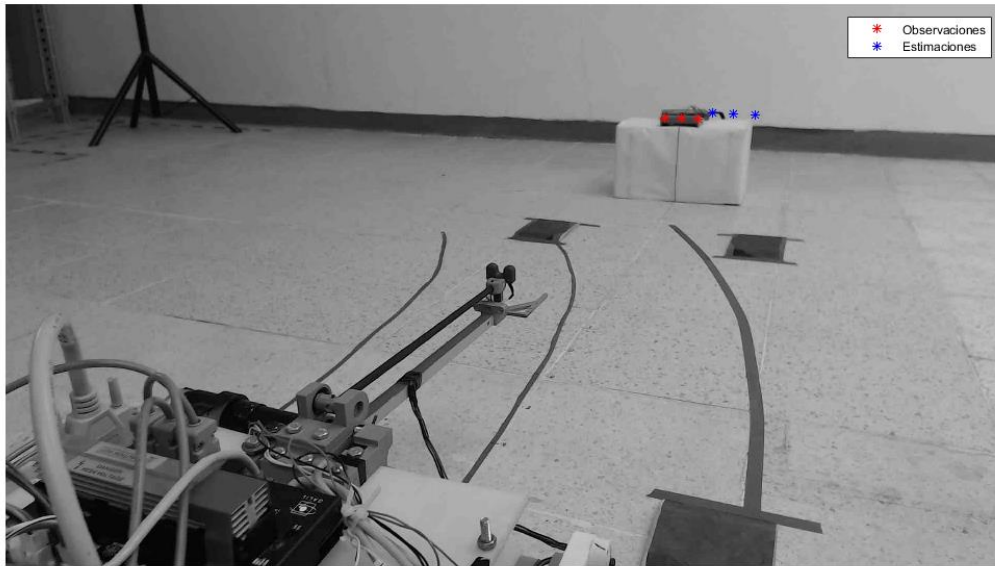
Al estar tan alejada la tarima del rango de trabajo del brazo robótico, la estimación de su posición no es precisa, por lo que es necesario acercarse y realizar nuevas estimaciones de la posición tridimensional de la tarima para actualizar su posición y orientación. Para realizar estas actualizaciones es necesario que el vehículo haga pausas programadas durante la trayectoria actual. Para nuestro caso de estudio se realizaron 8 actualizaciones durante cada serie de pruebas y se realizaron 5 series de pruebas en total. Se entiende por una serie de pruebas a llevar al robot manipulador móvil de un determinado punto hacia la posición de la tarima.

La Tabla 7 muestra las posiciones en la dirección X donde el robot móvil se detuvo para realizar las actualizaciones en base al sistema de referencia \mathbf{o} fijado en el punto de partida. Los puntos de evaluación se definieron por la posición de los obstáculos en la trayectoria hacia el objetivo, de manera que se realizaran estimaciones mientras la suspensión estaba sobre obstáculos. De igual manera se posiciono un obstáculo al final de la trayectoria para mostrar como la configuración del robot manipulador móvil permite interactuar con la tarima. La Figura 76 y la Figura 77 muestran las marcas led de la tarima para la primera y última posición durante el recorrido del robot manipulador móvil. Las ocho graficas de la Figura 86 son

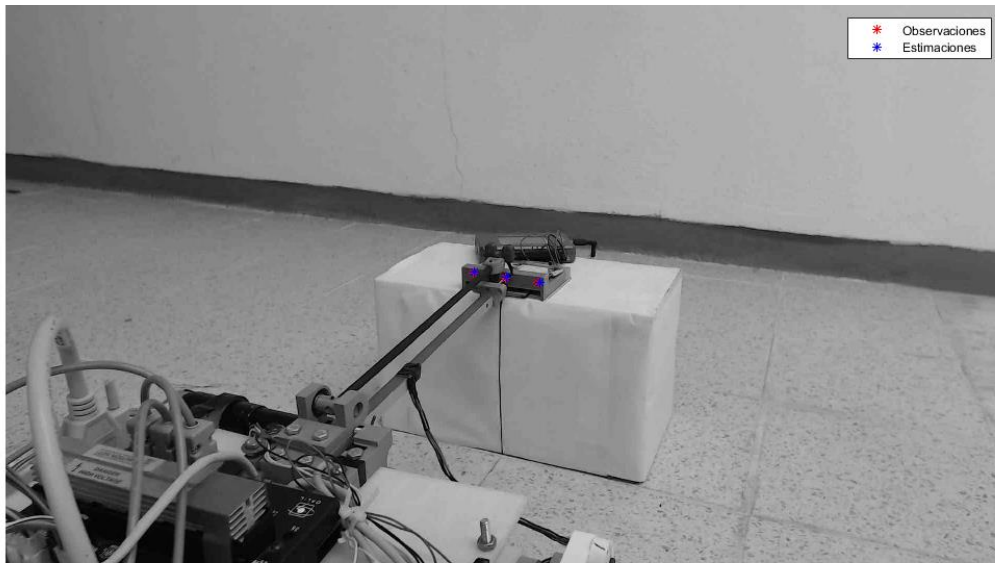
generadas cuando el robot móvil se encuentra en cada una de las 8 posiciones respectivamente.

Tabla 7. Posiciones del robot móvil durante la ejecución de la trayectoria en línea recta.

Actualizaciones	1	2	3	4	5	6	7	8
Posición en X_r [cm]	0	50	100	132	136	138	139	140

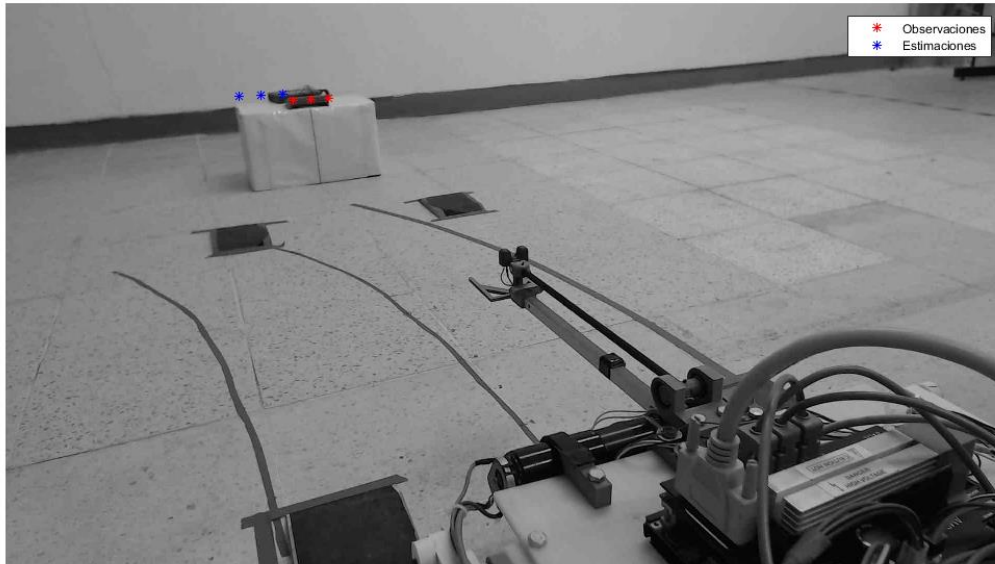


A

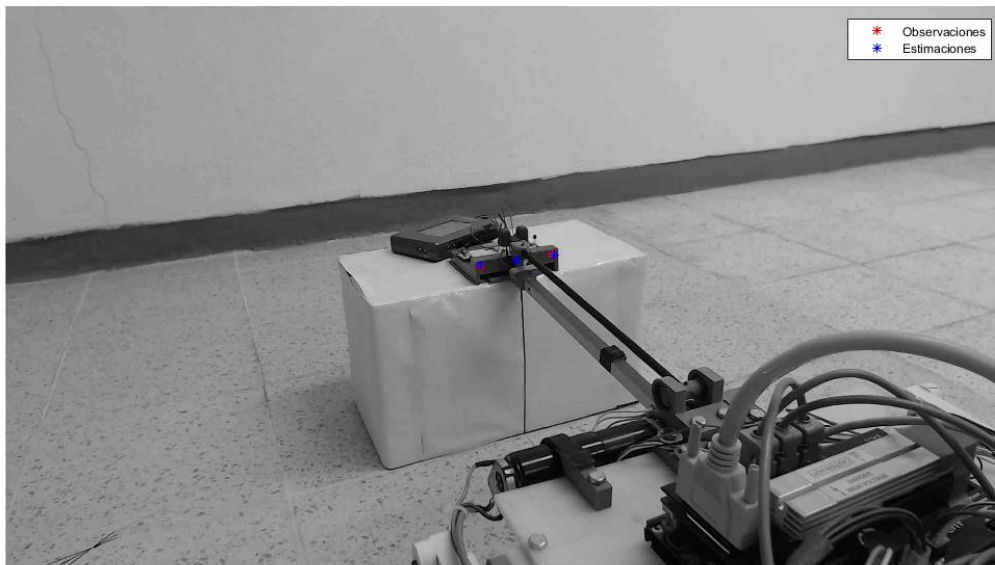


B

Figura 76 Marcas del objetivo en la cámara derecha. Imagen A, estimación inicial e imagen B, estimación final.



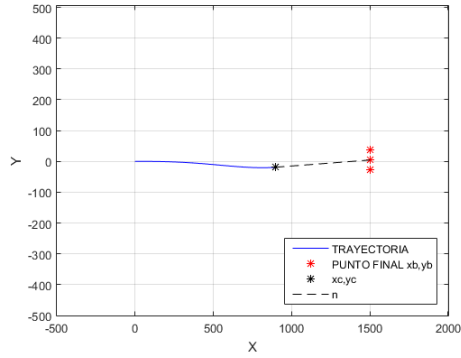
A



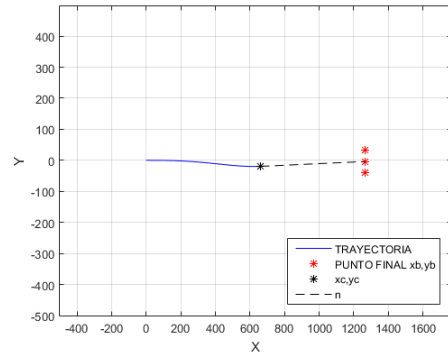
B

Figura 77 Marca del objetivo en la cámara izquierda. Imagen A, estimación inicial e imagen B, estimación final.

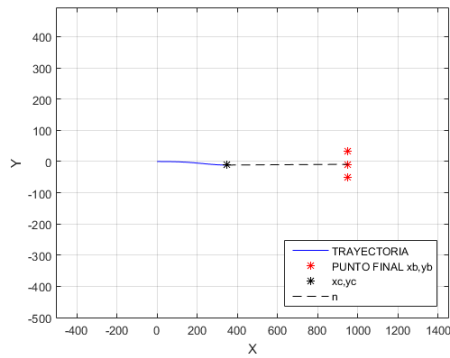
La Figura 78 muestra las trayectorias generadas por dichos puntos mediante el polinomio de cuarto orden desarrollado en la sección 3.2, las cuales debido a las imprecisiones de las estimaciones y del desplazamiento generado por el robot manipulador móvil, no coinciden con un movimiento en línea recta precisamente.



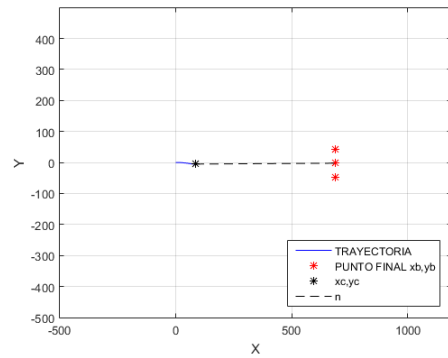
A



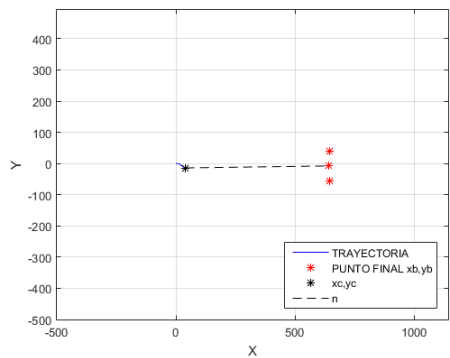
B



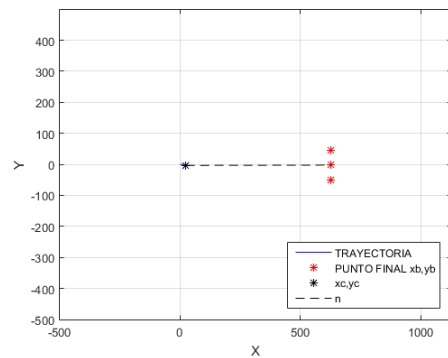
C



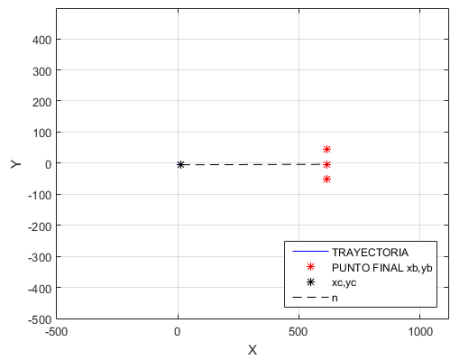
D



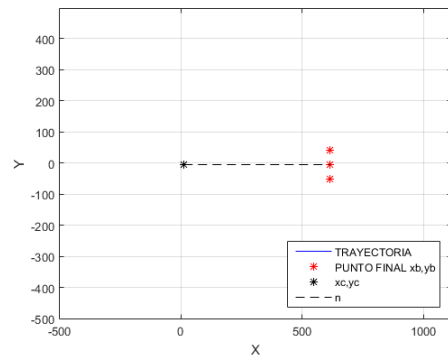
E



F



G



H

Figura 78 . Trayectorias generadas en cada actualización. Donde la imagen A es la primer estimación y continúan en orden alfabético hasta la imagen H que es la última estimación realizada.

Para que el robot manipulador móvil alcance el objetivo se busca minimizar los residuos de la posición tridimensional del objetivo de la Ecuación 70. Para conocer los residuos de la posición tridimensional del objetivo en cada actualización es necesario obtener fx y fy , que están en función de los parámetros de visión de la n -ésima cámara y de las coordenadas tridimensionales de las m número de marcas en el objetivo.

Debido a que en cada actualización el sistema de referencia del brazo robótico se repositona, es necesario transformar las coordenadas tridimensionales del sistema de referencia anterior al actual. Para realizar la transformación de coordenadas es necesario determinar la posición y orientación en la que queda en cada punto de evaluación. La posición y orientación se obtienen del modelo cinemático del robot móvil diferencial de la Ecuación 11, Ecuación 12, Ecuación 13.

$$J(X, Y, Z) = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \left((x_{ci} - fx(\mathbf{P}^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i))^2 + (y_{ci} - fy(\mathbf{P}^{(j)}, X_i, Y_i, Z_i))^2 \right) \quad \text{Ecuación 70}$$

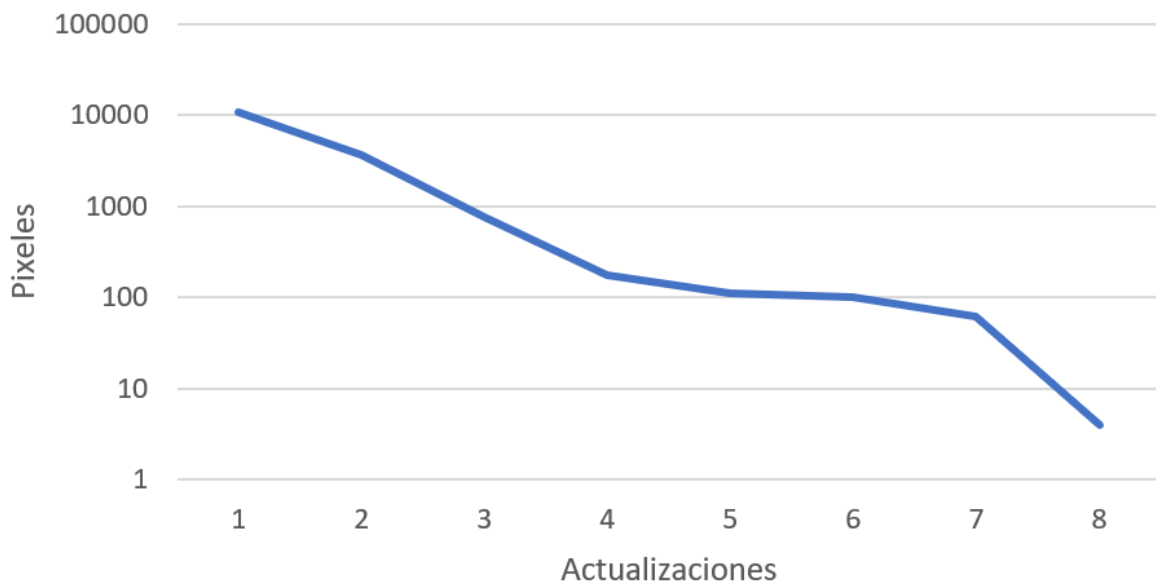
Siguiendo el diagrama de la Figura 43 una vez que se tiene la estimación tridimensional de la posición del objetivo y que se genera la trayectoria, entonces, se ejecuta parcialmente para dar lugar a la siguiente actualización, en el caso de no ser encontrado el objetivo, se continúa ejecutando parcialmente la trayectoria anterior hasta el siguiente punto de actualización. Este proceso iterativo se ejecuta hasta que la posición del robot manipulador móvil permita que la horquilla levante la tarima, las imágenes de la Figura 76 y la Figura 77 muestran las marcas visuales del objetivo durante las actualizaciones de su posición. En la Figura 76B y la Figura 77B se observa como la posición y orientación final del robot manipulador móvil permite al efector final insertarse en la tarima.

En la Figura 76B y la Figura 77B se observa como al acercarse el efector final a la tarima, el mismo efector oculta la marca \mathbf{B} de la tarima, evitando que sea posible ser observada por las cámaras. Debido a la geometría de las marcas, el punto \mathbf{B} se encuentra justo en el punto intermedio entre los puntos auxiliares \mathbf{P}_{aux1} y \mathbf{P}_{aux2} . Por lo que para obtener la coordenada en el plano de imagen del punto \mathbf{B} se calcula el punto intermedio entre los puntos auxiliares \mathbf{P}_{aux1} y \mathbf{P}_{aux2} en el plano de la imagen.

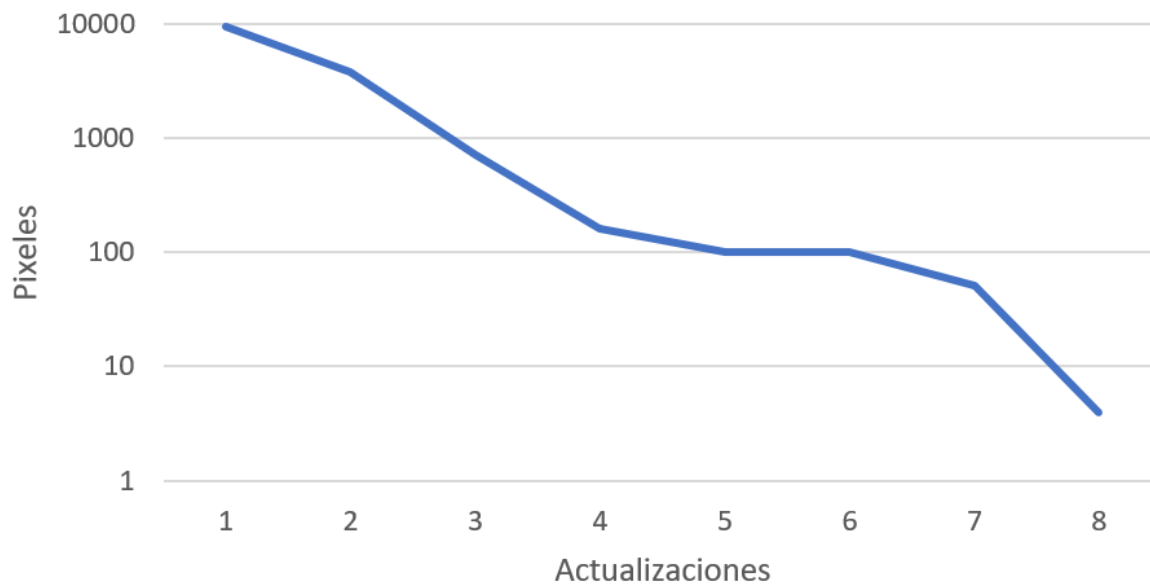
En el diagrama de flujo de la Figura 43 se observa que se plantea una pregunta sobre si hay muestras para realizar una actualización de parámetros de visión, por

si se llegara a presentar alguna variación en el sistema que altere el modelo de visión implementado.

La Figura 79 muestra de manera independiente para cada cámara, los gráficos con el promedio de los residuos obtenidos en cada una de las actualizaciones durante todas la series de pruebas realizadas ejecutando una trayectoria en línea recta.



A



B

Figura 79 Residuos de la posición en la cámara: A derecha y B Izquierda.

La Figura 80 muestra un gráfico con el promedio de los residuos obtenidos en la Figura 79. En el gráfico se observa cómo se reduce el residuo de las estimaciones conforme se avanza hacia el objetivo. Esto puede ser apreciado de igual manera en la Figura 76 y la Figura 77. El residuo de la primera estimación tiene un valor alto ya que es el punto de evaluación más alejado.

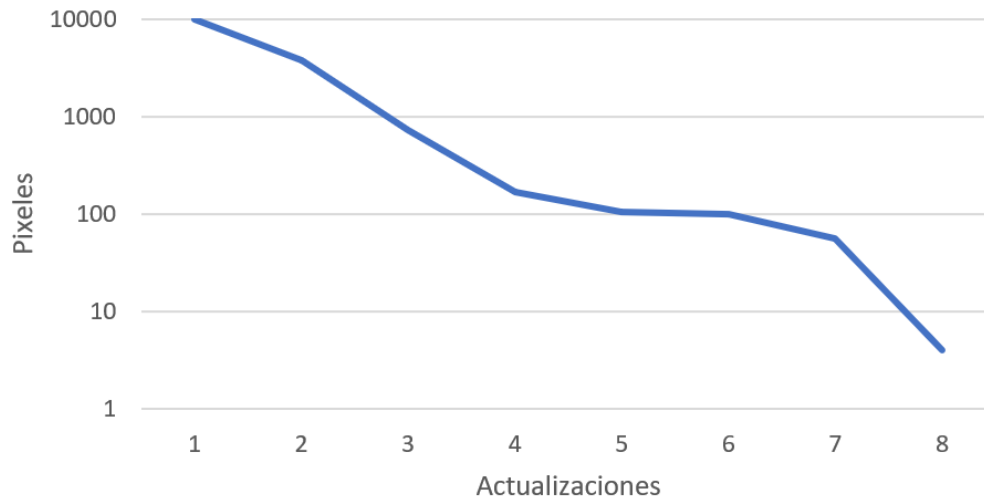


Figura 80 Residuo de las 8 estimaciones.

Durante cada actualización por medio de las coordenadas estimadas del objetivo se calculó la orientación de la tarima para generar la trayectoria, la Figura 81 muestra la comparativa entre la orientación estimada y la orientación generada por la cinemática del vehículo diferencial, las cuales a partir de la tercera actualización comienzan a coincidir aproximadamente. Estas variaciones son propias de un robot móvil diferencial, además, también influye la imprecisión que tenga la estimación de la posición de cada una de las marcas de la tarima.

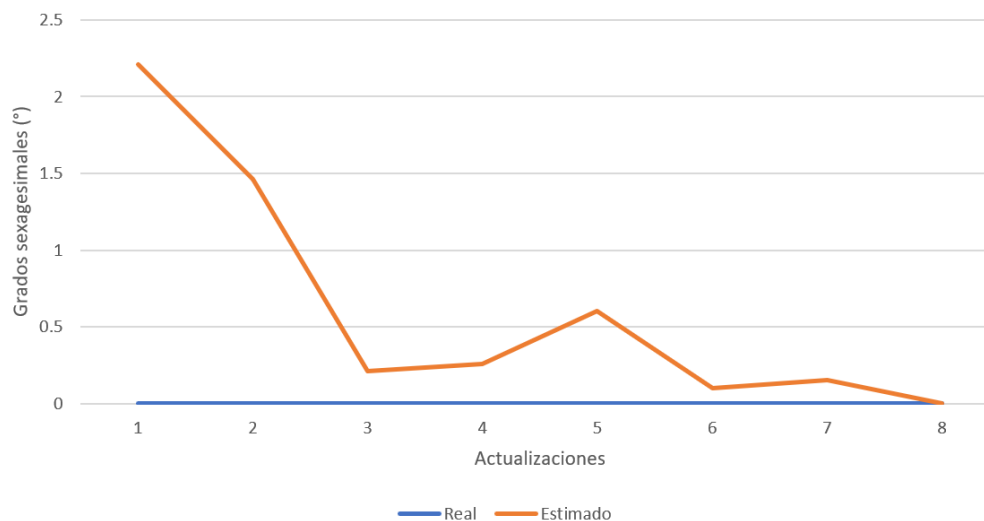


Figura 81 Comparativa de la orientación de la tarima.

4.3.2. Trayectoria curva

Para el recorrido del caso **b** de la Figura 74 se sigue de igual manera el procedimiento del diagrama de flujo de la Figura 43, con la diferencia de que el objetivo se encuentra en una posición (X,Y).

Para realizar la primera estimación de la posición tridimensional del objetivo es necesario obtener los parámetros de visión de la cámara derecha $P^{(1)}$ y la cámara izquierda $P^{(2)}$. La estimación de los parámetros de visión se realizó de la misma manera que en la sección de la trayectoria en línea recta. Donde se utilizó la trayectoria previamente planeada de la Tabla 4 y las marcas en el plano de la imagen de la Figura 82.

La Figura 82A y la Figura 82B muestran en puntos de color azul las marcas visuales que se ubican en el brazo robótico, al ejecutar la trayectoria previamente planeada de la Tabla 4, detectadas por la cámara derecha e izquierda respectivamente.

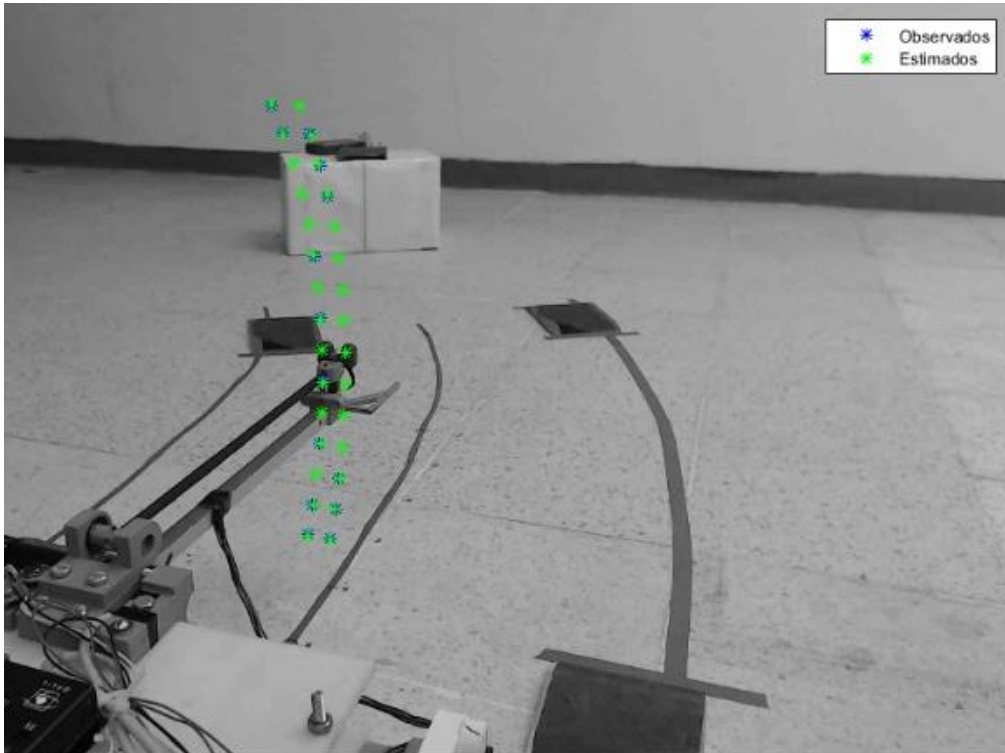
En la Figura 82A y la Figura 82B se observan puntos en color verde que pertenecen a las coordenadas tridimensionales de la posición de las marcas visuales del brazo robótico. Estas marcas son obtenidas de la misma manera que en la sección de la trayectoria en línea recta.

La minimización de los residuos, Ecuación 68, de las marcas de la trayectoria previamente planeada, Figura 82, permite contabilizar estadísticamente la información de ambas cámaras que se muestra en la Tabla 8. Esta tabla muestra el valor promedio, la desviación, el valor mínimo y el valor máximo de los residuos.

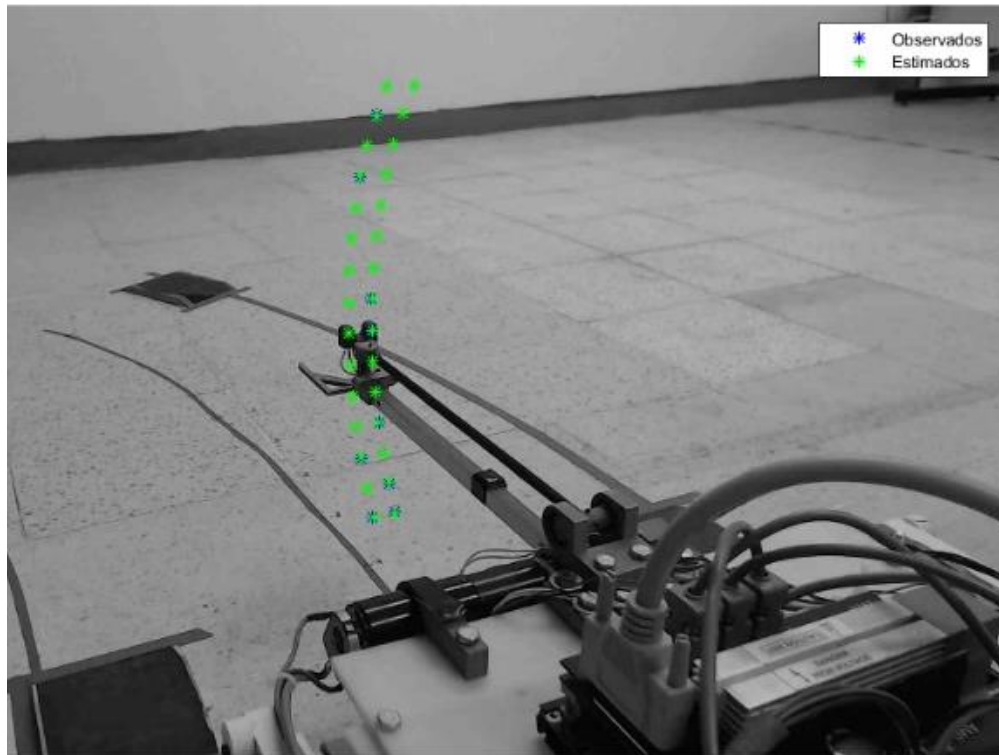
Mediante la Tabla 8 y la relación de 1.5 pixeles/mm descrita anteriormente se tiene que el error promedio es de 0.37 mm y un error máximo de 1 mm al hacer una estimación de posición dentro del rango de la trayectoria previamente planeada.

Tabla 8. Residuos de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico en pixeles.

Cámara	Residuo			
	Promedio	Desviación	Mínimo	Máximo
Derecha	0.56657	0.34948	0.13025	1.4774
Izquierda	0.57953	0.35795	0.06470	1.5644



A



B

Figura 82. Marcas de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico. Imagen A, captura de la cámara derecha e imagen B captura de la cámara izquierda.

Ahora bien, para generar la primera estimación de la posición tridimensional del objetivo es necesario detectar la ubicación de las marcas led del objetivo en las imágenes de cada cámara, ver Figura 83A e Figura 84A, y por medio de la Ecuación 50 calcular sus coordenadas respecto al brazo robótico (X_r, Y_r, Z_r) tal y como se desarrolló en la sección de la trayectoria en línea recta.

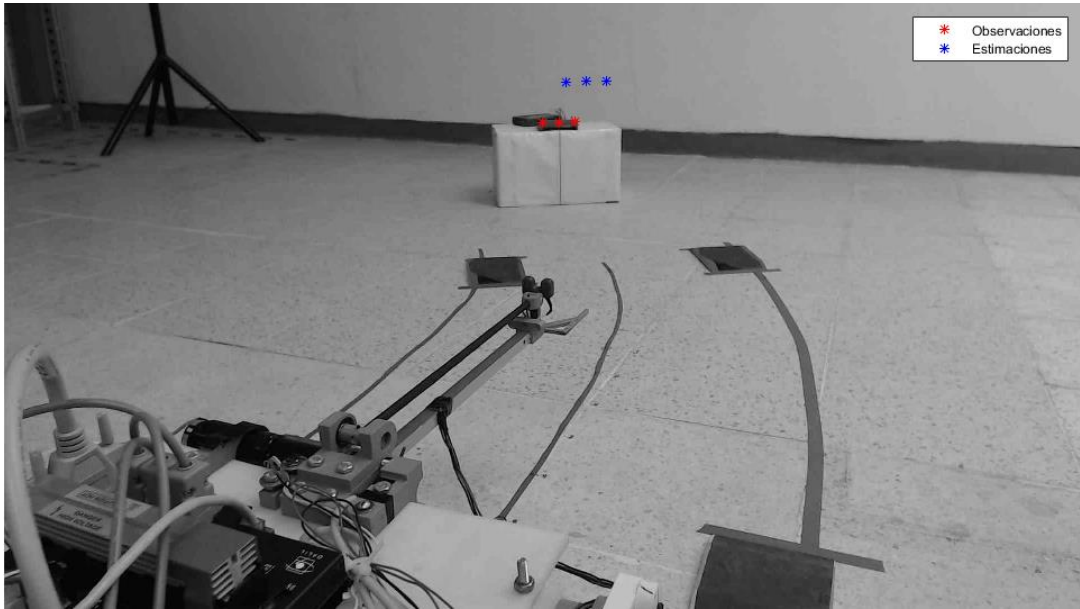
Las coordenadas de la posición en la que se ubicó la tarima fueron de 2000 mm en la dirección X , 500 mm en la dirección Y y 24.5 mm en la dirección Z respecto al sistema de referencia o . Y la orientación de la tarima está en 30° medidos desde el eje X del robot manipulador móvil.

Al conocer la posición tridimensional de la tarima respecto al sistema de referencia del brazo robótico, se calcula la trayectoria mediante el polinomio de cuarto orden de la Ecuación 54. Para este caso el robot debe posicionarse en el plano XY y además tiene que quedar orientado tal y como se muestra en la Figura 50 para interactuar con la tarima.

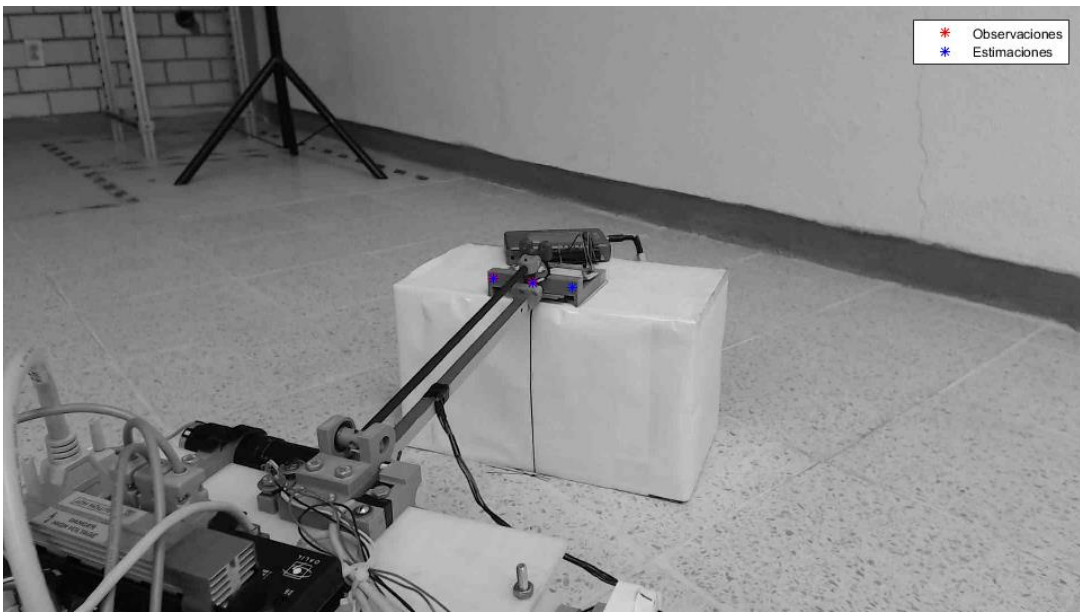
La Tabla 9 muestra las posiciones en el plano XY donde el robot móvil se detuvo para realizar las actualizaciones en base al sistema de referencia o fijado en el punto de partida. Los puntos de evaluación se definieron por la posición de los obstáculos en la trayectoria hacia el objetivo, de manera que se realizaran estimaciones mientras la suspensión estaba sobre obstáculos. La Figura 83 y la Figura 84 muestran las marcas led de la tarima para la primera y última posición durante el recorrido del robot manipulador móvil de la Tabla 9.

Tabla 9. Posiciones del robot móvil durante la ejecución de la trayectoria curva.

Actualizaciones	1	2	3	4	5	6	7	8
Posición en X_r [cm]	0	50	100	141	144	146	147	148
Posición en Y_r [cm]	0	0.1	36	16	18	19	19.5	20
Orientación $^\circ$	0	0.8	16	26	28	29	29.5	30



A



B

Figura 83. Marcas del objetivo en la cámara derecha. Imagen A, estimación inicial e imagen B, estimación final.



B



B

Figura 84. Marcas del objetivo en la cámara izquierda. Imagen A, estimación inicial e imagen B, estimación final.

La Figura 86 muestra las trayectorias generadas por dichos puntos mediante el polinomio de cuarto orden desarrollado en la sección 3.2, las cuales debido a las imprecisiones de las estimaciones y del desplazamiento generado por el robot manipulador móvil, la trayectoria que desarrolla el manipulador móvil en la realidad, ver Figura 85, es irregular a comparación de la trayectoria planeada, ver Figura 51. Las ocho graficas de la Figura 86 son generadas cuando el robot móvil se encuentra en cada una de las 8 posiciones de la Tabla 9 respectivamente.

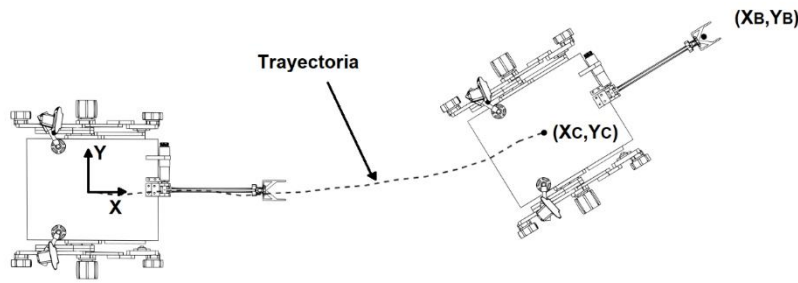
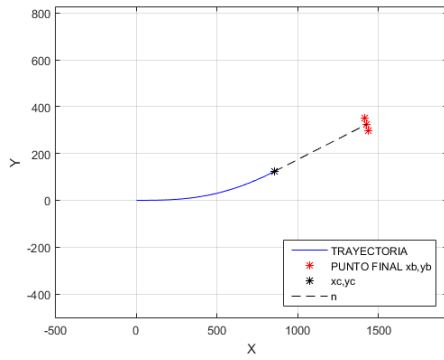


Figura 85. Ejecución de la trayectoria en la realidad.

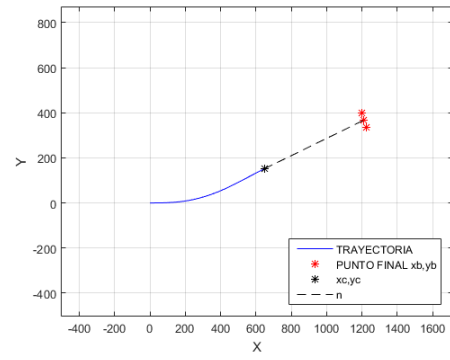
Para que el robot manipulador móvil alcance el objetivo se busca minimizar los residuos de la posición tridimensional del objetivo de la Ecuación 70. Para conocer los residuos de la posición tridimensional del objetivo en cada actualización es necesario obtener f_x y f_y , que están en función de los parámetros de visión de la n -ésima cámara y de las coordenadas tridimensionales de las m número de marcas en el objetivo.

Debido a que en cada actualización el sistema de referencia del brazo robótico se reposiciona, es necesario transformar las coordenadas tridimensionales del sistema de referencia anterior al actual. Para realizar la transformación de coordenadas es necesario determinar la posición y orientación en la que queda en cada punto de evaluación. La posición y orientación se obtienen del modelo cinemático del robot móvil diferencial de la Ecuación 11, Ecuación 12, Ecuación 13 y del centro de rotación instantáneo.

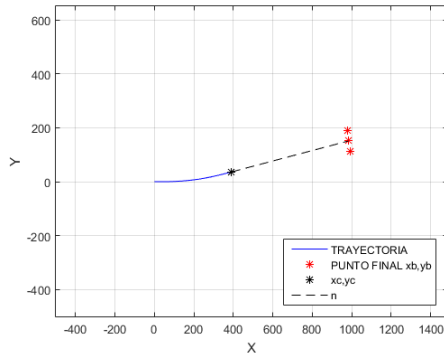
Siguiendo el diagrama de la Figura 43 una vez que se tiene la estimación tridimensional de la posición del objetivo y que se genera la trayectoria, entonces, se ejecuta parcialmente para dar lugar a la siguiente actualización. Este proceso iterativo se ejecuta hasta que la posición del robot manipulador móvil permita que la horquilla levante la tarima. En la Figura 83B y la Figura 84B se observa como el robot manipulador móvil termina orientado perpendicularmente a las tres marcas, que pertenecen a la tarima. La orientación final de la trayectoria permite al efector final insertarse en la tarima sin colisionar con ella.



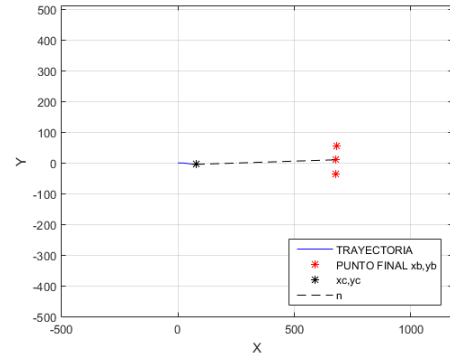
A



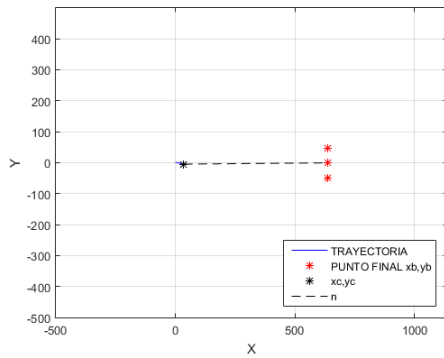
B



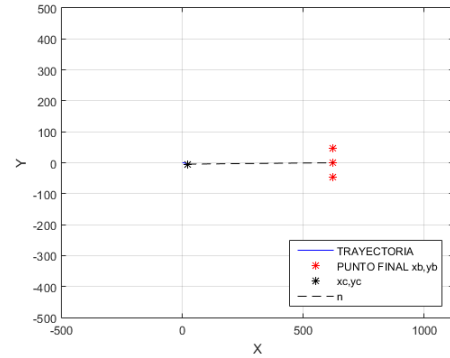
C



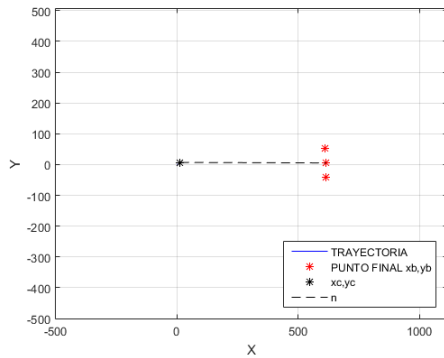
D



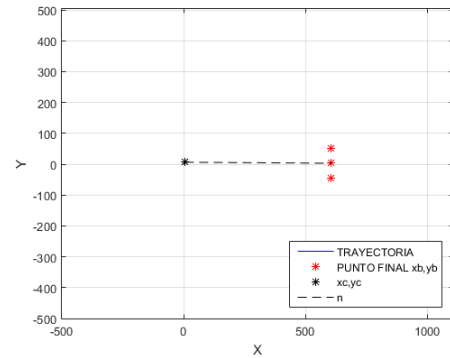
E



F



G



H

Figura 86. Trayectorias generadas en cada actualización. Donde la imagen A es la primer estimación y continúan en orden alfabético hasta la imagen H que es la última estimación realizada.

La Figura 87 muestra de manera independiente para cada cámara, los gráficos con el promedio de los residuos obtenidos en cada una de las actualizaciones durante todas la series de pruebas realizadas.

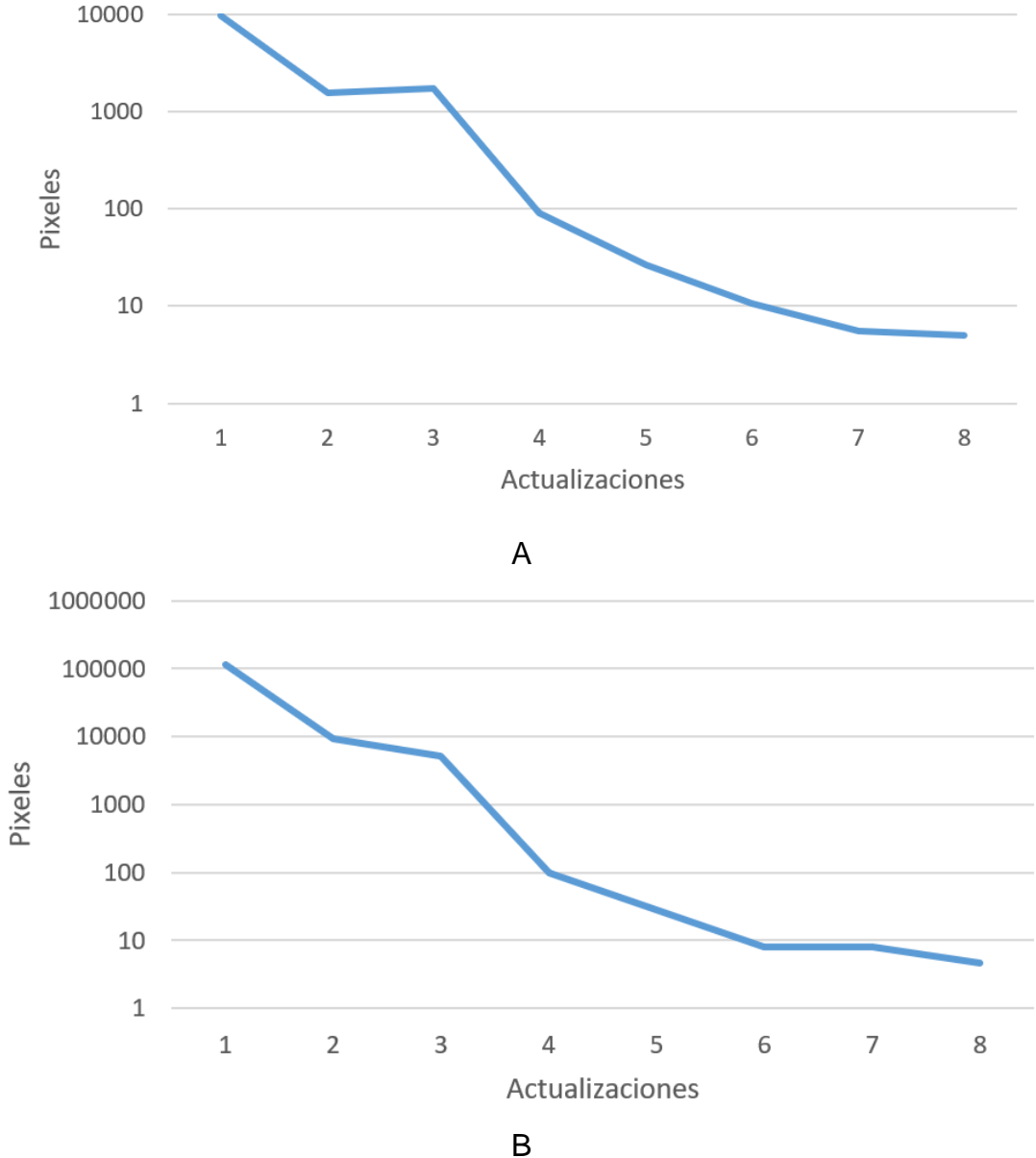


Figura 87. Residuos de la posición en la cámara: A derecha y B Izquierda.

La Figura 88 muestra un gráfico con el promedio de los residuos obtenidos en cada una de las actualizaciones durante todas la series realizadas. La gráfica incluye la información de ambas cámaras. En el gráfico se observa cómo se reduce el residuo de las estimaciones conforme se avanza hacia el objetivo. Esto puede ser apreciado

de igual manera en la Figura 83 y la Figura 84. El residuo de la primera estimación tiene un valor alto ya que es el punto de evaluación más alejado.

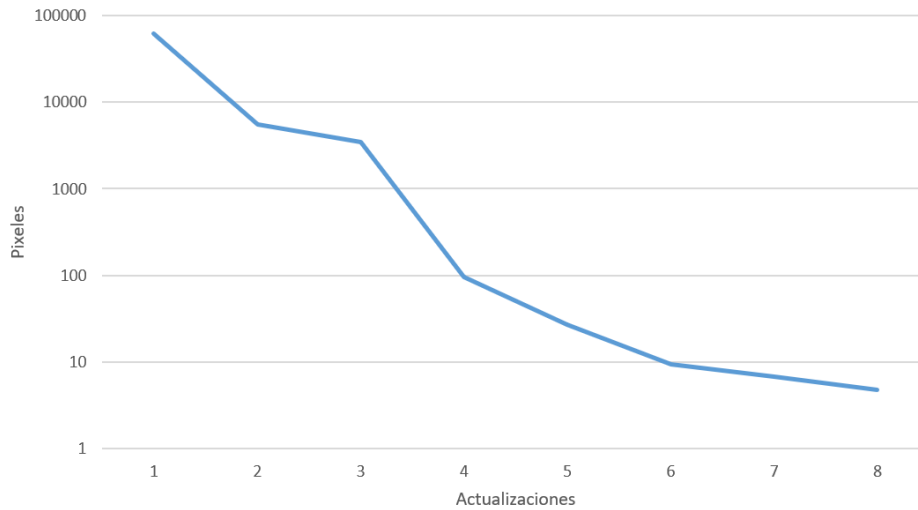


Figura 88. Residuos de las 8 estimaciones.

Durante cada actualización por medio de las coordenadas estimadas del objetivo se calculó la orientación de la tarima para generar la trayectoria, la Figura 89 muestra la comparativa entre la orientación estimada y la orientación generada por la cinemática del vehículo diferencial, las cuales a partir de la cuarta actualización comienzan a coincidir aproximadamente. Estas variaciones son propias de un robot móvil diferencial, además, también influye la imprecisión que tenga la estimación de la posición de cada una de las marcas de la tarima.

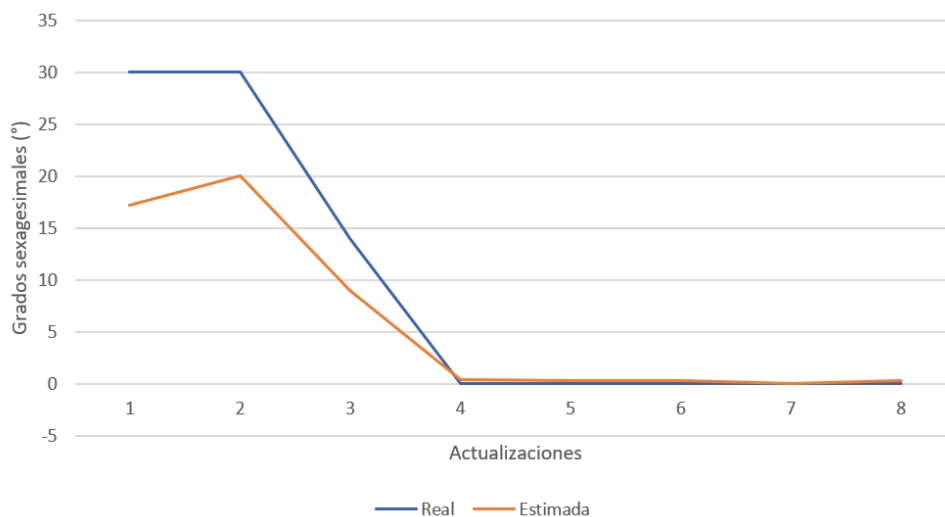


Figura 89. Comparativa de la orientación de la tarima.

La metodología de LCM-MCSM desarrollada en este trabajo se implementó en el sistema de cómputo numérico *Matlab*®. Para temporizar el programa se utilizó la

función de *tic-toc*. La ejecución de la trayectoria previamente planeada del brazo robótico y las detecciones de las marcas tarda un promedio de 4 minutos. La detección de las marcas en la tarima toma 15 segundos. Las actualizaciones de la posición del objetivo se temporizaron en un promedio de 0.5 segundos. Los desplazamientos del robot se registraron en 45 segundos en total. Considerando las 8 actualizaciones realizadas, el tiempo que tarda el robot manipulador móvil en posicionar la horquilla en la tarima desde el primer instante, es de 7 minutos aproximadamente. Si no es necesario actualizar los parámetros de visión, las pausas programadas en cada actualización de la trayectoria pueden ser cortas, reduciendo el tiempo de trabajo del robot.

4.4. Conclusión del capítulo

Los resultados obtenidos muestran como la configuración del robot manipulador móvil propuesto mantiene orientada la plataforma de carga mientras se ejecuta una trayectoria que cuenta con obstáculos. Al mantener la plataforma en posición horizontal permite tener el objetivo dentro del rango visual de las cámaras. Esto permite al control por MCSM realizar las estimaciones de la posición del objetivo en cada punto de actualización propuesto y realizar las operaciones de carga y descarga de la tarima sin importar que se encuentre sobre uno de los obstáculos previamente establecidos.

El residuo de la posición de la tarima en la última actualización, que se muestra en las gráficas de ambas trayectorias, es aproximadamente de 4 píxeles. Esto permite que al ubicar el efector final se tenga una precisión de ± 2.5 mm. Por otro lado, el error en la orientación obtenida en la última actualización en ambas trayectorias es menor a 1° , dato que puede ser observado en la Figura 81 y la Figura 89. Contrastando ambos datos con la geometría de la tarima se demuestra para nuestro caso de estudio que es posible posicionar la horquilla para levantar la tarima sin problemas.

Conclusiones

Al desarrollar los objetivos específicos mostrados en la introducción de este trabajo se concluye que:

- La integración de la suspensión cinemática CIEP_1 2020 al manipulador móvil permite mantener orientado la plataforma de carga de modo que las marcas visuales del objetivo se mantienen en el rango visual de las cámaras durante la ejecución de la trayectoria, la cual cuenta con obstáculos de una altura no mayor a $\frac{3}{4}$ del diámetro de la rueda, ver Figura 90.

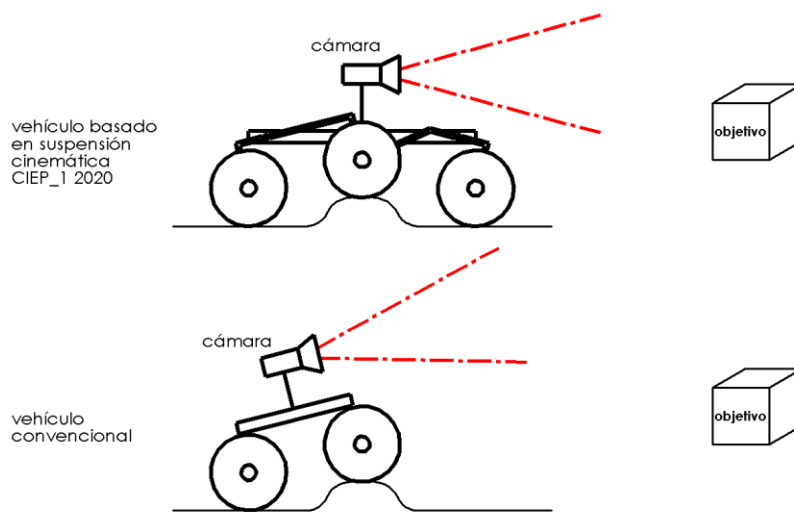


Figura 90. Comparativa de configuraciones de vehículos.

- El brazo de un grado de libertad (θ_3) es suficiente para la tarea que se propuso, ya que por medio de las ruedas actuadas (θ_1 y θ_2) el vehículo puede ser ubicado y orientado de manera que el brazo robótico pueda realizar su tarea sin añadir un grado de libertad al brazo robótico.
- El mecanismo de cuatro barras sobre el brazo robótico y el herramental instalado simplifica la operación del efector final, ya que se usa un solo actuador. El reducir el gasto energético del manipulador móvil da la posibilidad de aumentar la autonomía si se instalan baterías abordo. Para un rango de posiciones (θ_3) el mecanismo de cuatro barras mantiene la orientación perpendicular a la tarima.
- Los procesos de impresión 3D permiten fabricar piezas en PLA en un periodo de tiempo corto, ya que tener un prototipo fabricado utilizando

procesos tales como corte o desbaste, requiere de infraestructura especializada y un mayor tiempo de maquinado en comparación con la impresión 3D.

- La impresión 3D facilitó obtener un prototipo que permitiera validar experimentalmente de manera dinámica y de forma ágil cada vez que se ocupaban validar ajustes en el modelo, en el prototipo o en la hipótesis planteada.

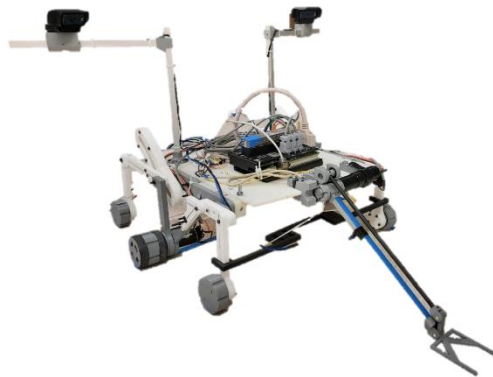


Figura 91. Prototipo final.

- La alimentación eléctrica para los controladores se realizó mediante un cordón umbilical hasta una fuente de poder ubicada de manera remota al robot, limitando el espacio de trabajo. Como trabajo a futuro esto puede ser solucionado instalando baterías de polímero de litio que poseen características como el bajo peso o prestaciones energéticas suficientes para operar el robot manipulador móvil.
- Las cámaras instaladas permitieron capturar en imagen el mayor espacio posible del área de trabajo del manipulador móvil. No fue necesario hacer uso de cámaras de gama alta o de visión de máquina ya que por la resolución con la que cuentan las cámaras web fue suficiente para obtener una precisión de ± 2.5 mm, resolución validada con la realización experimental exitosa de la tarea establecida.
- Al ejecutar la trayectoria propuesta para el vehículo, el efector final quedó posicionado para alzar la tarima sin exponerla a una volcadura, ver Figura 92, ahora la tarea de reubicarla depende de que la nueva ubicación este dentro del rango visual de ambas cámaras y que cuente con marcas detectables para poder estimar su posición y orientación mediante la metodología de Manipulación en Espacio de Cámara Móvil.

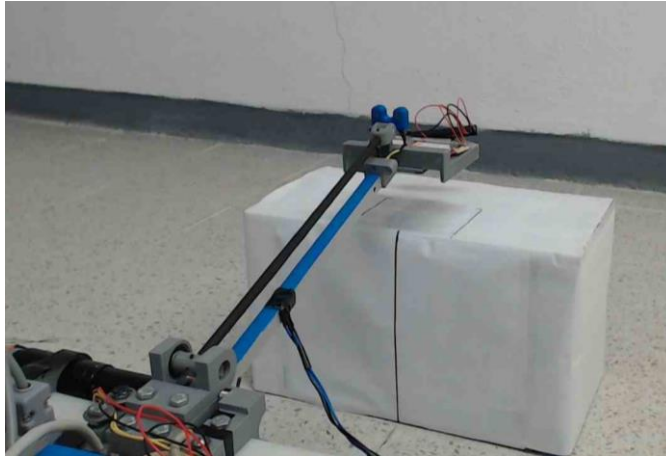


Figura 92. Brazo robótico alzando la tarima.

- El uso del Modelo de Cámara Lineal (LCM) para la metodología de Manipulación en Espacio de Cámara Móvil (MCSM) permitió obtener los parámetros de visión de ambas cámaras de una manera sencilla, usando operaciones algebraicas, esto reduce el costo computacional del robot y permite una respuesta más rápida del robot, lo cual es útil en aplicaciones en tiempo real.
- La metodología de Manipulación en Espacio de Cámara Móvil usando el Modelo de Cámara Lineal (LCM-MCSM) que se presentó en este trabajo muestra una manera en que la información que proviene de las cámaras es usada para compensar los errores de odometría que suelen presentar este tipo de robots. Estos errores se deben al comportamiento del robot frente a las características del terreno.
- El control por visión implementado permite actualizar la posición estimada con respecto al punto de destino y actualizar la trayectoria de forma robusta. El método CSM define una relación directa entre la articulación y los espacios de la cámara. Este paradigma ha sido validado experimentalmente, logrando una tarea de cuatro grados de libertad, controlando un robot móvil de tres grados de libertad con una suspensión adaptable.
- Los resultados obtenidos dentro de este trabajo fueron reportados como parte del artículo sometido a revisión "*Vision- based control of a mobile manipulator with an adaptable-passive suspension for unstructured environments*" en la revista de la ASME para su número especial sobre *Journal of Mechanisms and Robotics*, dedicada a publicar contribuciones de investigación a la teoría fundamental, algoritmos y aplicaciones para sistemas robóticos y de mecanismos.

Referencias

- [1] A. Denker y M. C. Iseri, "Design and implementation of a semi-autonomous mobile search and rescue robot: SALVOR", en *International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, 2017, pp. 1–6.
- [2] K. Kawabata, K. Suzuki, M. Isowa, K. Horiuchi, y R. Ito, "Development of a robot simulation system for remotely operated robots for operator proficiency training and robot performance verification", en *14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence URAI*, 2017, pp. 561–564.
- [3] Y. Iwano, K. Osuka, y H. Amano, "Experimental study of traction robot system for rescue against nuclear disaster", en *IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, 2005, pp. 93–98.
- [4] R. R. Murphy, J. Kravitz, S. L. Stover, y R. Shoureshi, "Mobile robots in mine rescue and recovery", *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 16, núm. 2, pp. 91–103, 2009.
- [5] J. Green, "Mine rescue robots requirements: Outcomes from an industry workshop", en *6th Robotics and Mechatronics Conference, RobMech*, 2013, pp. 111–116.
- [6] O. Quiroz, "Desarrollo y construcción de una suspensión para robots móviles usados en ambientes no estructurados", Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2020.
- [7] S. Skaar y W. Brocman, "Means and method of camera space manipulation", 4,833,383, 1989.
- [8] M. J. Seelinger, S. B. Skaar, y J. D. Yoder, "Mobile camera-space manipulation", US 6,194,680 B1, 2001.
- [9] A. Cárdenas, B. Goodwine, S. B. Skaar, y M. J. Seelinger, "Vision-Based Control of a Mobile Base and On-Board Arm", *Int. J. Rob. Res.*, vol. 22, núm. 9, pp. 677–698, 2003.
- [10] M. Seelinger, J. D. Yoder, E. T. Baumgartner, y S. B. Skaar, "High-precision visual control of mobile manipulators", *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 18, núm. 6, pp. 957–965, 2002.
- [11] V. Medina Rivera, A. Cardenas, y H. Medellin Castillo, "Kinematical design and simulation of a mobile robot with adaptable suspension", en *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE*, 2011, vol. 7, núm. Volume 7: Dynamic Systems and Control; Mechatronics and Intelligent Machines, Parts A and B, pp. 277–284.
- [12] S. G. Tzafestas, *Introduction to Mobile Robot Control*, 1a edición. Londres: Elsevier, 2014.
- [13] I. R. Nourbakhsh y R. Siegwart, *Introduction to autonomous mobile robots*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2004.

- [14] J. M. Rendón-Mancha, A. Cárdenas, M. A. García, E. González-Galván, y B. Lara, “Robot positioning using camera-space manipulation with a linear camera model”, *IEEE Trans. Robot.*, vol. 26, núm. 4, pp. 726–733, 2010.
- [15] S. B. Skaar, I. Yalda, y W. Brocman, “Nonholonomic camera-space manipulation”, *IEEE Trans. Robot. Autom.*, vol. 8, núm. 4, 1992.
- [16] E. Coronado, M. Maya, A. Cardenas, O. Guarneros, y D. Piovesan, “Vision-based Control of a Delta Parallel Robot via Linear Camera-Space Manipulation”, *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 85, pp. 93–106, 2017.
- [17] R. Hartley y A. Zisserman, *Multiple view geometry in computer vision*, 2da ed. Cambridge, UK, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [18] J. A. Loredo Lopez, “Control en velocidad basado en visión de un robot paralelo tipo Delta”, Universidad Autonoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, 2018.
- [19] A. Cardenas, “Vision-guidance strategy to control hybrid holonomic/nonholonomic robots”, University of Notre Dame, Indiana, 2003.
- [20] Ó. Palmas Velasco y J. G. Reyes Victoria, *Curso de geometría diferencial. Parte 1 curvas y superficies*, 1a edición. CD Mexico: Facultad de Ciencias, UNAM, 2008.

Anexos

Anexo A

Cálculo de torque para motores

Para la selección de los motores requeridos para impulsar la suspensión en línea recta se calculó el par necesario para mover el vehículo estimando su peso total y como sistema se propone un robot móvil con dirección diferencial, como se muestra en Figura 93.

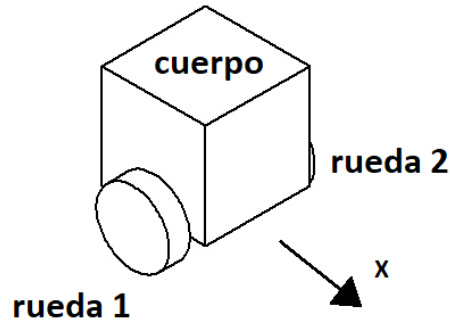


Figura 93 Sistema robot móvil.

Los diagramas de la Figura 94 muestran los diagramas de cuerpo libre de los elementos del robot móvil desplazándose una distancia x . Donde m_p es la masa del cuerpo del robot (se considera como la suspensión y toda la plataforma de carga), m_r es la masa de las ruedas. El diagrama de la derecha muestra la velocidad angular ω , el radio r de la rueda, así como también la fuerza de fricción F_f .

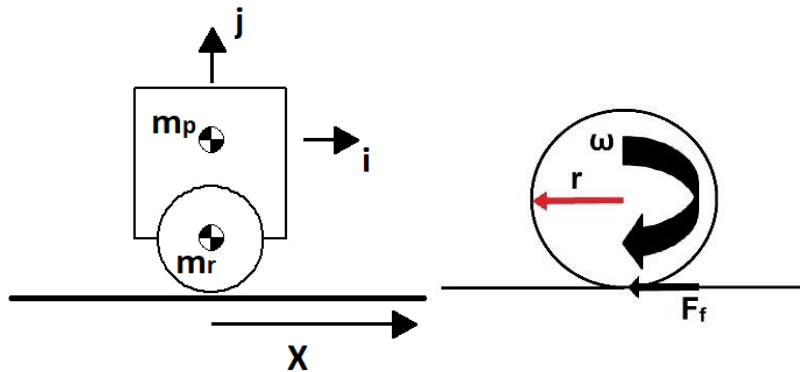


Figura 94 Diagramas de fuerzas del robot móvil.

Usando el método de Lagrange para para obtener las ecuaciones de movimiento del sistema mostrado en la Figura 94, se tiene que

$$L = T - V$$

La energía cinética se compone por

$$T = E_{trasl} + E_{rot1} + E_{rot2} + E_{trasl1} + E_{trasl2}$$

$$E_{trasl} = \frac{1}{2} m_p (\dot{x}i \cdot \dot{x}i) = \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 \leftarrow \text{cuerpo del robot}$$

$$E_{trasl1} = \frac{1}{2} m_r (\dot{x}i \cdot \dot{x}i) = \frac{1}{2} m_r \dot{x}^2 = E_{trasl2} \leftarrow \text{ruedas}$$

$$E_{rot1} = E_{rot2} = \frac{1}{2} \omega_3^2 I_{33} \leftarrow \text{ruedas}$$

$$T = \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 + 2 \frac{1}{2} m_r \dot{x}^2 + 2 \frac{1}{2} \omega_3^2 I_{33}$$

$$T = \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 + m_r \dot{x}^2 + \omega_3^2 I_{33}$$

No presenta energía potencial $V = 0$, por lo tanto, la ecuación lagrangiana queda como

$$L = \frac{1}{2} m_p \dot{x}^2 + m_r \dot{x}^2 + \omega_3^2 I_{33}$$

Desarrollando para la primera variable, x se tiene que

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = Q_k$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = m_p \dot{x} + 2m_r \dot{x}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = \ddot{x}(m_p + 2m_r)$$

$$\frac{\partial L}{\partial x} = 0$$

La carga generalizada Q_k se define como

$$Q_k = -F_f \frac{\partial x_i}{\partial x}$$

F_f es la fuerza de fricción entre la rueda y el suelo.

La primera ecuación de movimiento es

$$\boxed{\ddot{x}(m_p + 2m_r) = -F_f} \quad (1)$$

Para la variable θ , considerando que $\dot{\theta} = \omega$ y $\ddot{\theta} = \dot{\omega}$ se tiene

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = Q_k$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = 2\omega_3 I_{33}$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = 2\dot{\omega}_3 I_{33}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

La segunda ecuación de movimiento es

$$\boxed{2\dot{\omega}_3 I_{33} = Q_k = M_\theta} \quad (2)$$

Ahora bien, se busca una relación entre el desplazamiento x y el giro de la rueda para obtener valores en las ecuaciones (1) y (2)

$$\begin{aligned}
 x &= s = r\theta \\
 \dot{x} &= \dot{s} = r\dot{\theta} = r\omega \\
 \ddot{x} &= \ddot{s} = r\ddot{\theta} = r\dot{\omega} \\
 \boxed{\ddot{x} = r\dot{\omega}} & \quad (3)
 \end{aligned}$$

Proponiendo valores para tener una aceleración en x se tiene que

$$\ddot{x} = \frac{\dot{x}_f - \dot{x}_0}{t_f - t_0} = \frac{0.01 \frac{m}{s} - 0}{0.05s - 0} = 0.2 \text{ m/s}^2$$

Evaluando esta aceleración en la ecuación (3) se tiene una aceleración angular

$$\dot{\omega} = \frac{0.2 \frac{m}{s^2}}{0.034m} = 5.88 \frac{rad}{s^2}$$

Sustituyendo $\dot{\omega}$ en (2) se obtiene el par necesario para hacer girar ambas ruedas a una determinada aceleración, se conoce el par de cada rueda al dividirlo por dos.

$$M_\theta = 2 \left(5.88 \frac{rad}{s^2} \right) \frac{1}{2} (0.064 \text{ kg})(0.034m)^2 = 4.35 \times 10^{-4} \text{ Nm}$$

$$\boxed{M_\theta = 2.175 \text{ } 35 \times 10^{-4} \text{ Nm}}$$

Para sustituir valores en (1) es necesario definir F_f

$$F_f = \mu(m_p + 2m_r)g$$

La fuerza total para impulsar la suspensión a la velocidad establecida previamente se define con (1)

$$F_T = \ddot{x}(m_p + 2m_r) + F_f$$

Donde

$$m_p = 12 \text{ kg}$$

$$m_r = 0.064 \text{ kg}$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\mu = 0.5$$

$$= 0.2 \frac{m}{s} (12 \text{ kg} + 2 * 0.064) + (12 \text{ kg} + 2(0.064)) (9.81 \frac{m}{s^2}) 0.5$$

$$F_T = 121.6 \text{ N}$$

Distribuyendo equitativamente la fuerza en cada rueda se tiene que

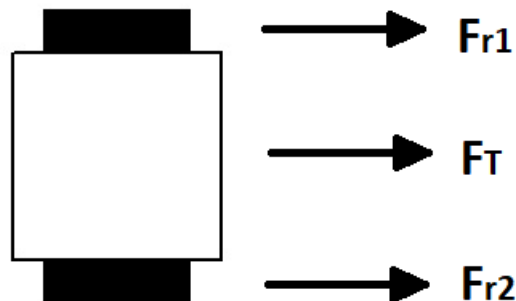


Figura 95 Fuerza total para impulsar al vehículo.

$$F_{r1} = F_{r2} = 60.8 \text{ N}$$

El par en la rueda producido por esta fuerza es de

$$M_T = 60.8 \text{ N} (0.034\text{m}) = 2.067 \text{ Nm}$$

Sumando todos los pares obtenidos del sistema se obtiene el par requerido por los motor para impulsar el vehículo con dos motores.

$$M_M = 2.175 \times 10^{-4} \text{ Nm} + 2.067 \text{ Nm}$$

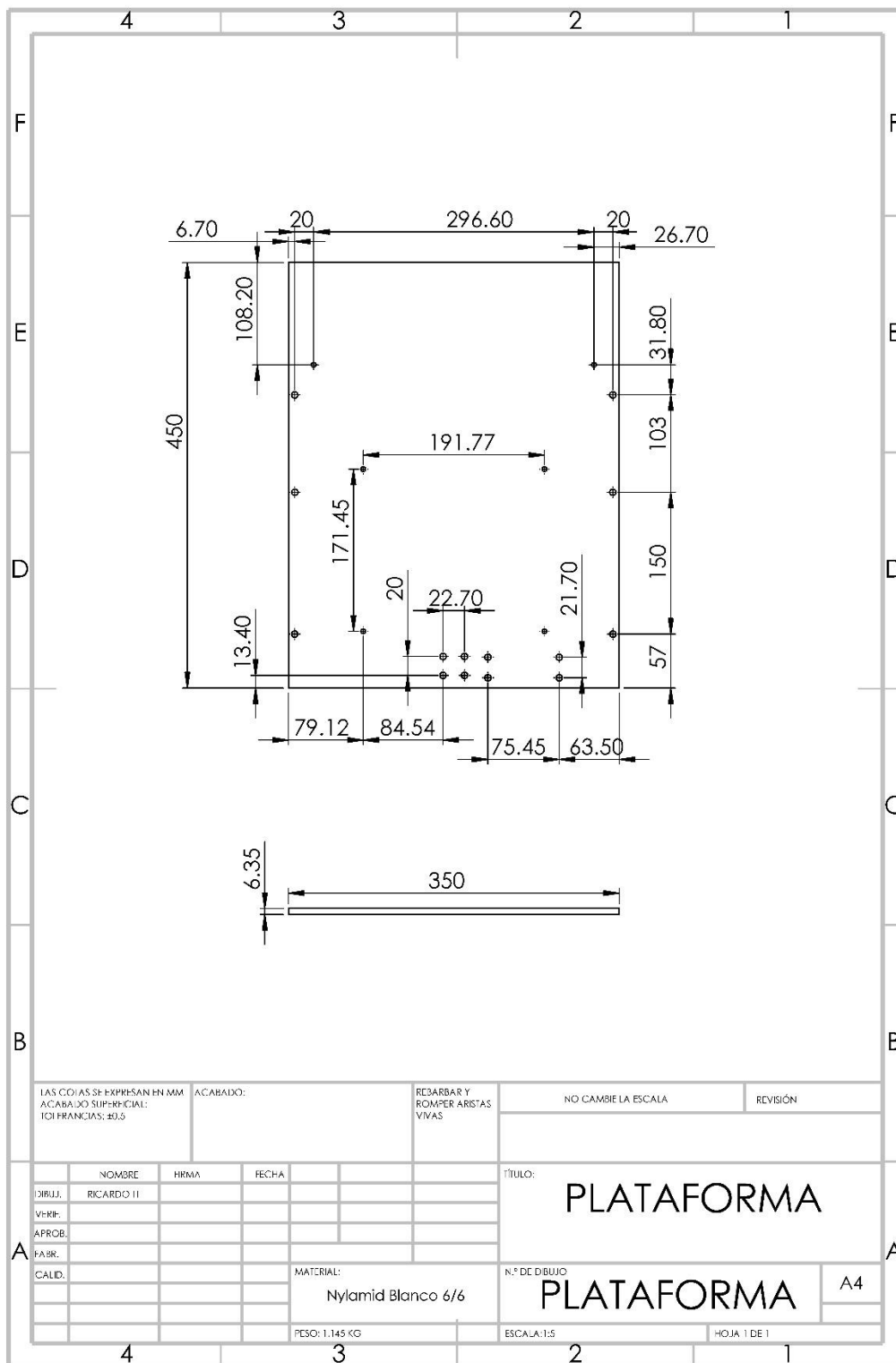
$$M_M = 2.0672175 \text{ Nm} = 21 \text{ kgf cm}$$

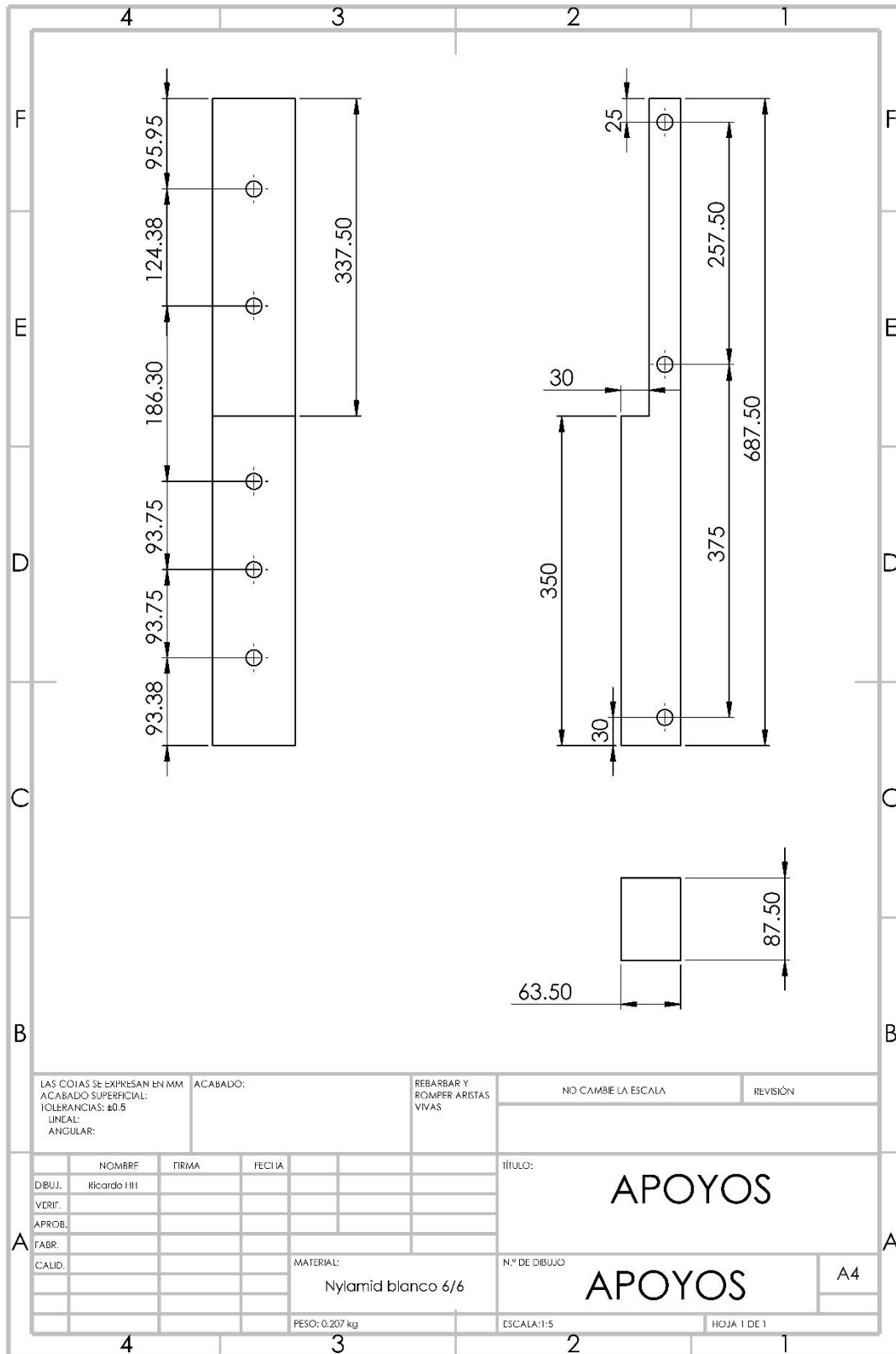
Para concluir el cálculo del par requerido para los motores, se agrega un factor de seguridad de 2 quedando en

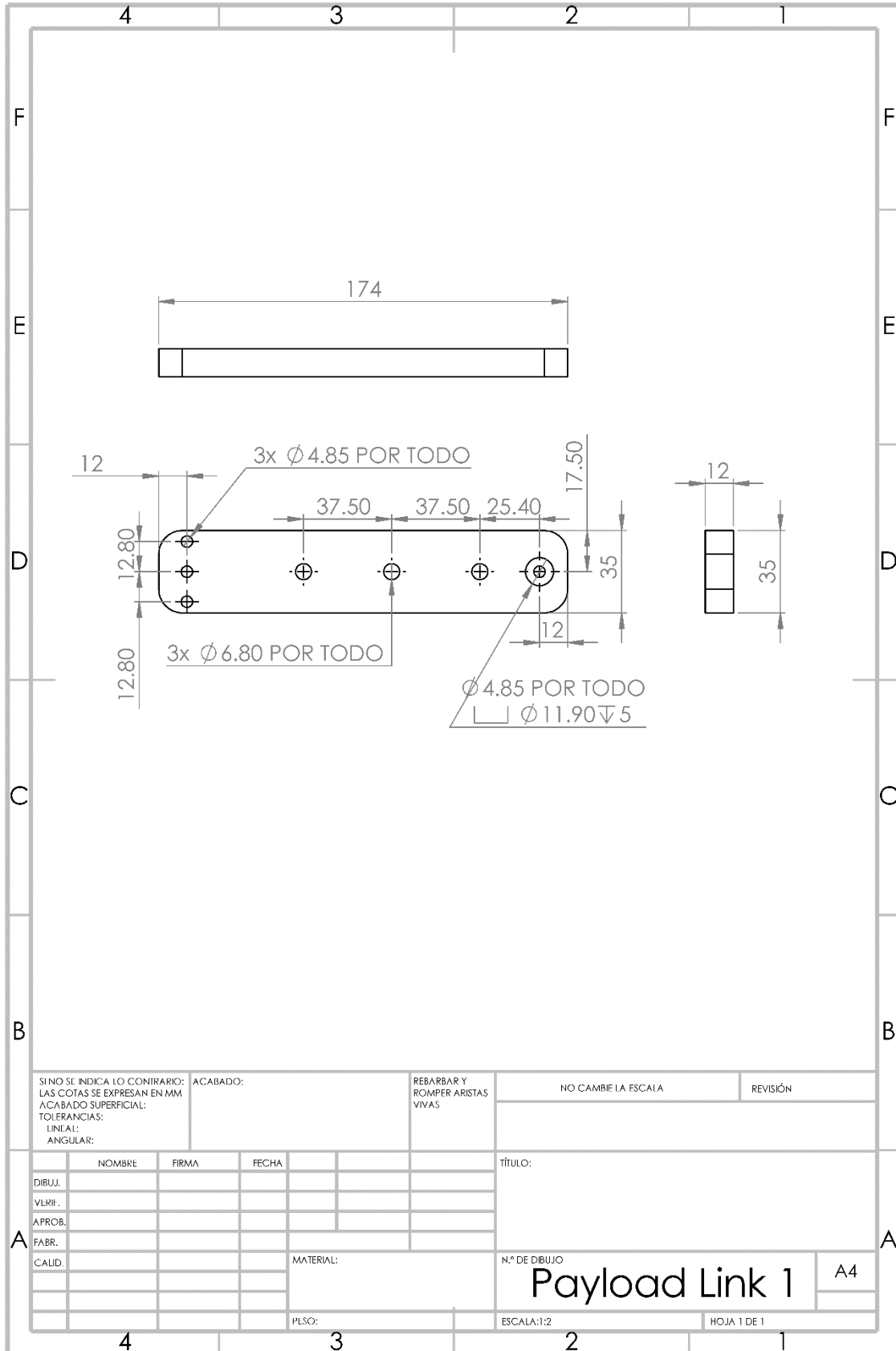
$$M_M = 4.134435 \text{ Nm} = 42 \text{ kgf cm}$$

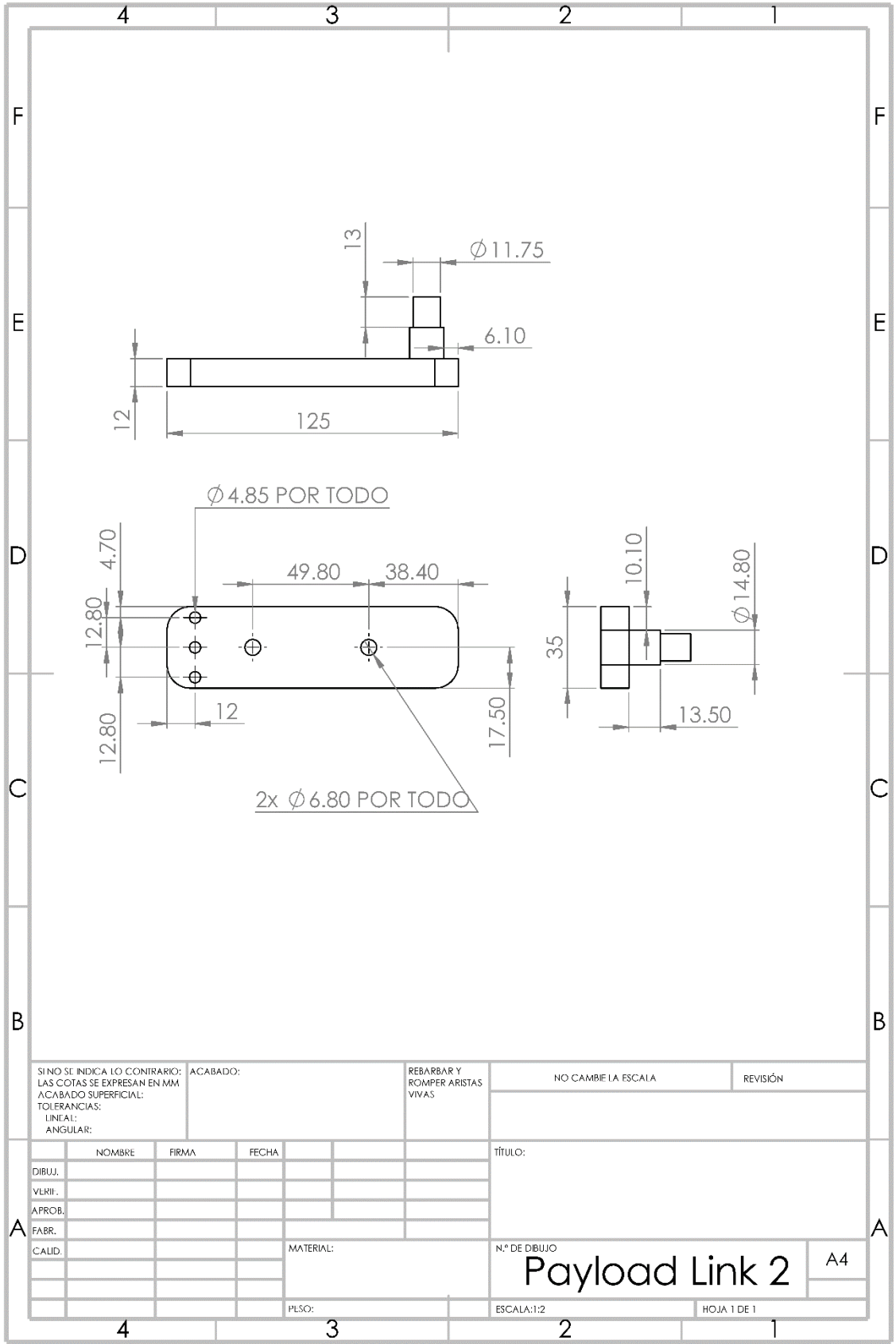
Anexo B

Planos dimensionales

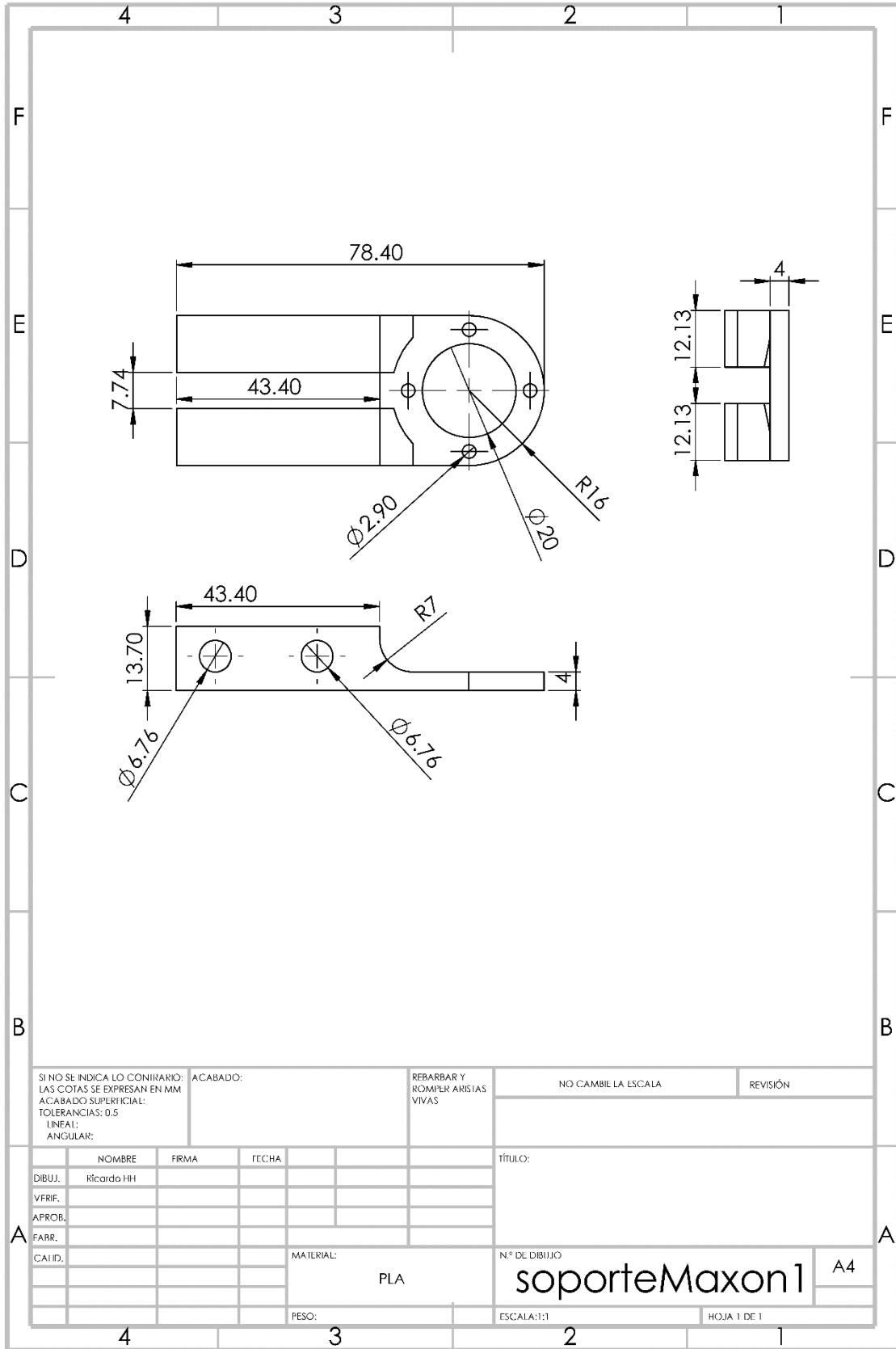




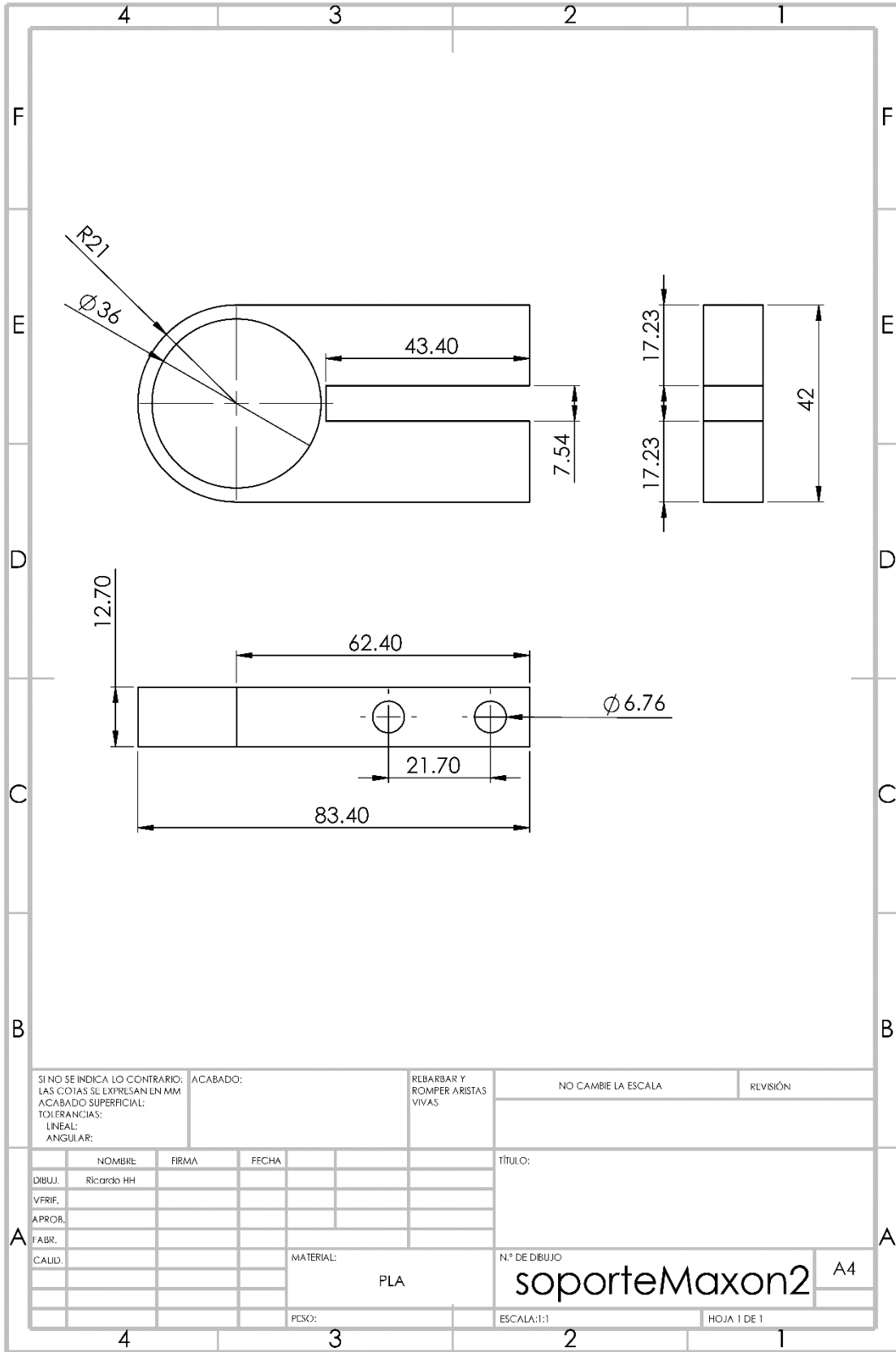




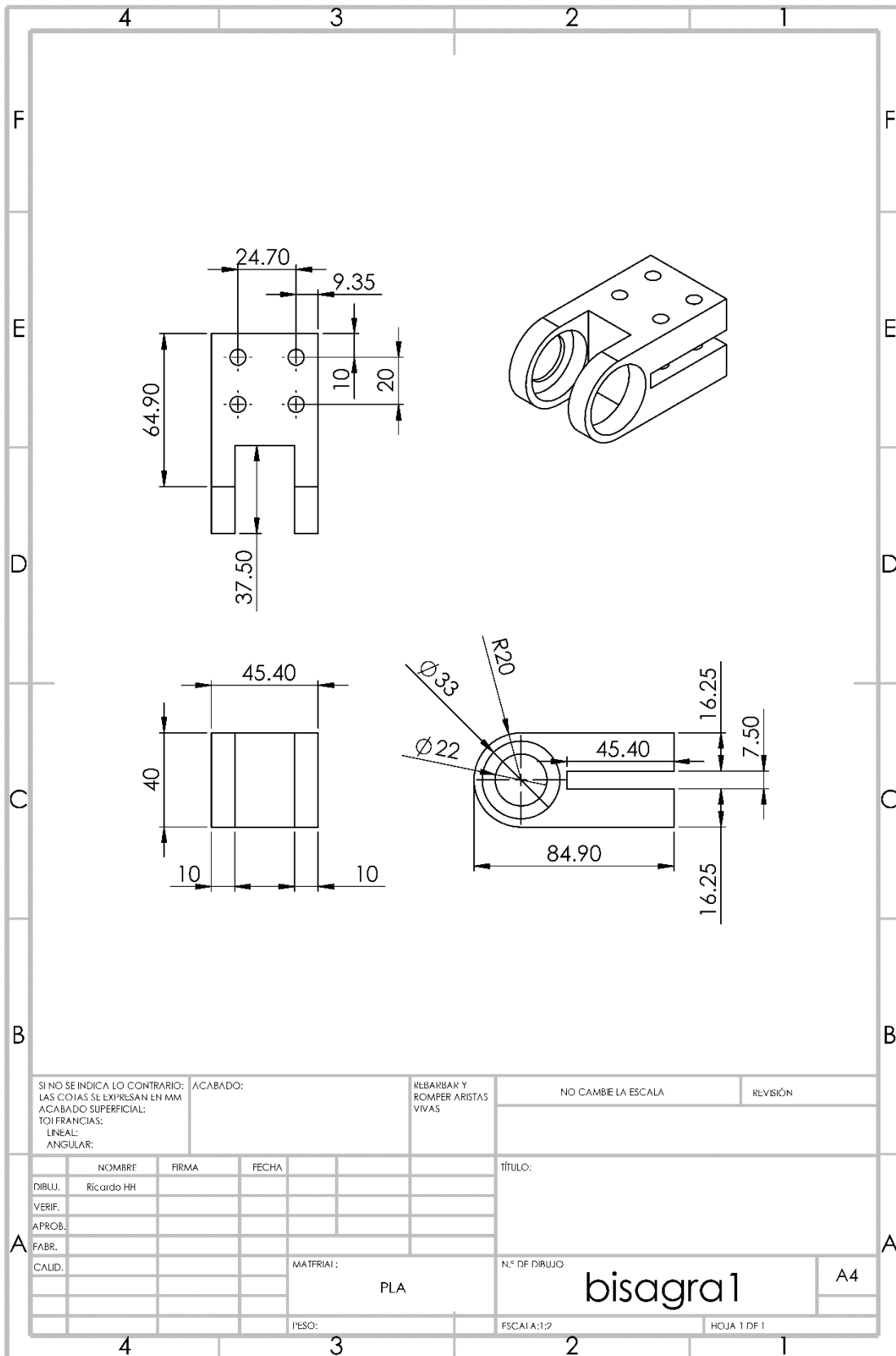
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBE LA ESCALA		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:									
TOLERANCIAS:									
LINEAL:									
ANGULAR:									
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.									
VLRII.									
APROB.									
FABR.									
CALID.									
				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
						Payload Link 2			
				PLSO:		ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1	



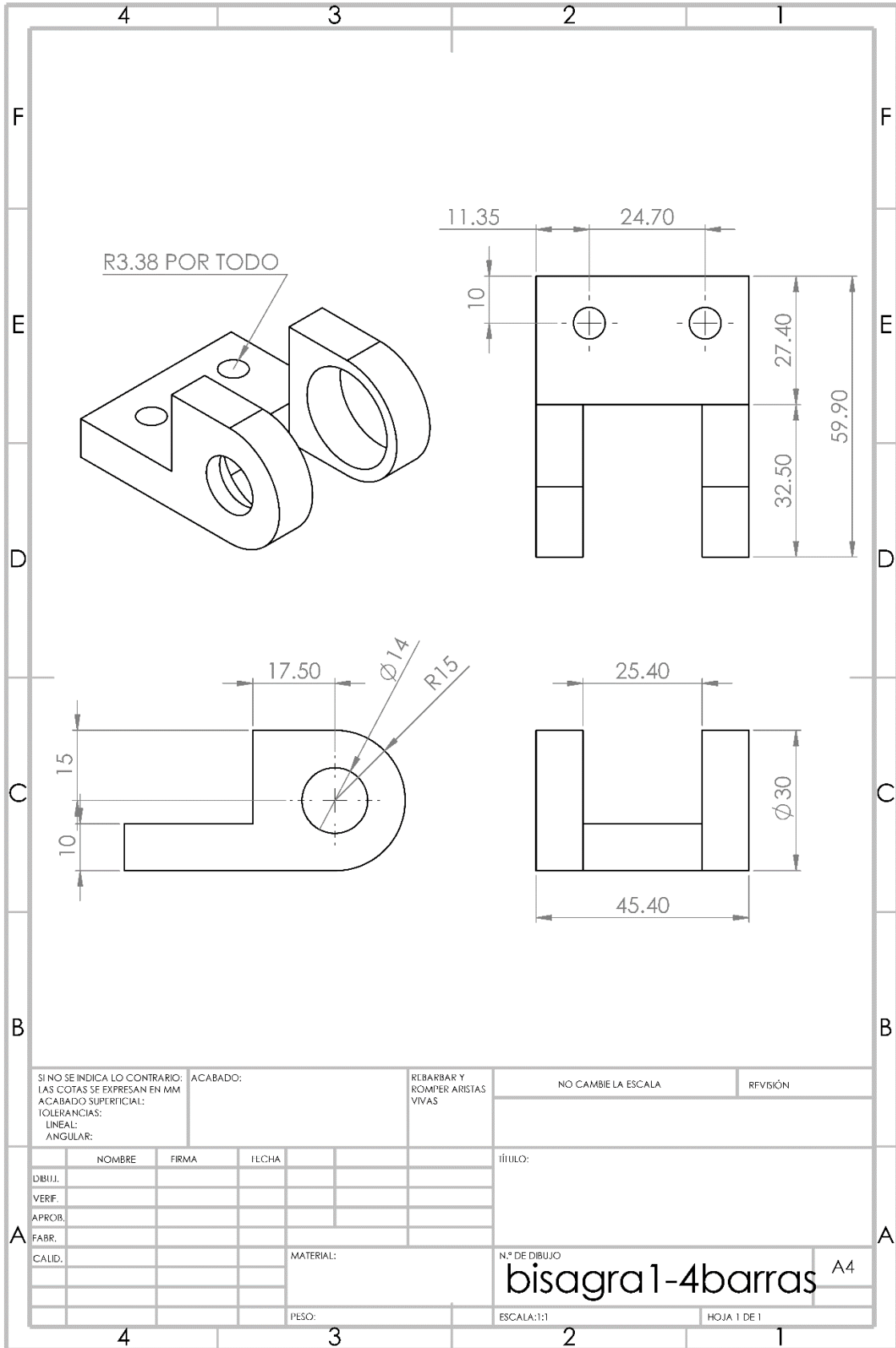
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIA LA ESCALA		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:		TOLERANCIAS: 0.5		LINEAL:		ANGULAR:		TÍTULO:	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		N.º DE DIBUJO		A4	
DIBUJ.		Ricardo HH				soporteMaxon1			
VFRIF.									
APROB.									
FABR.									
CAI ID.				MATERIAL:		ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1	
				PLA					
				PESO:					



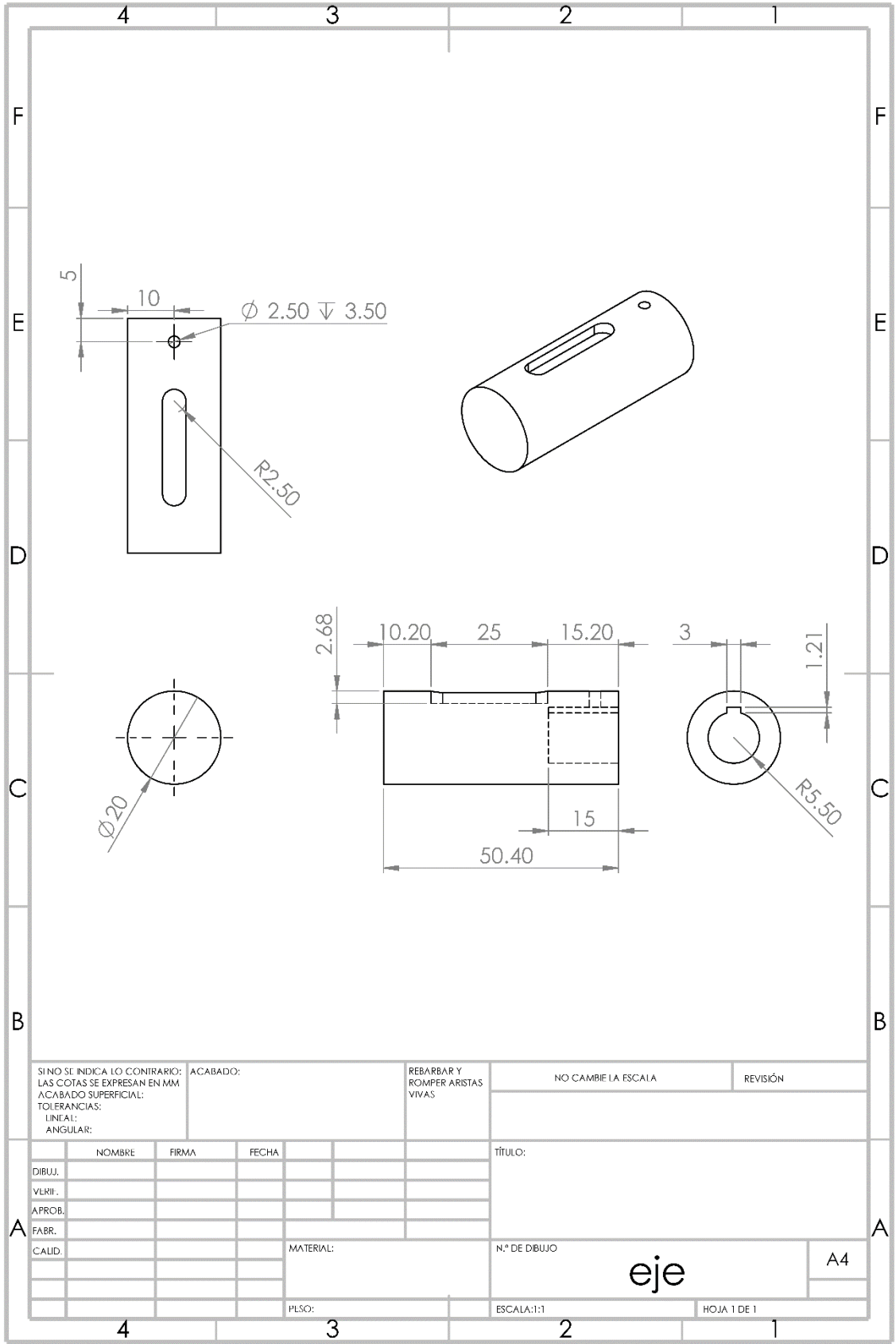
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
NOMBRE:		FIRMA:		FECHA:		TÍTULO:			
DIBUJ.		Ricardo HH							
VFRIF.									
APROB.									
FABR.									
CAUID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				PLA		soporteMaxon2			
		PLSO:		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1			

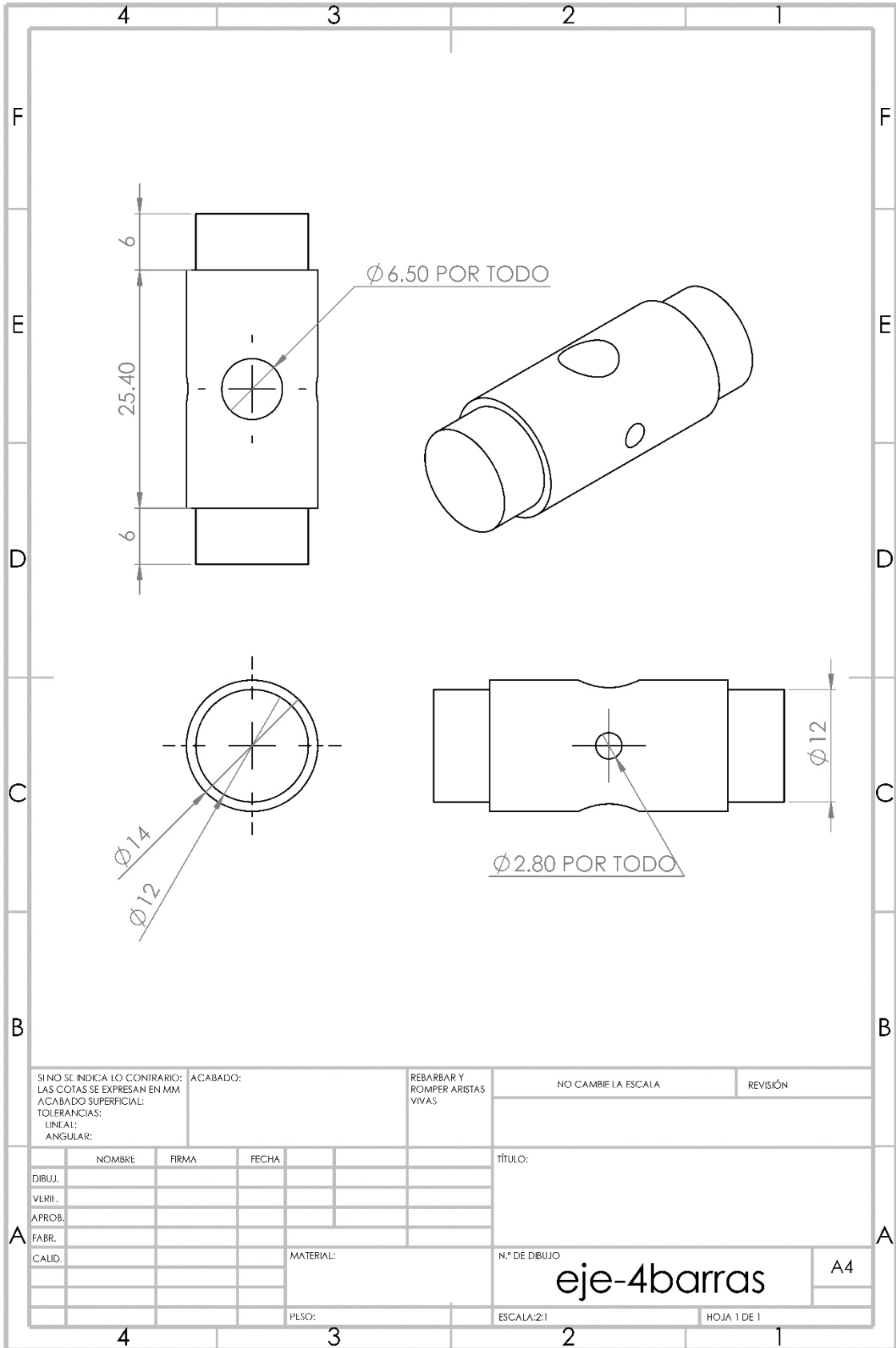


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE				TÍTULO:		
DIBUJ.	Ricardo HH	FIRMA	FECHA			
VERIF.						
APROB.						
FABR.						
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4	
			PLA	bisagra 1		
			PESO:	ESCALA: 1:2	HOJA 1 DE 1	



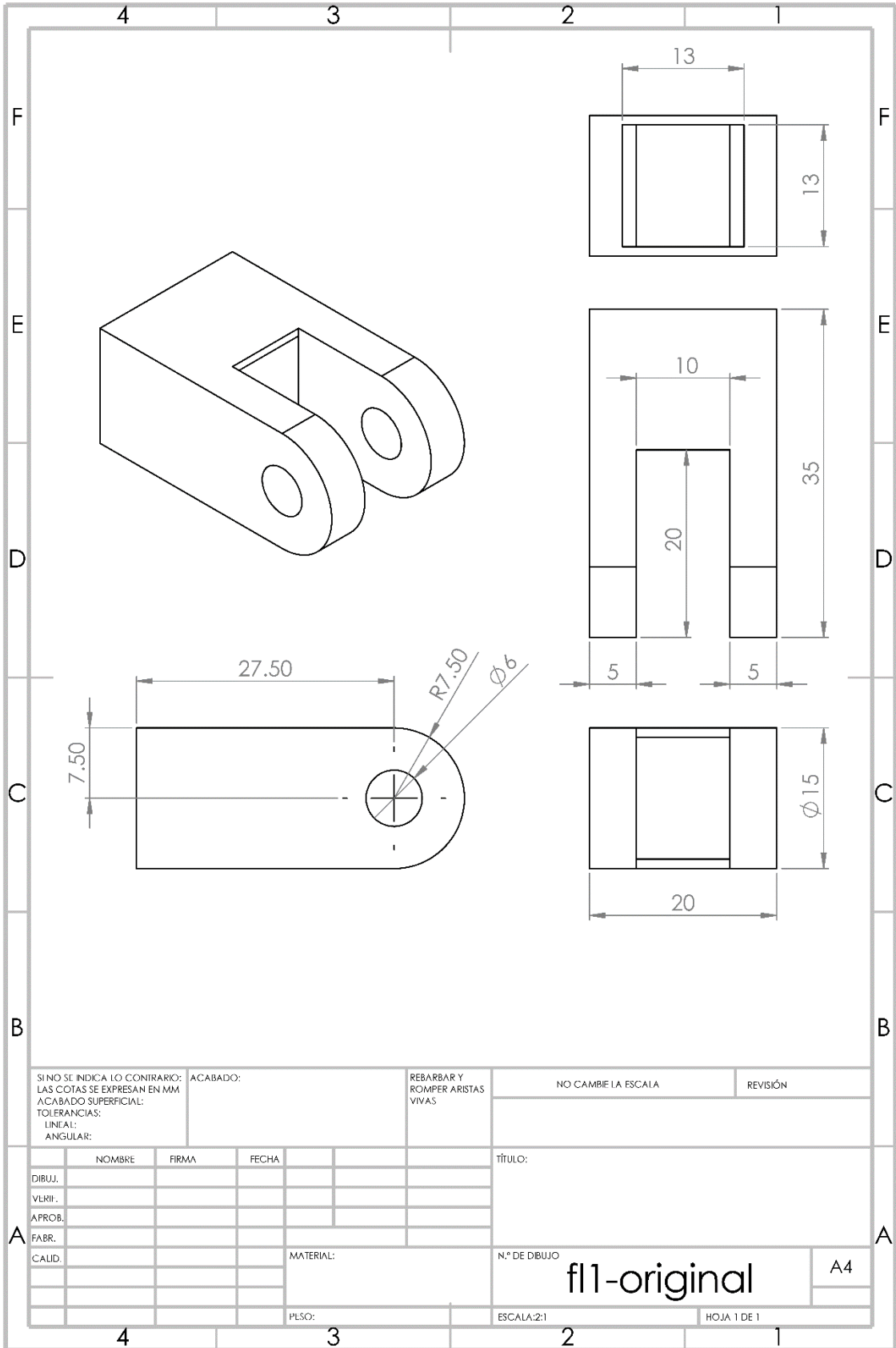
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
TOLERANCIAS: LINEAL:									
ANGULAR:									
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.									
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DBUJO		A4	
						bisagra 1-4barras			
		PESO:				ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	



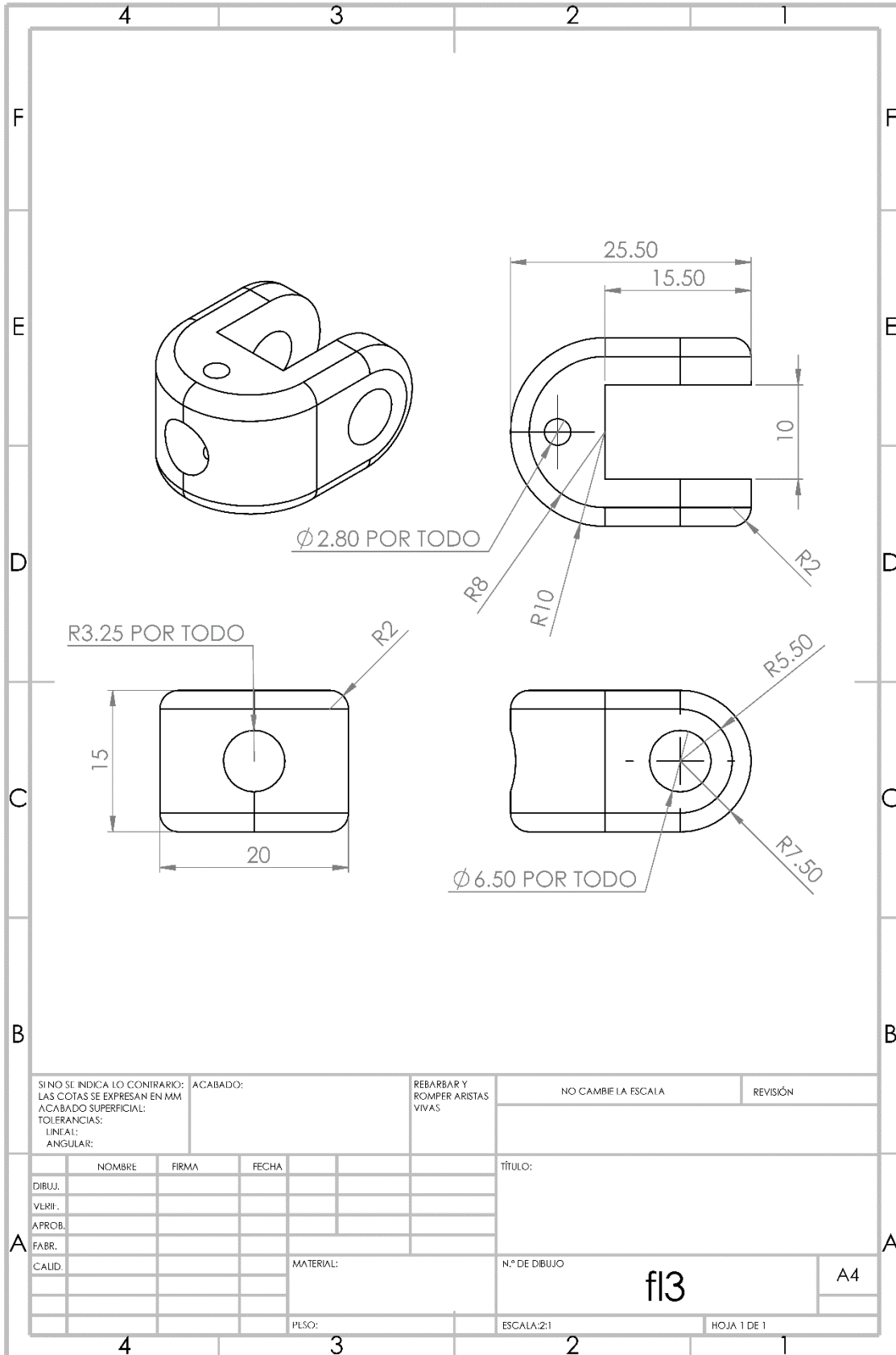


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA																															TÍTULO:	
NOMBRE	FIRMA	FECHA																																			
MATERIAL:			N.º DE DBUJO	A4																																	
PLSO:			ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1																																	

eje-4barras

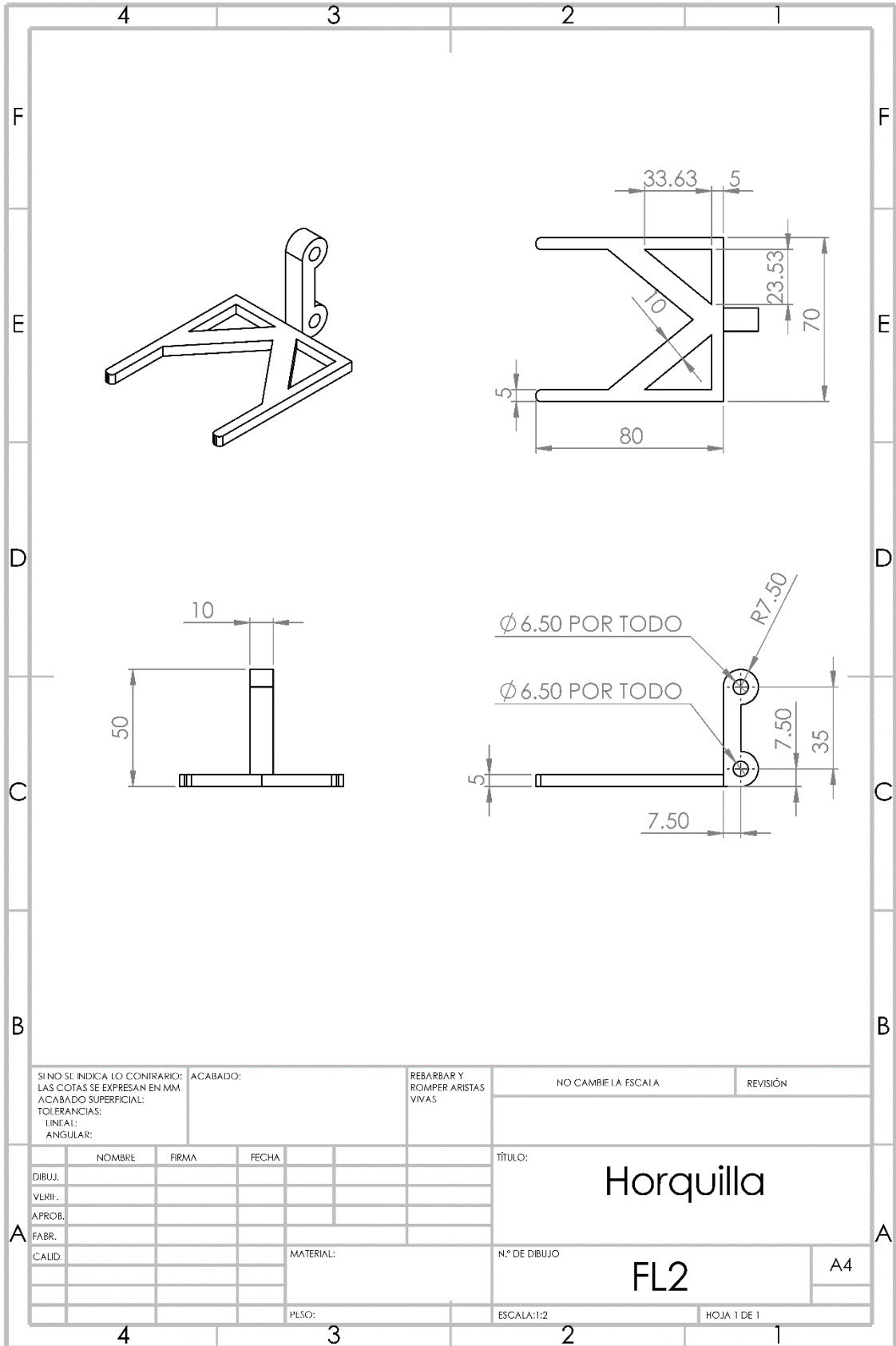


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
VLRII.					
APROB.					
FABR.					
CALID.				MATERIAL:	N.º DE DIBUJO
					f11-original
				PLSO:	A4
				ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

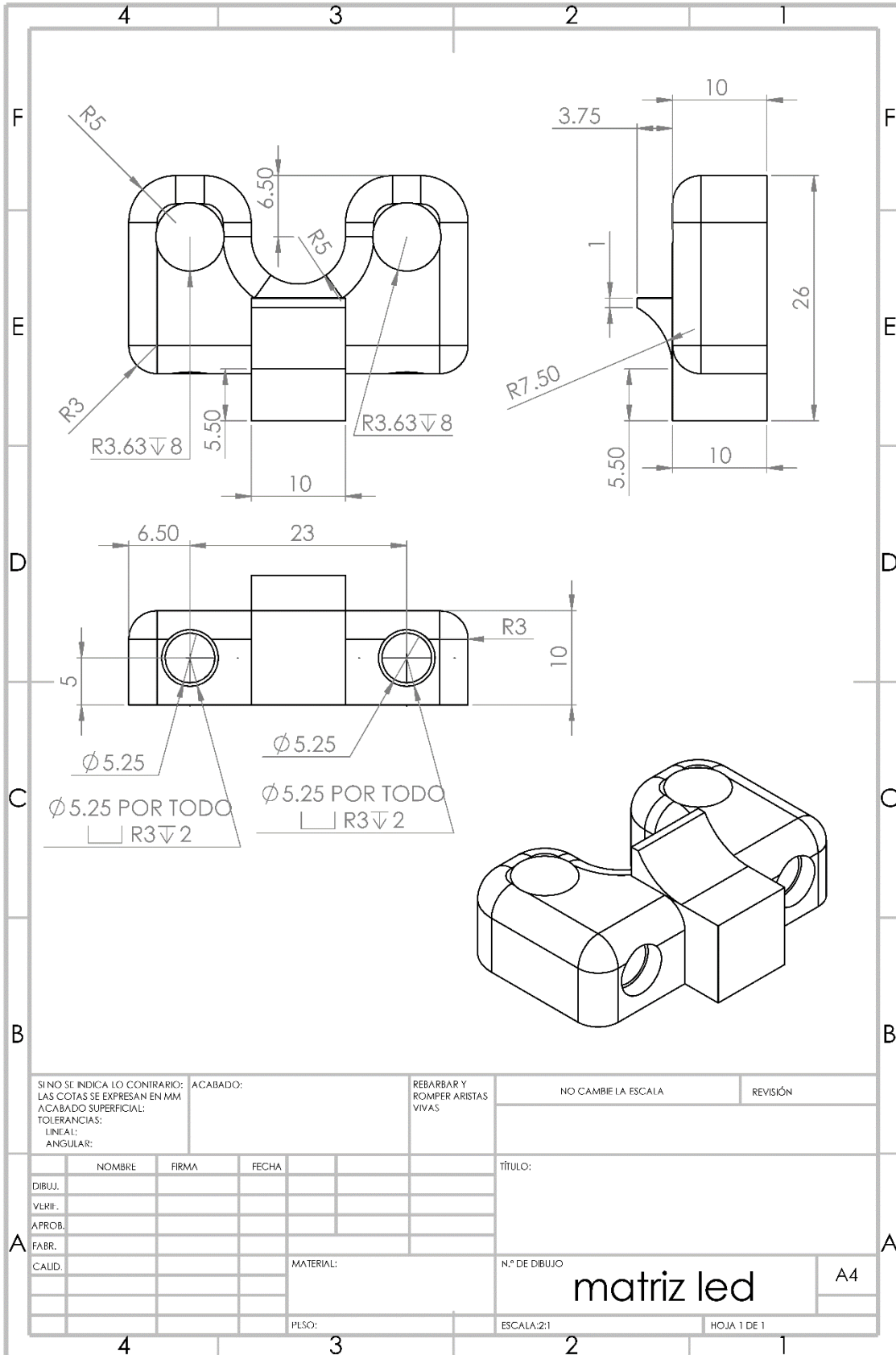


SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.		NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAID.					
		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
		PLSO:		ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1

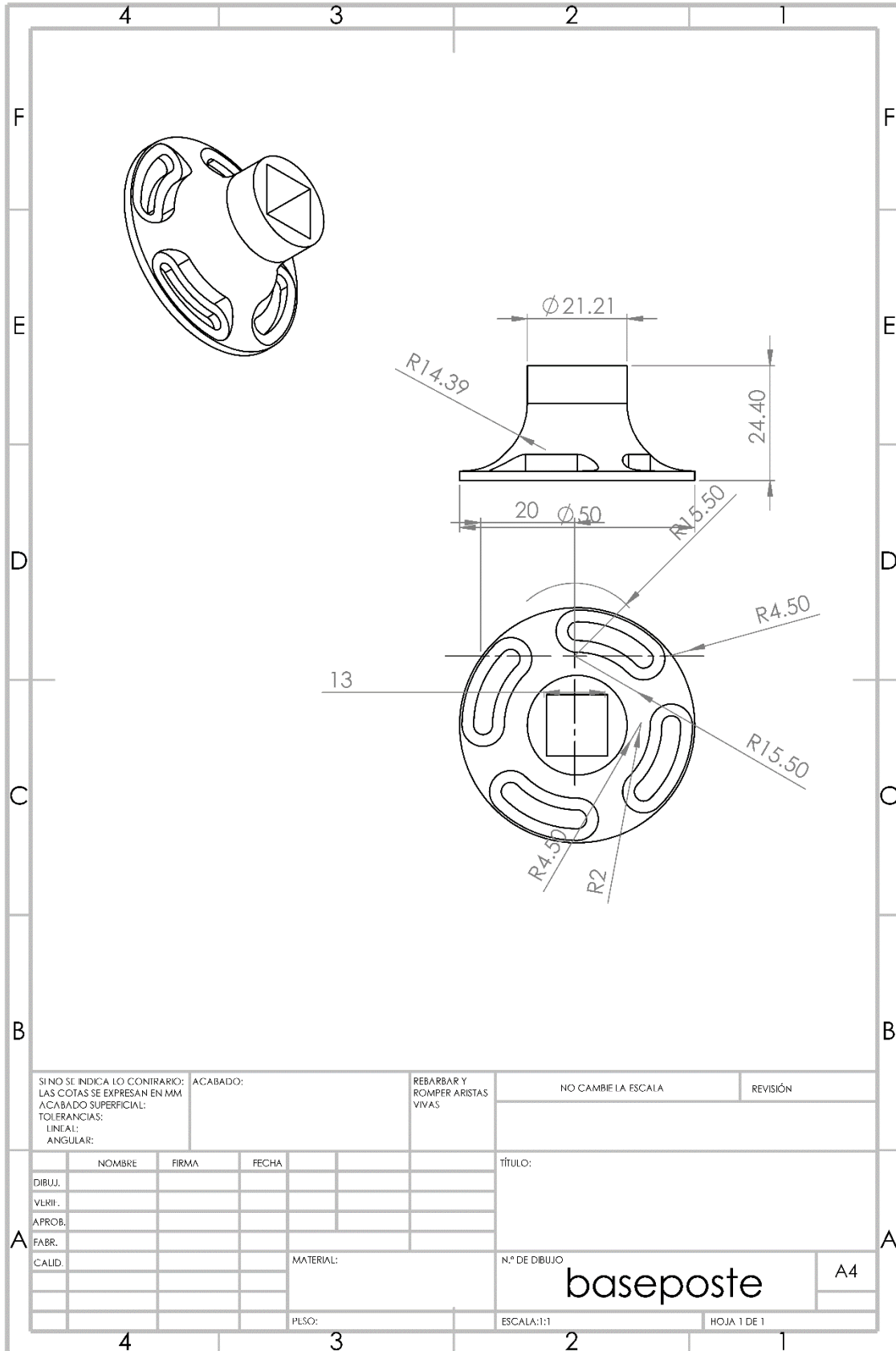
f13



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO: Horquilla	
DIBUJ.				N.º DE DIBUJO FL2	
VLRIJ.					
APROB.					
FABR.					
CALID.		MATERIAL:		A4	
		PLSO:		ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1

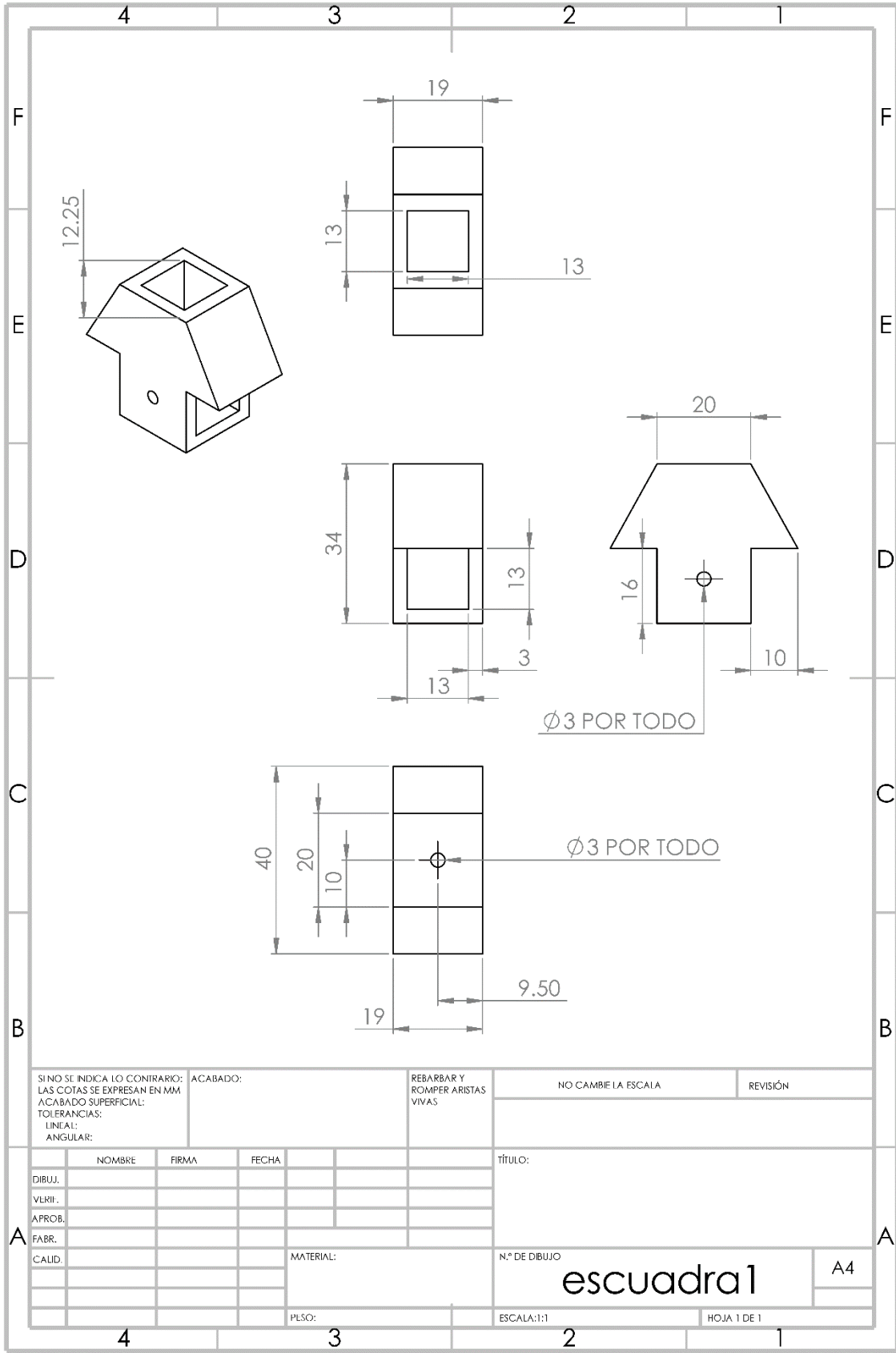


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.		NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CALD.					
		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
		PLSO:		ESCALA: 2:1	HOJA 1 DE 1



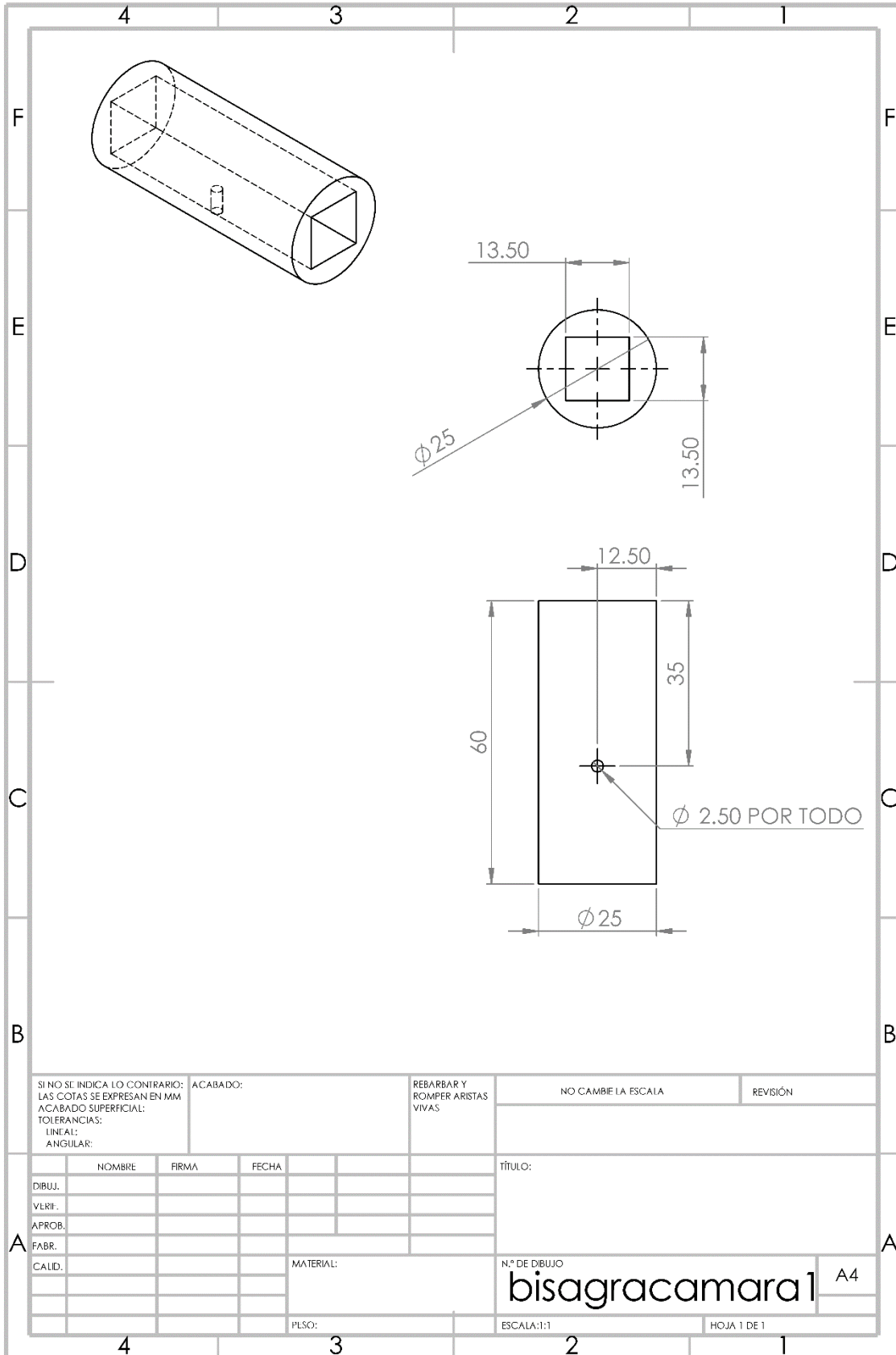
SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN	
ACABADO SUPERFICIAL:									
TOLERANCIAS:									
LINEAL:									
ANGULAR:									
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.									
VERIF.									
APROB.									
FABR.									
CALID.				MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		A4	
				PLSO:		ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1	

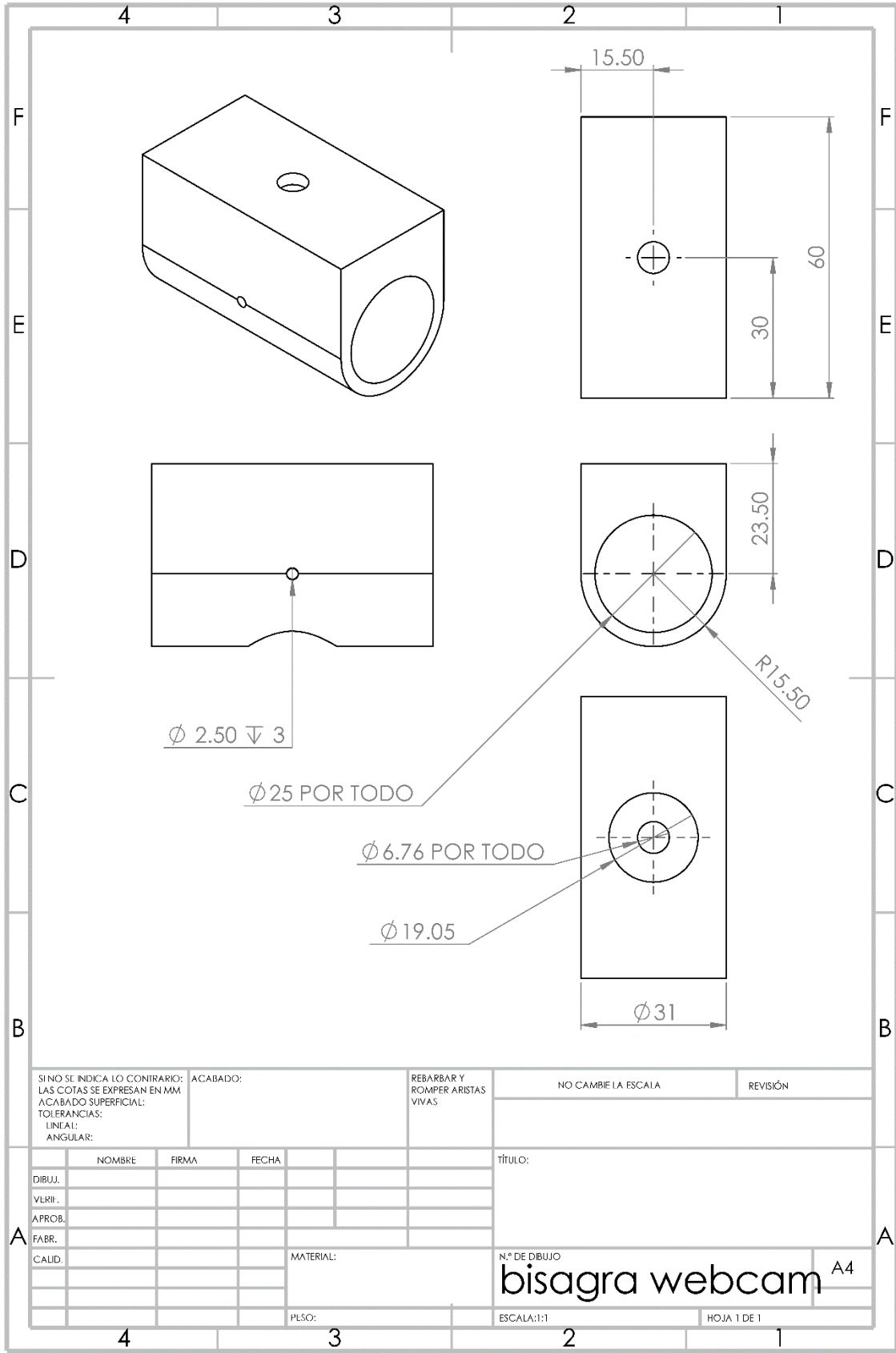
baseposte



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VLRII.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.					
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO		A4
PLSO:			ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1

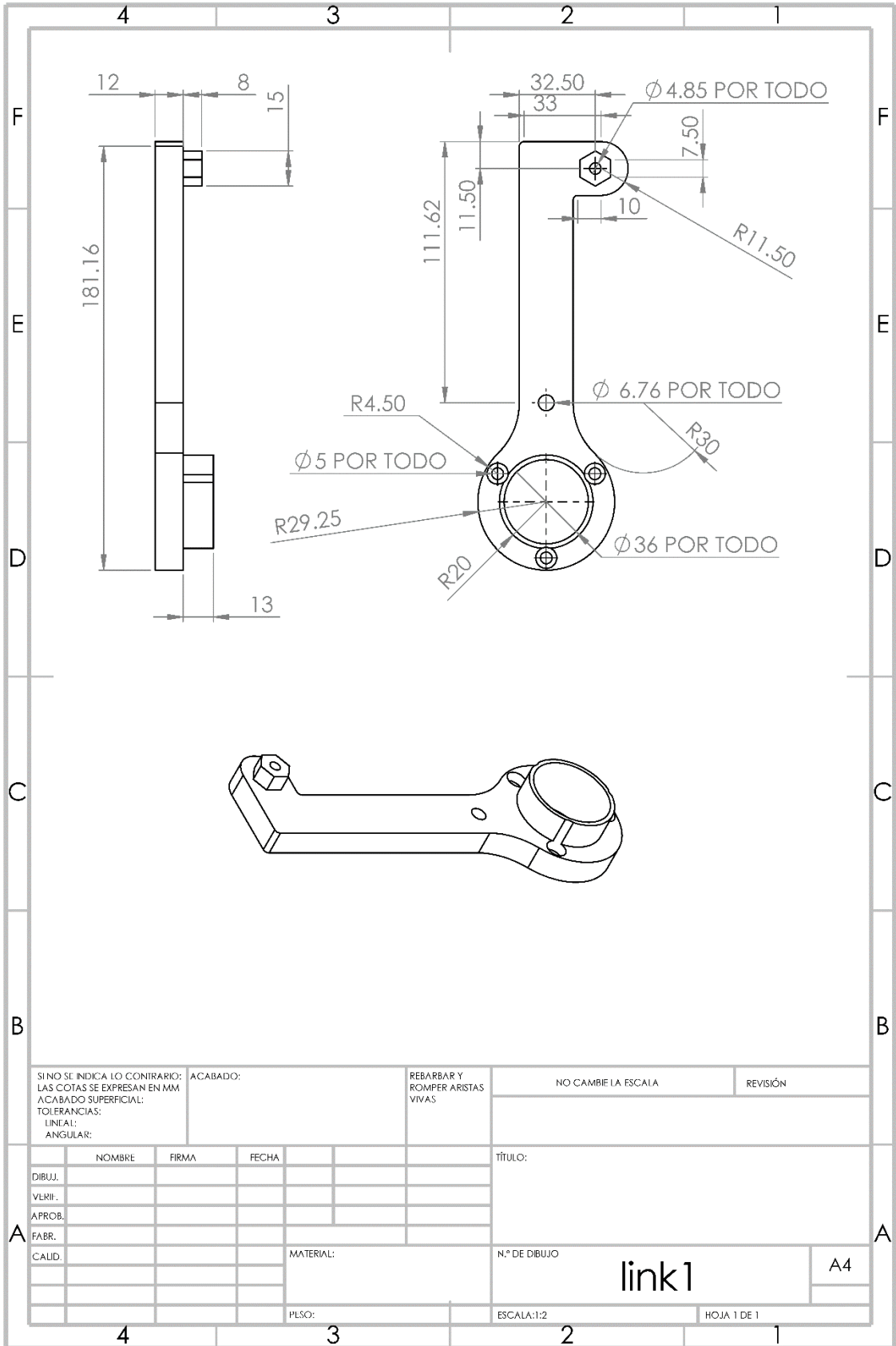
escuadra1



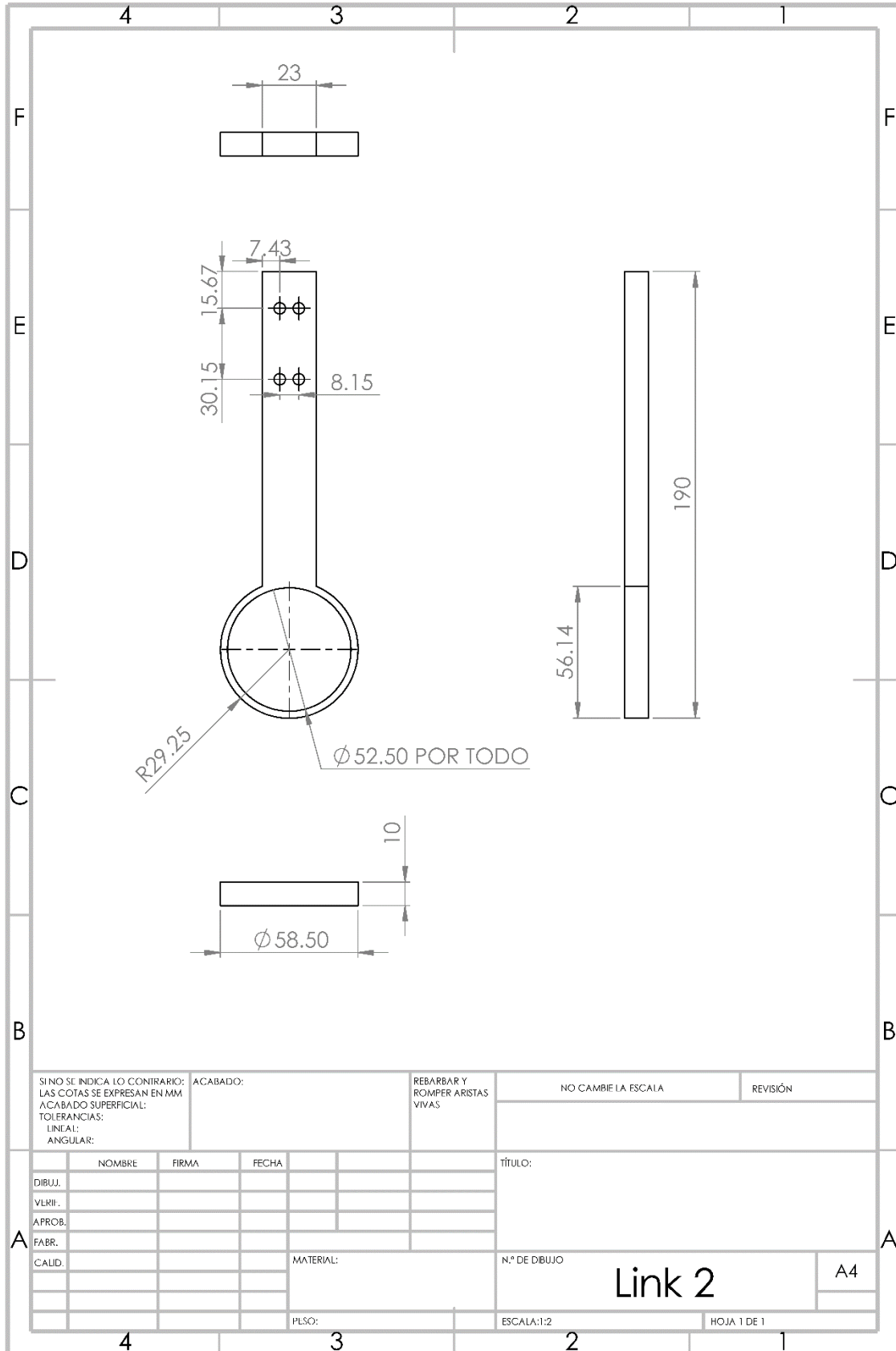


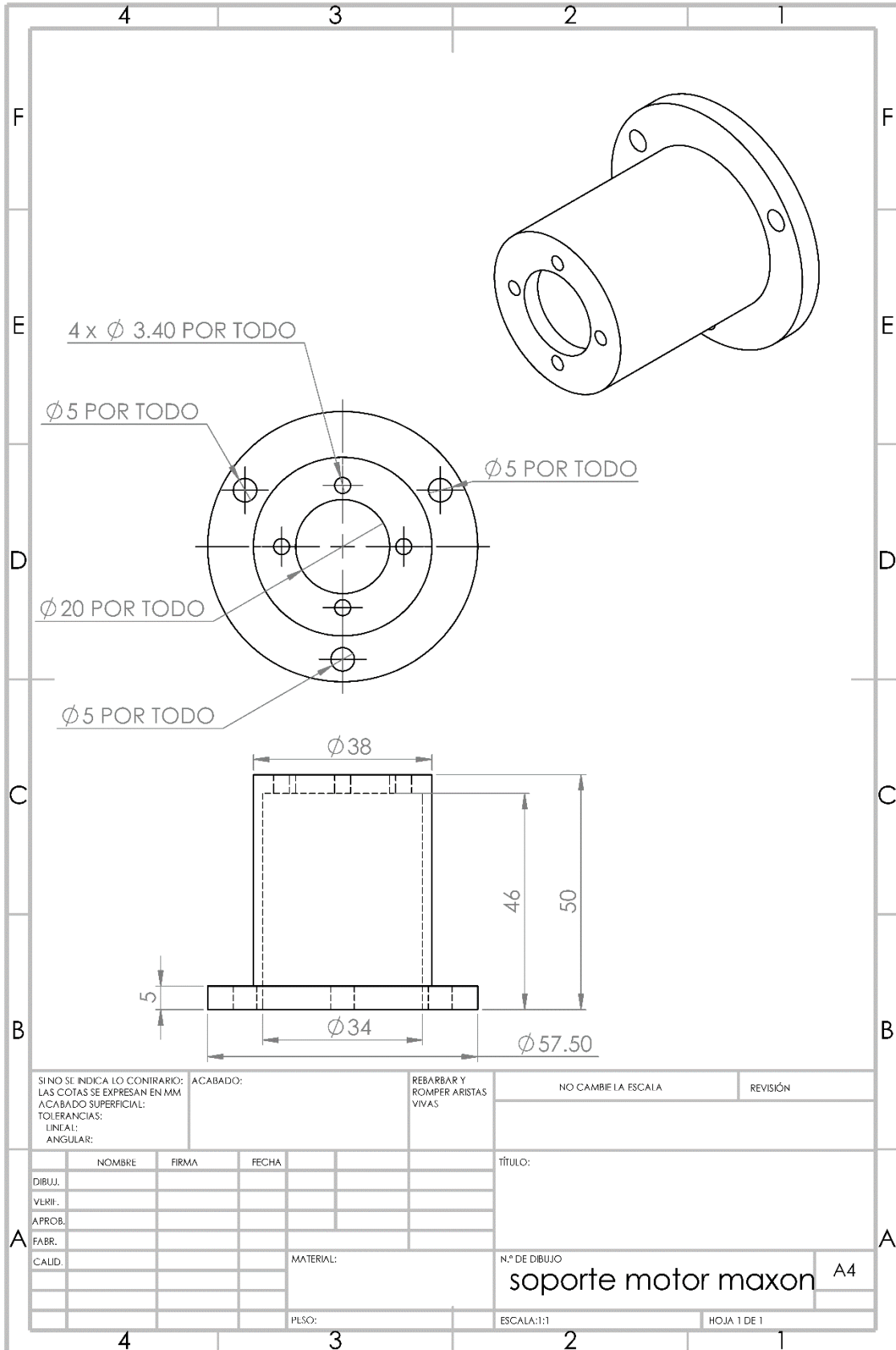
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th>NOMBRE</th> <th>FIRMA</th> <th>FECHA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>			NOMBRE	FIRMA	FECHA																															TÍTULO:		
NOMBRE	FIRMA	FECHA																																				
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO	A4																																		
PLSO:			ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1																																		

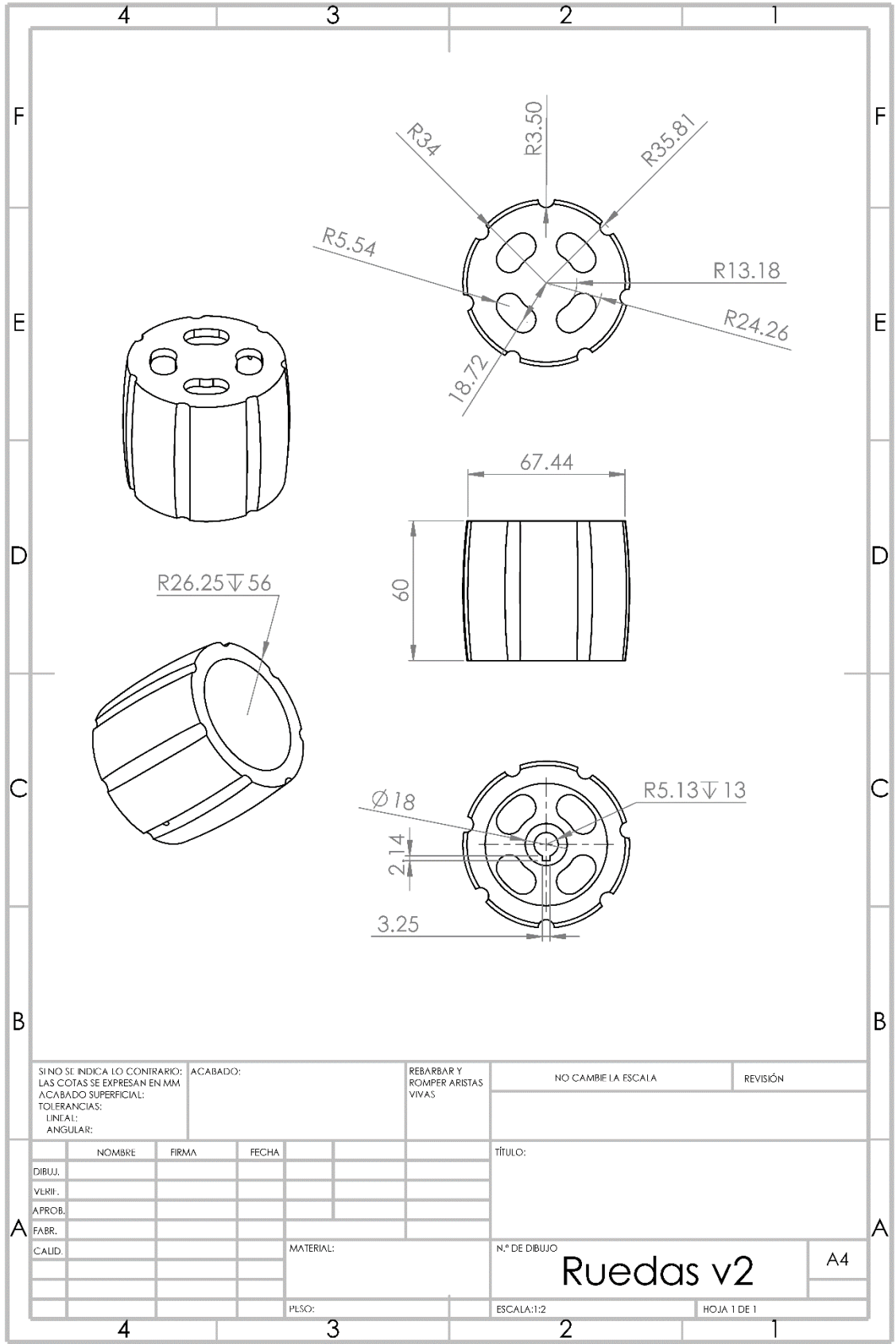
bisagra webcam A4



SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			FIRMA	TÍTULO:	
DIBUJ.			FECHA		
VLRII.					
APROB.					
FABR.					
CALID.			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO	A4
PLSO:			ESCALA: 1:2	link1	
				HOJA 1 DE 1	



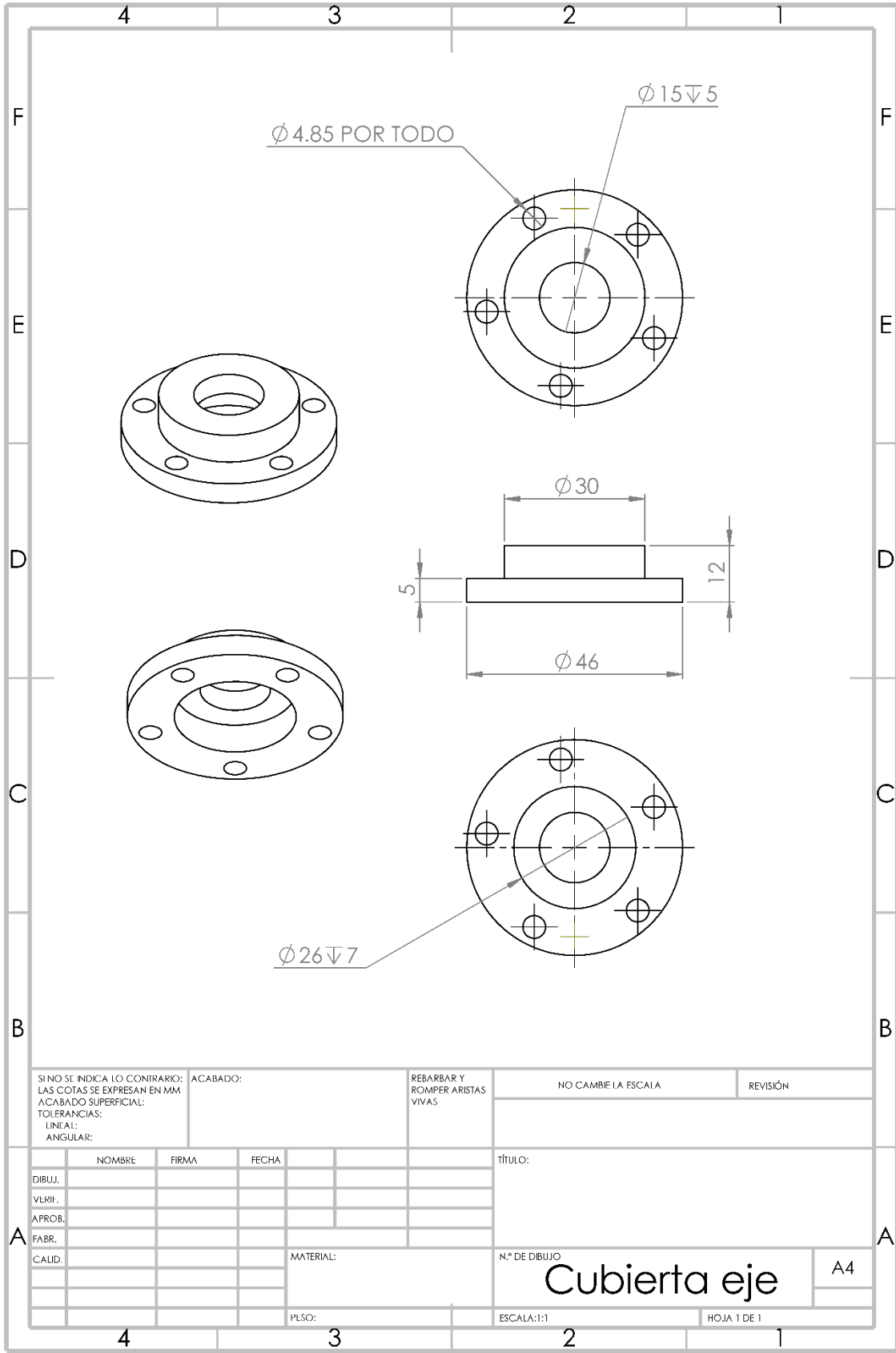




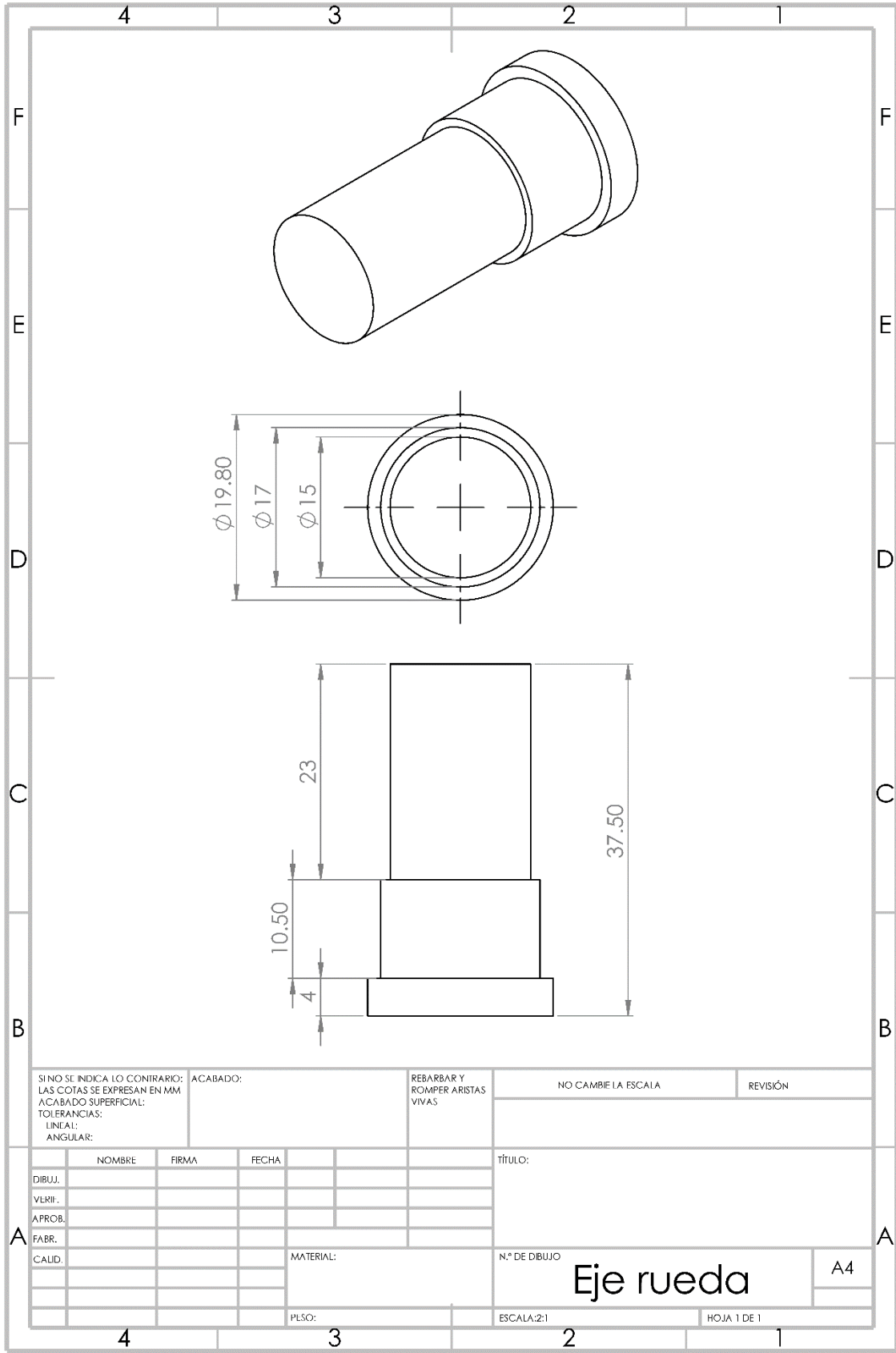
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE			FIRMA	FECHA	TÍTULO:
DIBUJ.					
VERIF.					
APROB.					
FABR.					
CAUD.					
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO		
PLSO:			ESCALA:1:2		HOJA 1 DE 1

Ruedas v2

A4

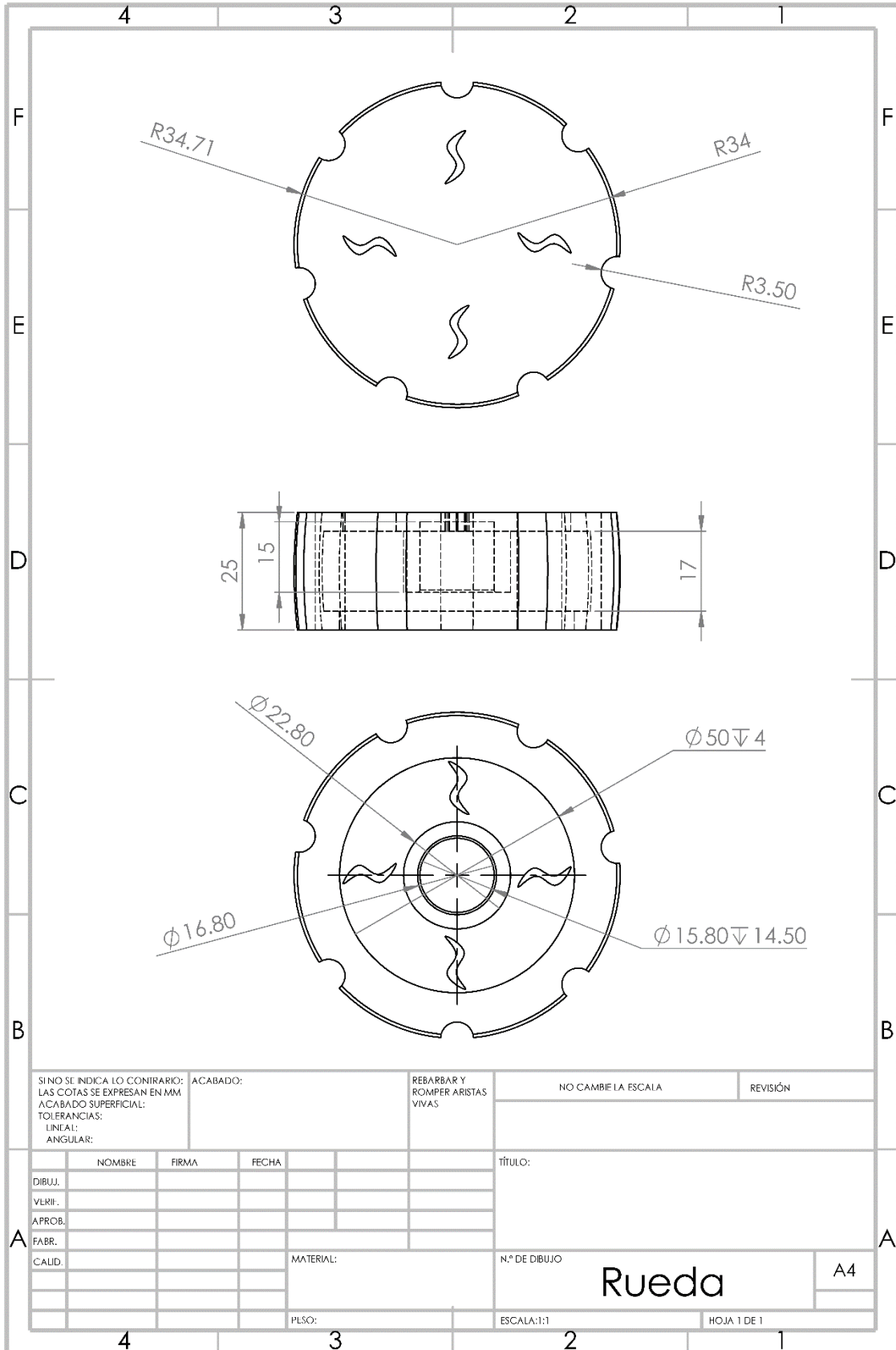


SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.		NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
VLRII.					
APROB.					
FABR.					
CAUID.					
		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
		PLSO:		ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.		NOMBRE	FIRMA	FECHA	TÍTULO:
VLRIF.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO	A4
		PLSO:		ESCALA:2:1	HOJA 1 DE 1

Eje rueda



SINO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE		FIRMA	FECHA	TÍTULO:	
DIBUJ.					
VLRIJ.					
APROB.					
FABR.					
CALID.					
MATERIAL:			N.º DE DIBUJO		
PLSO:			ESCALA:1:1		HOJA 1 DE 1

Rueda

A4

