

Plataforma terrestre móvil multipropósito económica para usos de inspección y de manipulación de cargas peligrosas

(Economical multipurpose mobile terrestrial platform for hazardous cargo handling and inspection uses)

Carlos Adrián Mainetti,ⁱ Andrés Romeroⁱⁱ y Marcelo Tulio Piovanⁱⁱⁱ

Resumen

Este trabajo presenta los resultados del desarrollo de una plataforma terrestre multipropósito para ser empleada con diferentes montajes. La plataforma está diseñada considerando concepciones donde el costo de pérdida de un equipo completo no sea altamente sensible, como eventualmente puede suceder con otros equipos completos activos en Argentina (e.g. el robot ANDROS de Northop-Grumann, cuesta más de 200.000 dólares). En primera instancia se abordan aspectos de diseño para aprovechamiento de espacios, selección de los componentes funcionales (motores, baterías, sistemas de tracción) a partir de los disponibles en mercado argentino con la finalidad de reducir sustancialmente el costo constructivo de un prototipo funcional. También se desarrollan los sistemas de control para los motores y para el rastreo por tele-cámaras y los montajes de brazos con garras de manipulación. La plataforma móvil tracciona por orugas plásticas de alta resistencia. La planta motora está conformada por motorreductores con sistemas de control desarrollados ad-hoc (basados en un DSPIC para la modulación del ancho de pulso) de manera de lograr generalidad y portabilidad con diversos tipos de motores. El control del movimiento se efectúa a través de un sistema inalámbrico con palanca de comando y botoneras ad-hoc. Se muestran pruebas de respuesta dinámica y cinemática de la plataforma ante diversos tipos de terreno. A su vez se muestra las respuestas dinámicas de accionamiento de brazo y pinza de manipulación.

Palabras Claves: Plataforma robótica, rastreo, tele-operación, manipulador robótico, impresión 3D.

ⁱ Grupo de Eléctrica y Mecánica de Automatización - UTN FRBB. mainetti@frbb.utn.edu.ar

ⁱⁱ Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada - UTN FRBB. andresrom147@hotmail.com

ⁱⁱⁱ Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada - UTN FRBB CONICET. mpiovan@frbb.utn.edu.ar

Abstract

This paper shows the results of the development of a general and multipurpose terrestrial platform to be used with different assemblies. The platform is designed considering concepts where the cost of loss of the complete equipment is not highly sensitive; as it eventually can happen with other complete systems active in Argentina (e.g. the robot ANDROS manufactured by Northop-Grumann, costs more than USD 200.000). This work addresses design aspects for space utilization, selection of functional components (motors, batteries, traction systems) from those available in the national market in order to minimize the constructive cost of a functional prototype. The control systems for the motors and for the tracking by tele-cameras and the assemblies of arms with handling claws are also developed.

The platform has traction of high resistance plastic caterpillars with rubber grippers. The motor plant consists of gear motors with control systems developed ad-hoc (based on a DSPIC for pulse width modulation) in order to achieve generality and portability with various types of engines. The control of the movement is carried out through a wireless system with a command lever and ad-hoc keypads. Tests of dynamic response and kinematics of the platform to different types of terrain are shown. The dynamic responses of arm drive and manipulation clamp are shown besides.

Keywords: robotic platform, tracking, tele-operation, robotic actuator, 3D printing.

La mayoría de estos robots provienen de la industria militar, con su consecuente limitación de acceso a tecnología, y tienen la particularidad de ser generalmente multifuncionales, es decir, a partir de una plataforma básica es posible intercambiar diferentes módulos a fin de poder realizar diferentes tareas. Accesorios tales como cámaras, pinzas, manipuladores, sensores, armas, originan configuraciones que permiten convertirlos en un robot EOD, de vigilancia y reconocimiento, de ataque, de inspección, etc. Estos robots tienen un costo de adquisición elevado y se consiguen a no menos de USD 200000 cada uno. El “know-how” es otro inconveniente de importancia, al no poseer toda la información constructiva del mismo, la mayoría de las veces se hace necesario recurrir a la fábrica para su reparación y mantenimiento, produciendo un costo adicional importante. Como experiencia, en 2009/2010, un EOD Andros del Escuadrón Antiexplosivos de la Policía de la Provincia de Buenos Aires fue reparado por el Centro de Investigaciones en Mecánica Teórica y Aplicada (CIMTA) y el Grupo de Investigación de Mecánica Aplicada (GEMA). Este evento, incentivó la creación de una línea de investigación con el objetivo de producir una plataforma terrestre móvil genérica de bajo costo, aunque con el mayor grado de completitud.

Así pues, en este artículo se presenta el desarrollo de un prototipo funcional para una plataforma terrestre móvil de bajo costo para manipulación de cargas peligrosas. El artículo contiene aspectos de enfoque sistémico (Pahl et al, 2007) en la toma de decisiones sobre el diseño global de la plataforma y las variantes que pueden montarse sobre la misma. De esta manera el artículo continúa conformado como sigue: exposición de las condiciones y requisitos del equipo y partes modulares, exposición de los aspectos constructivos de cada parte modular y funcionalidad asociada, evaluación de las respuestas dinámicas, conclusiones finales.

2. Condiciones del problema y descripción global

El enfoque de diseño de un equipo complejo exige la necesidad de formular requisitos y exigencias (Pahl et al, 2007), en tanto que del desarrollo del diseño deben quedar satisfechas sino todas, la mayor cantidad. Para este problema, se necesitan cumplimentar los siguientes requisitos (con su nivel de cumplimiento: mandatorio o preferible):

- a) Plataforma de Fabricación y reposición simple (mandatoria).
- b) Plataforma robusta: capacidad de tracción mayor a 50 kg (preferible).
- c) Garantía de tracción en planos inclinados continuos (mandatoria)
- d) Garantía de tracción en diversos suelos (mandatoria)
- e) Conjunto manipulador brazo-pinza de bajo peso y alta resistencia

- (mandatoria).
- f) Conjunto manipulador que permita movimiento en los tres ejes (mandatoria)
 - g) Incorporación de sensores de presión en la garra (preferible).
 - h) *Garantía* de agarre sin riesgo de deslizamiento por diseño mecánico (mandatoria).
 - i) Capacidad de levantar bultos de hasta 1 kg (preferible)
 - j) Extensión del brazo actuador con posibilidad de alcanzar una distancia de 60 cm completamente desarrollado, sin riesgos de posibles vuelcos (mandatoria)

A partir de estas exigencias se ha efectuado un proceso de selección de entre los prototipos básicos conocidos en la literatura para evaluar las variantes que se pueden permitir en la medida que se satisfagan los requisitos de la lista mencionada arriba.

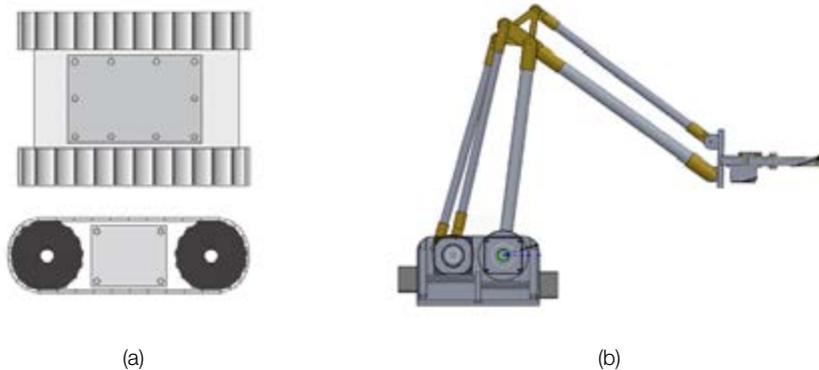


Figura 2: Módulos constitutivos: (a) Plataforma móvil, (b) brazo de manipulación.

En la figura 2 se muestran los esquemas básicos a partir de los cuales construir todo el equipo y que cumplen con casi todos los requisitos en conjunto. En los próximos apartados se desarrollará el diseño definitivo para cada módulo.

3. Descripción del módulo básico de plataforma terrestre

A partir de la formulación de requisitos y objetivos expuesta en el apartado anterior, se propuso un prototipo base para el módulo de la plataforma móvil terrestre. En sí, se trata de un vehículo de estructura simétrica con dos ejes de propulsión independiente vinculados a sendas orugas de tracción como se muestra en los esquemas de la Figura 3.

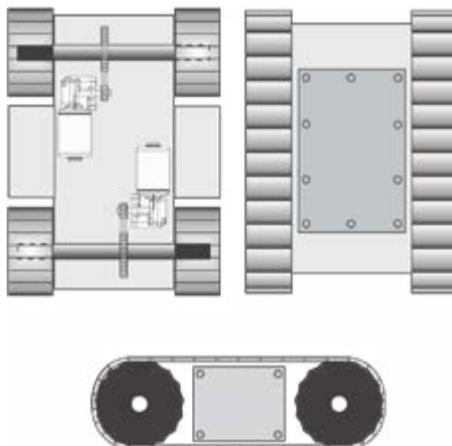


Figura 3: Configuración de tracción de la plataforma

Los motores junto a las cajas reductoras del tipo sin fin corona conforman un bloque y luego se vinculan al eje de las orugas mediante una cadena de rodillos con su piñón y corona, que le proveen reducción adicional. Este tipo de configuración co-adyuva a la condición de auto bloqueo en la eventualidad que el vehículo deba permanecer detenido, especialmente en planos inclinados descendentes.

La energía es provista por dos baterías recargables de 24 V, alojadas en compartimientos estancos entre las ruedas propulsoras de las orugas, según se aprecia en la Figura 5. El vehículo se encuentra completamente equilibrado tanto en sentido axial como transversal. Todos los elementos mecánicos de potencia, transmisión, soporte y amortiguamiento se encuentran alojados y protegidos por la estructura auto portante que conforma el cuerpo del vehículo (Figuras 3 y 4).



Figura 4: Alojamiento para las baterías

Las orugas tractoras así como sus ruedas de engrane son de resina poliamídica de alta resistencia, autolubricadas, aptas para cualquier ambiente ya que no se oxidan y su peso es reducido, además de su bajo costo en términos comparativos con contrapartes metálicas de la misma índole. Los ejes de acero macizo de 25 mm se encuentran soportados por rodamientos auto alineables que absorben cualquier diferencia estructural que pudiera existir brindando una alineación perfecta además son sellados y con lubricación de larga duración, todo el conjunto estructura orugas y ejes es altamente robusto pudiendo soportar peso de hasta 2000 N, sin problemas, se han realizado ensayos de tracción con cargas normales de 1000 N y se obtiene tracción por más de 1000 N, lo que lo hace muy apto para casos de rescate. Los eslabones de las orugas tienen adherido tacos de goma para aumentar más aun el coeficiente de rozamiento entre la superficie y las orugas con el consiguiente aumento de tracción sin resbalamiento, resultando provechoso para trepar obstáculos, escalones, salientes, etc. El vehículo se encuentra completamente balanceado, que lo hace particularmente interesante para la aplicación de sistemas de estabilización dinámica concordante con dispositivos a emplear a futuro. Debe destacarse que la mayor parte de las piezas son de fabricación estandarizada lo que garantiza su fácil reemplazo y operatividad, el sobredimensionamiento de las partes hace que el vehículo resulte sencillo de mantener y resista uso y abuso sin necesidad de mantenimiento periódico ni oneroso.

3.1. Modelo cinemático de la plataforma.

El estudio de la cinemática de un robot permite establecer el modelo matemático que permite conocer el comportamiento teórico a partir de sus características físicas. En nuestro caso particular, se presenta una plataforma por guiado diferencial y se obtiene su modelo matemático, el cual es bien conocido (Baturone, 2007).

En la Figura 5, se muestra en (x,y) , la posición del centro del robot móvil y φ describe el ángulo que forma el eje de simetría del móvil respecto al eje X. Las variables de control son las velocidades de las ruedas laterales. Sean ω_i y ω_d , las velocidades de giro de las ruedas izquierda y derecha, respectivamente. Si el radio de la rueda c , las velocidades lineales correspondientes son $v_i = \omega_i c$ y $v_d = \omega_d c$. En este caso, la velocidad lineal y la velocidad angular correspondientes en el modelo son:

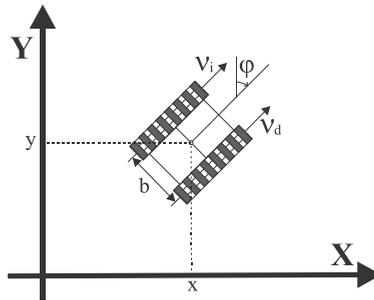


Figura 5: Esquema de una plataforma diferencial.

$$v = \frac{v_d + v_l}{2} = \frac{(\omega_d + \omega_l)c}{2} \quad (1)$$

$$\omega = \frac{v_d - v_l}{b} = \frac{(\omega_d - \omega_l)c}{b} \quad (2)$$

siendo la vía del vehículo (distancia que separa las dos orugas). Por consiguiente, si se especifican la velocidad lineal y angular del vehículo, las velocidades de giro que hay que aplicar a las ruedas izquierda y derecha son:

$$\omega_l = \frac{v - \left(\frac{b}{2}\right)\omega}{c} \quad (3)$$

$$\omega_d = \frac{v + \left(\frac{b}{2}\right)\omega}{c} \quad (4)$$

Sustituyendo (1) y (2), el modelo puede expresarse en función de estas variables de control como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(c \cdot \text{sen}(\varphi))/2 \\ (c \cdot \text{cos}(\varphi))/2 \\ -c/b \end{bmatrix} \omega_l + \begin{bmatrix} -(c \cdot \text{sen}(\varphi))/2 \\ (c \cdot \text{cos}(\varphi))/2 \\ c/b \end{bmatrix} \omega_d \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(c \cdot \text{sen}(\varphi))/2 & -(c \cdot \text{sen}(\varphi))/2 \\ (c \cdot \text{cos}(\varphi))/2 & (c \cdot \text{cos}(\varphi))/2 \\ -c/b & c/b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_d \\ \omega_l \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \dot{\varphi}(t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

A partir de la información de velocidad $(\dot{x}(t), \dot{y}(t), \dot{\varphi}(t))$, de la ecuación (6) puede obtenerse la velocidad angular de las ruedas (ω_d y ω_i).

3.2. Sistema de comunicación y software de control

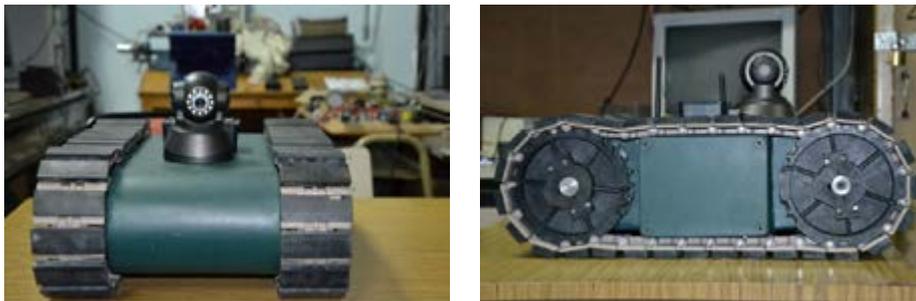
Controlar este tipo de robot a distancia permite mantener en una zona segura al personal ante maniobras con elementos explosivos o en atmósferas con un potencial *peligro de explosión*. También permite, inspeccionar áreas donde implique riesgo a la salud humana como agentes químicos o gases tóxicos.

Por ello se decidió utilizar una arquitectura como la mostrada en la Figura 6, la cual se basa en el estándar IEEE 802.11, el cual define las características de una red inalámbrica local (WLAN) y que actualmente es de uso cotidiano en hogares y negocios. Para ello, se utilizó un router inalámbrico, de uso hogareño estándar y se implementó una red WIFI entre el robot y una consola de control. Esta consola consta de una computadora personal y un joystick, y en el cual se ejecuta el programa de control del robot. El operador envía comandos a la plataforma mientras observa el entorno por donde el móvil se desplaza mediante una cámara de video colocada sobre el robot.



Figura 6: Arquitectura del sistema de control del robot.

El programa se basa en el lenguaje LabView® de National Instruments, el cual a partir de la información ingresada mediante el joystick (dirección y orientación del movimiento), se transforma en velocidades para cada uno de los motores según la ecuación (6).



(a) (b)
Figura 7. Sistema Completo. Vistas frontal (a) y lateral (b).

Por otro lado el comando de dichos motores se efectúa electrónicamente mediante plaquetas de control especiales para esta aplicación. Allí mismo se alojan los módulos de comunicación inalámbrica (Figura 12) con el operador lográndose, un comando del mismo de más de 150 metros con antena exterior (Carey et al., 2012).



Figura 8: Alojamiento del sistema de control electrónico.

Todo el sistema de comunicación inalámbrica se encuentra vinculado a internet con lo cual es posible teniendo el software adecuado su manipulación por un operador remoto desde cualquier lugar del mundo. El vehículo tiene adosado una cámara de video con sonido incorporado Figura 7. Con lo cual convierte a la plataforma en un robot de exploración, pudiendo enfocar y recorrer el campo visual con comandos independientes, esto brinda una gran versatilidad en caso de exploración de lugares inaccesibles. Su gran capacidad de tracción lo hace muy apropiado para rescatar objetos pesados e incluso para trasladar herramientas repuestos, etc. a lugares de difícil acceso. Su capacidad operativa es de unas 7 horas de trabajo continuo a carga media.

3.3. Evaluación de la tracción por orugas en distintos tipos de suelos

Se construyó un banco de ensayo con base y patines más celdas de carga con sus respectivos indicadores para determinar la fuerza tractora del sistema de orugas ante el cambio de suelos. En la siguiente Figura 9 se muestra el banco de ensayo con la plataforma terrestre ya montada y lista para el recorrido de ensayos.



Figura 9. Banco de ensayo. (a) Vista general (b) detalle de la celda de carga.

El ensayo consistió en colocar el móvil sobre una superficie predeterminada vinculándose éste a un punto de anclaje a través de una celda de carga, de modo tal que al hacer funcionar a tracción el mismo, toda la fuerza actuara sobre el elemento sensor pudiendo registrar el valor de fuerza sobre la celda de carga. Para ello se dispuso de un marco metálico ad hoc con sus respectivos puntos de anclaje así como una base para poder intercambiar los distintas superficies sobre las cuales traccionar. El vehículo no fue sobrecargado utilizándose para el ensayo tan solo el propio peso como fuerza normal, asimismo uno de los componentes resulto invariable (goma de las orugas), mientras que la otra superficie fue cambiada por los siguientes materiales: madera, goma, concreto.

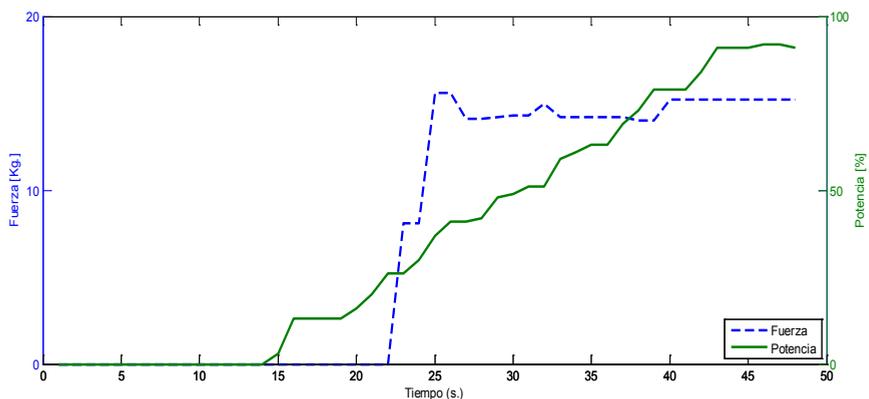


Figura 10: Fuerza vs Potencia.

El ensayo se efectuó de la siguiente forma: (a) se estableció una precarga mínima para evitar juego en el sensor. (b) se fue incrementando la potencia de los motores paulatinamente. Esto condujo a un aumento de la fuerza de tracción la cual se estabilizó (μ estático) y *posteriormente descendió al producirse el resbalamiento de las superficies mencionadas (μ dinámico).*

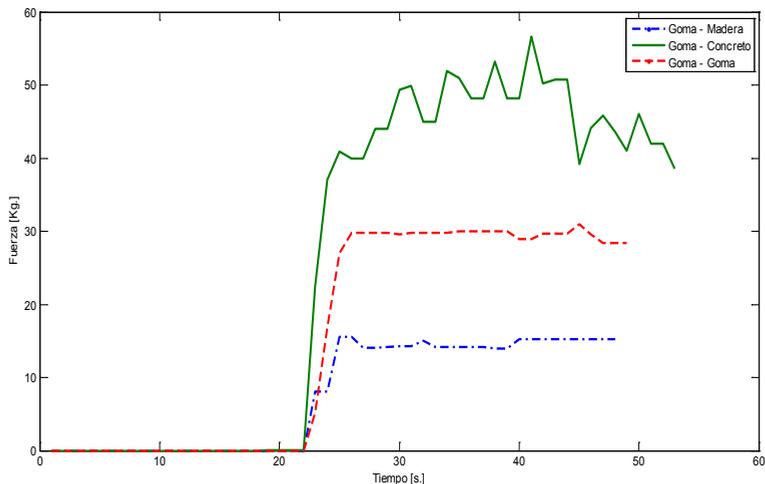


Figura 11: Capacidad de tracción en las distintas superficies.

En la Figura 11 puede verse el resultado de la fuerza obtenida por la plataforma móvil en las distintas superficies. En ella puede verse que en el concreto se obtuvo el mayor agarre de las orugas y donde se alcanzó hasta 55 kg de fuerza de arrastre sin carga adicional. Cabe aclarar que la variación de la medición en este tipo de piso fue debido a la falta de homogeneidad del mismo.

4. Diseño del conjunto de base/brazo/pinza de manipulación

En el caso del brazo robótico, los movimientos relativos entre los diversos componentes del cuerpo, brazo y muñeca son proporcionados por una serie de articulaciones. En esta sección se describe el diseño del brazo robótico, el cual incluye las características y anatomía del mismo, entendiendo por anatomía la constitución física/geométrica (cuerpo, brazo, muñeca). El brazo robótico tiene una forma similar a la del brazo humano y será capaz de realizar los movimientos según los requisitos prefijados. Porta una herramienta con forma de pinza al final de la muñeca, con la cual podrá sujetar algunos objetos. A su vez, se halla montado sobre una base rotatoria de giro completo, que le otorga al conjunto una libertad de operación de una semiesfera con radio igual al alcance del brazo, en direcciones azimutal y zenital. Con todo ello,

el diseño del conjunto base giratoria/brazo/pinza se muestra en la siguiente Figura 12, apreciándose el conjunto completamente ensamblado.

El conjunto posee cuatro partes componentes, a saber: (a) Carro de contenedor de transmisión, (b) Mecanismo del brazo, (c) Pinza de manipulación, (d) Base rotatoria. El orden de los mismos obedece a la secuencia que se resultó en el desarrollo del conjunto. Dado que todo este conjunto tiene piezas de complejidad media a alta en cuanto a su construcción, la idea subyacente en principio es emplear técnicas de construcción aditiva por deposición de filamento plástico para la fabricación de los componentes en la medida de lo posible y combinar con otros tipos de materiales.



Figura 12: Conjunto base-brazo-pinza.

4.1. Diseño del carro contenedor

El mismo representa una base sólida en la que se concentran los elementos motores del conjunto, este oficia de nexo entre el brazo y la plataforma terrestre a orugas del apartado 3 y da giro sobre su propio eje a la unidad, además en él van contenidos los siguientes elementos:

- Elementos motores:
 - Motor Nema 17 paso a paso.
 - Tornillo de avance acoplado a motor.
 - Coronas (brazo principal y antebrazo).
- Elementos auxiliares de unión y transmisión:
 - Ejes.
 - Cajas porta rodamiento.
 - Soporte brazo principal y palancas.
 - Acoples.
 - Seguros.
 - Collares de fijación.
 - Tornillería.

- Unión entre conjunto completo y la plataforma terrestre:
 - Motores.
 - Engranajes transmisores del movimiento.

La concepción original de esta parte se proyectó de manera sencilla, útil y eficaz a fin de no complicar el diseño global y que represente un elemento confiable ya que de él depende la calidad de los movimientos del brazo y la garra. Consta de un recinto con espacio destinado a soportar y dar funcionalidad a todos los elementos antes mencionados.

Desde los comienzos del proyecto el carro contenedor ha sufrido ligeras modificaciones con el objeto de mejorar el diseño, aunque el concepto siempre fue el mismo, las modificaciones a grandes rasgos consistían en una parte neurálgica de la sección como lo es el mecanismo de transmisión de potencia entre el motor, engranajes y brazo, y como éste se traduciría en un giro efectivo del mismo. En la Figura 13 se muestran dos modelos geométricos del carro contenedor con sus transmisiones sin-fin corona y las plantas motoras. La Figura 13(a) corresponde a uno de tantos casos desechados por diversas razones de tipo constructivo, geométrico u operativo, mientras que la Figura 13(b) es la que corresponde al prototipo definitivo para construcción.

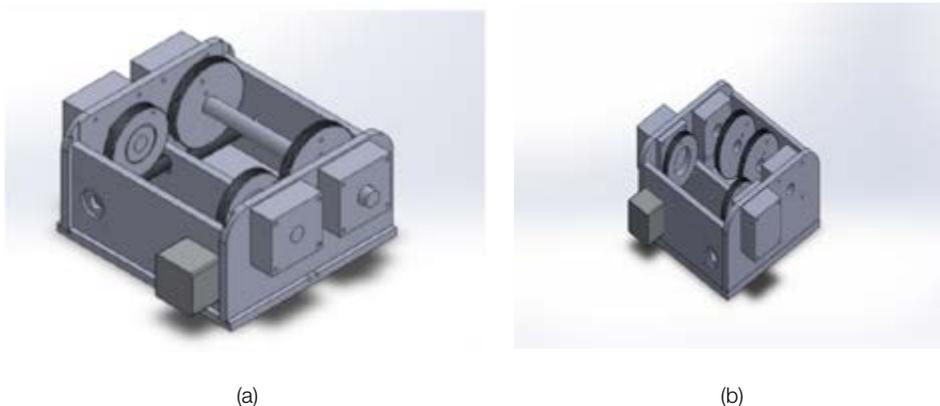


Figura 13. Modelos de carro contenedor. (a) Descartado (b) Definitivo.

El carro contenedor de la Figura 13(b), *básicamente* se compone de dos alojamientos de sección rectangular cuyas dimensiones son función directa del diámetro de los engranajes, y su principal distancia es la comprendida entre los ejes perpendiculares del tornillo sin fin y el eje de los engranajes principales, mismos que transmiten todo el movimiento.

La estructura sólida consta de paredes y plataforma de poliacetal (Marca Delrin)

con la confección siguiente:

- Paredes laterales: dan lugar a las cajas porta-rodamiento y su fijación y los ejes que soportaran los engranajes principales y las palancas del antebrazo y garra respectivamente. Estas mismas oficiarán de tope axial para el eje principal, y de soporte para la caja contenedora del eje en la parte trasera.
- Pared frontal y trasera: la misma cumple la función de darle resistencia al retenedor formando una caja cerrada, y principalmente, darle fijación al motor cuyo eje es compartido con los tornillos sinfines para cada engranaje del sistema.
- Pared central: dentro de la caja, oficiará como soporte de los ejes de cada sin fin dando posibilidad a un ajuste en altura para dar engrane. Y a su vez mayor resistencia al conjunto.
- Plataforma: cierra el contenedor dándole fijación a todas las partes anteriores y anexando todo el conjunto con la oruga inferior donde irá montado.

Como se mencionó, todo lo anterior depende en gran parte de la dimensión de los engranajes, los mismos fueron motivo de estudio al igual que el tornillo para determinar su diámetro, ya que del mismo depende que el brazo sea capaz de elevar la carga sin inconvenientes en la posición deseada, para unas características de motorización dadas. Dicho cálculo se confeccionó para la situación más desfavorable para cada par de engranajes cuyas funciones son diferentes. Se sabe que los engranajes principales realizan la alzada y el vuelco del brazo principal, y los posteriores, manejan la elevación del antebrazo (contenedor del mecanismo de garra) y el quiebre de la garra (movimiento tipo muñeca) respectivamente. Es evidente que la mayor sollicitación la poseen los primeros, los cuales tienen mayores distancias y pesos que elevar, dando como resultado un gran torque. Dichos torques a soportar están extensamente relacionados con el peso a levantar, las distancias de los brazos de palancas y las prestaciones del motor, que para todos los casos fue motivos de estudio y se confeccionaron modelos matemáticos apropiados para determinar el diámetro de rueda y garantizar el buen funcionamiento mecánico del sistema.

El cálculo de la capacidad de carga de sobre la pinza responde a un modelo simple de balance de momentos contemplando como parámetro fijo, a la potencia de los motores NEMA 17 alto torque, empleados. En este caso para la máxima extensión prevista del brazo se lograría levantar un peso de 0,5 kg.

En alusión a la totalidad de elementos que forman parte de esta sección, se procederá a detallar a continuación un listado de materiales y sus características:

- Paredes: plancha de Delrin de 10 mm de espesor de aproximadamente 1,2 m². Con este material se construye la totalidad de las partes en base a los planos mostrados anteriormente. Por medio de procesos de fabricación de maquinado convencional: aserrado, agujereados, uniones roscadas, etc.
- Mecanismo motor: todas las partes que comprenden la generación y

transmisión de potencia hacia el brazo.

- Nema 17: motor paso a paso muy famoso y conocido por su excelente desempeño sus amplias capacidades de velocidad y torque, y su difundida utilización en impresoras 3D: A utilizar, 4 motores.
- Engranajes: serán fabricados por medio de generación en barra de Delrin, conforme al paso del tornillo sin fin de media pulgada, realizados en colaboración con el Ing. Andrés Romero.
 - Principales: 80 mm de diámetro con un espesor de 20 mm, 2 unidades.
 - Secundarios: 60 mm de diámetro con 20 mm de espesor, 2 unidades.
- Vástago con sin fin: con un largo de aproximadamente 90 mm y un diámetro de rosca de media pulgada no unificada de bronce: 4 unidades.
- Acoples de 5 a 8 mm entre motor y vástago: 4 unidades.
- Ejes de media pulgada o $\frac{3}{4}$ en aluminio. 3 unidades.
- Cajas portarodamiento en impresión 3D, 6 unidades de diferentes medidas, realizas en impresión 3D.
- Elementos de fijación:
 - Tornillería.
 - Varillas roscadas.
 - Demás elementos, tuercas arandelas autofrenantes, collares, topes.

En la Figura 14 se pueden apreciar todos los elementos constitutivos del modelo antes detallado, engranajes por generación, ejes, rodamientos, sin fines, motores y adaptador para montar el varillaje de actuación en el brazo-muñeca.

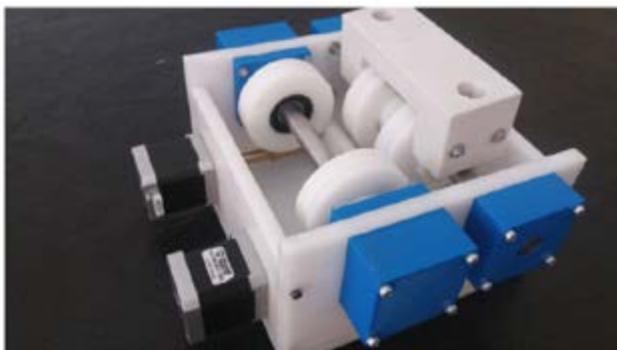


Figura 14. Carro contenedor ensamblado

4.2. Diseño del Mecanismo de barras “Brazo – Antebrazo”

En este apartado se describe el modelo constructivo del mecanismo perteneciente al brazo de manipulación, el cual es el encargado de transmitir los movimientos

de rotación de los engranajes ubicados en el carro contenedor, que comandarán el sistema, hacia la pinza de actuación. Este mecanismo consiste principalmente piezas construidas mediante impresión 3D en material PLA vinculadas a tubos de aluminio o de resina-epoxi reforzada con fibra de carbono de $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ pulgadas.



Figura 15. Montaje del brazo al carro

En la Figura 15 se muestra el esquema de montaje de las varillas del brazo y antebrazo conectados e los engranajes sin-fin/corona de transmisión de movimiento. El primer modelo diseñado, consistía en una estructura principal encargada de mantener la rigidez y soportar los esfuerzos del sistema ubicada en la parte interna del mecanismo, y una serie de barras de menor espesor las cuales se encargarían del accionamiento de los diferentes movimientos del sistema según se aprecia en la Figura 16. En efecto, en la Figura 16(a) se muestra la Estructura principal del sistema de barras, mientras que en la Figura 16(b) se muestra la Estructura secundaria del sistema de barras. Por otro lado en la Figura 17 se muestra el montaje de las varillas al carro portacontenedor.



(a)

(b)

Figura 16. Sistema de varillas. (a) Principal (b) Secundario.



Figura 17. Montaje de las varillas al carro contenedor. (a) Vista global (b) Detalle.

El sistema de tubos de aluminio está vinculado en los puntos de giro mediante piezas desarrolladas para ser construidas mediante impresión 3D.

Los tubos de aluminio fueron seleccionados según sus dimensiones y características mecánicas para soportar la carga propuesta para el trabajo y así, reemplazar impresiones 3D demasiado voluminosas, las cuales generarían grandes pérdidas en tiempos de impresión y elevados costos de fabricación. Por otra parte, las piezas que conforman los sistemas de bisagras fueron construidas mediante el método de impresión 3D, siendo 10 diseños diferentes, los cuales montados de la manera mostrada en la Figura 18 forman un mecanismo conformado por 21 piezas móviles.

Cabe destacar que es posible montar de diversas maneras el mecanismo, teniendo en cuenta los esfuerzos a los cuales va a ser sometido y las relaciones de los mecanismos de barra, ya sea modificando la longitud de los tubos de aluminio para disminuir el par aplicado en la base del sistema y en los puntos de vinculación, o para aumentar la distribución del sistema con respecto al eje longitudinal del brazo, lo cual le daría mayor rigidez estructural ante esfuerzos laterales.

En la Figura 19 se muestran todos los componentes construidos con impresión 3D. El diseño de impresión impuso protocolos particulares para evitar que la dirección de construcción aditiva no coincida con la dirección de mayor sollicitación de la pieza. Esto se ha hecho bajo la evidencia de baja resistencia de las piezas en la dirección de construcción aditiva.

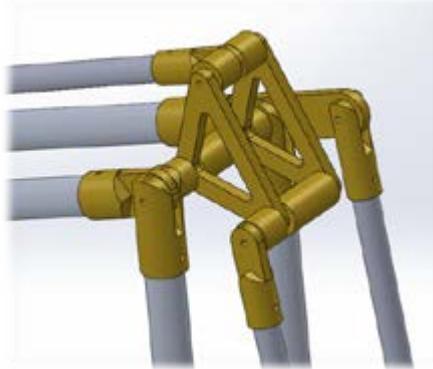


Figura 18. Esquema de vinculación en punto crítico de diseño

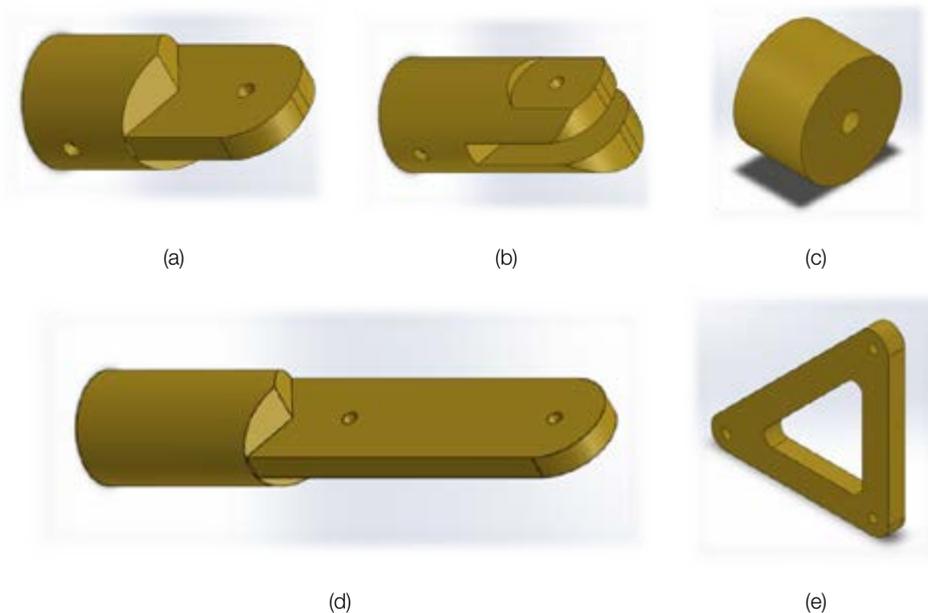


Figura 19. Piezas conectoras y suplementos para el mecanismo del brazo

La Figura 19(a) corresponde a bisagra macho $\frac{3}{4}$ ", la Figura 19(b) corresponde a la bisagra hembra de $\frac{3}{4}$ ", la Figura 19(c) corresponde a un suplemento, la Figura 19(d) corresponde a la bisagra macho extendida de $\frac{3}{4}$ " y la Figura 19(e) corresponde a la placa de conexión de codo.

El alcance del brazo depende directamente de la configuración del sistema de engranajes, las características de los sistemas de vinculación y de las longitudes de las barras del mecanismo. Se plantean a continuación tres circunstancias contemplando tubos de 500 mm para cada varilla.

- Los engranajes que comandan la estructura secundaria y las distancias de los centros a los puntos de vinculación serán un factor determinante dado que se trata de un mecanismo de biela – manivela.
- Debido a las características de montaje y de diseño del sistema, se presentan interferencias en la estructura primaria, dando lugar a un movimiento de bisagra de 55° en el punto de vinculación intermedio del brazo.
- Las longitudes de las barras son un factor determinante en el alcance del sistema, ya que son los componentes que determinan las dimensiones de las estructuras principal y secundaria.

Bajo estas circunstancias, mediante el empleo de las herramientas del programa Inventor® de auxilio al diseño geométrico se ha podido establecer las extensiones máximas del sistema de brazo vinculadas a las posiciones extremas de las transmisiones en el carro contenedor.

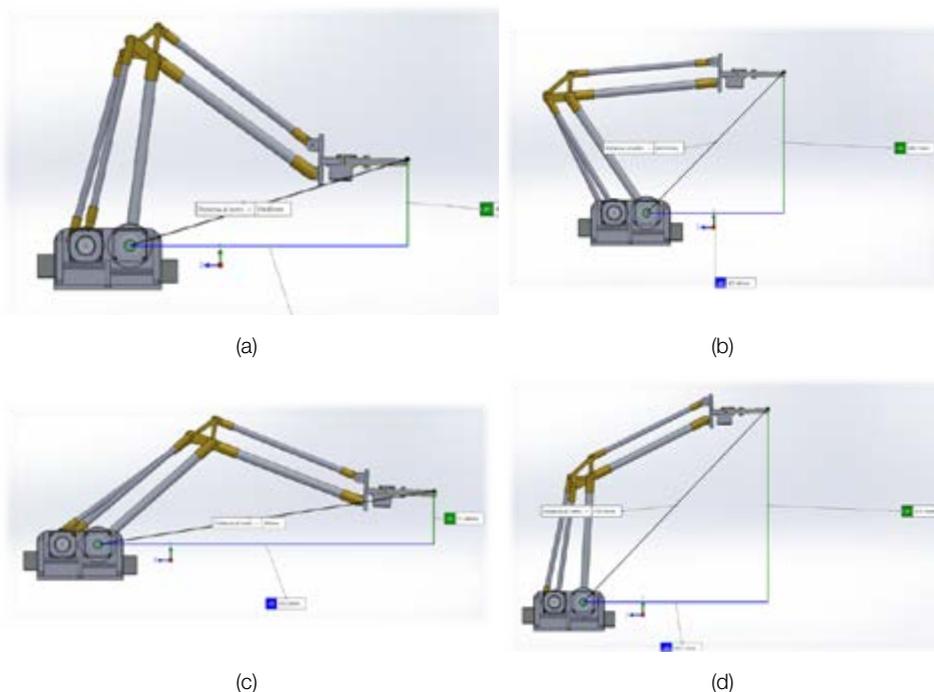


Figura 20. Posiciones extremas.

En la Figura 20 se muestran las posiciones extremas que se pueden lograr según que se trate de las siguientes condiciones:

- Retracción total posición inferior: Figura 20(a)
- Retracción total posición superior: Figura 20(b)

- Extensión total posición inferior: Figura 20(c)
- Extensión total posición superior: Figura 20(d)

Con ello la máxima extensión que por condición geométrica se puede lograr es de 0.75 m. y la mínima extensión oscilando entre 0.45 m y 0.55 m.

4.3. Diseño del mecanismo del conjunto muñeca-pinzas

El diseño de este conjunto se realizó pensando en que la construcción y el ensamblaje fuera simple y que pudiera ser construido en su totalidad por impresión 3D.

El brazo robótico tendrá al final de su muñeca una pinza, que utilizará para sujetar y/o desarmar determinados objetos. Esta pinza es lo que se denomina el efector del brazo robótico.

En la Figura 21 se muestra el diseño de la muñeca. Se ven las articulaciones que la unirán con el resto de brazo y de esta manera realizar los movimientos propios de la muñeca. Este diseño de la muñeca permite la posibilidad de montar diversos tipos de efectores que se consideren más apropiados.

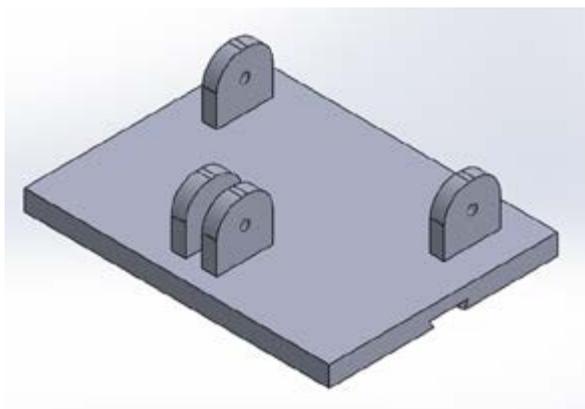


Figura 21. Muñeca del brazo robótico.

Podemos apreciar el alojamiento de la base de la pinza. Este alojamiento se realizó con el encastre llamado “cola de milano”, que permite el encastre perfecto de la otra parte del conjunto muñeca-base de la pinza.

El tipo de pinza que se utilizará es una pinza mecánica simple, la cual utiliza dos dedos mecánicos impulsados por un servomotor para lograr aprehender la pieza.

Los dedos son los accesorios de la pinza que entran en contacto con la pieza.

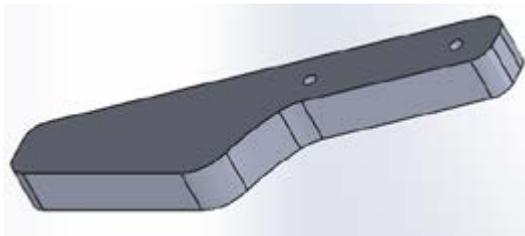


Figura 22. Ejemplo de dedo.

Para mejorar el contacto del instrumental con la pieza que se desea manipular se construyó un “dedal”. Este dedal envuelve el contorno de la pinza, tiene una forma ergonómica para que el contacto sea ideal y está construido con un material plástico que permite cierta deformación llamado Filaflex®.

Filaflex® es el filamento más elástico del mercado de plásticos para impresión 3D, llegando a alcanzar un 700% de estiramiento hasta la rotura. Se trata de un filamento TPE (Termoplástico Elastómero) con base de poliuretano y ciertos aditivos. Presenta una gran elasticidad, un alto coeficiente de fricción y una gran suavidad que lo convierten en un material flexible. Dentro de este “dedal”, en contacto con la pinza se aloja un sensor de presión que permite establecer la fuerza de sujeción o de abrace de la pinza.

En la Figura 23 se muestra el diseño sólido del dedal.

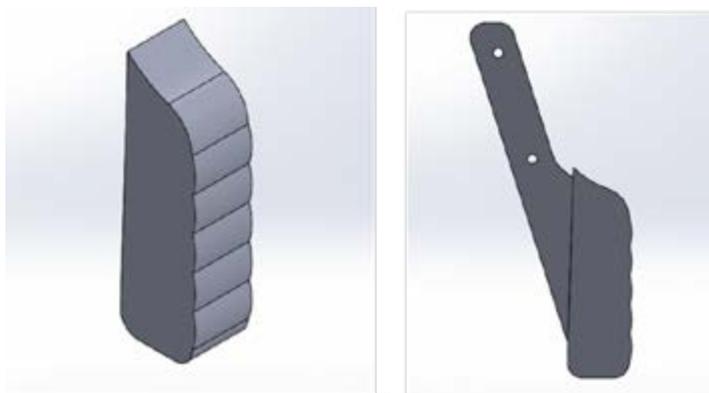


Figura 23. Diseño y montaje del dedal.

El actuador es el dispositivo que produce la fuerza necesaria para que el efector se pueda movilizar. En nuestro caso utilizaremos un servomotor, que será el responsable de proporcionar la fuerza motriz. El servomotor utilizado es el MG995 Tower Pro, es un servo miniatura de gran calidad y diminutas dimensiones que además es económico, con un torque de 11 Kg-cm.



Figura 24. Ensamble del conjunto muñeca-pinza

El servomotor encargado de activar los movimientos de la pinza estará conectado por medio de engranajes a los dedos de la pinza.

Unida a la muñeca está la base de la pinza, donde se encuentra alojado el servomotor con los engranajes y las barras que sujetan los “dedos” y permiten realizar sus movimientos.

En la Figura 24 se muestra el montaje final del conjunto muñeca-pinza con las vistas superior e inferior, expuestas en las Figura 24(a) y 24(b), respectivamente.

4.4. Diseño del sistema de rotación del carro contenedor

El diseño de este sistema involucró la idea de elaborar casi todo mediante construcción aditiva de tipo deposición de filamento polimérico. En la Figura 25 se aprecia el conjunto ensamblado que se atornilla a la parte inferior del carro contenedor (ver Figura 12). Para ello en el carro contenedor hay un alojamiento y corte en la placa inferior que permite la presencia del motor de transmisión de movimiento a la base giratoria. Por otro lado en la Figura 26 se muestra en detalle un corte con el montaje completo, donde A: base inferior; B: anillo; C: piñón; D: chapa metálica; E: motor eléctrico; F: crapodina; G: bulón sujetador; H: tuerca auto-frenante; I: engranaje; J: base superior; K: bolillas de acero.



Figura 25. Montaje base giratoria completa.

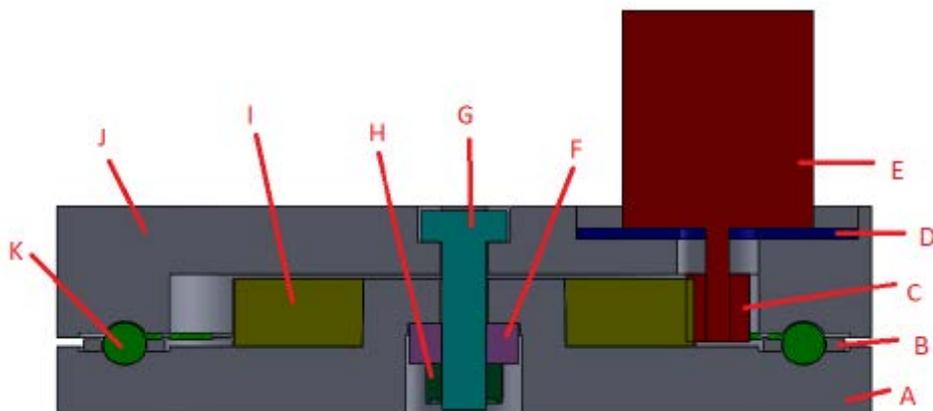


Figura 26. Detalle, montaje base giratoria completa.

Se puede observar que la idea conceptual inmanente en el diseño del conjunto de la Figura 26 se trata de un gran rodamiento de bolillas de carga axial con una transmisión por sistema de engranajes piñon-corona. La mayoría de piezas del conjunto de la Figura 26 se diseñaron pensando en su construcción por impresión 3D, tal como se mencionó en el primer párrafo de este apartado. Solo los elementos C, G, F y K son metálicos.

En la Figura 27 se muestran las características de las piezas que conforman la base giratoria, todas ellas impresas.

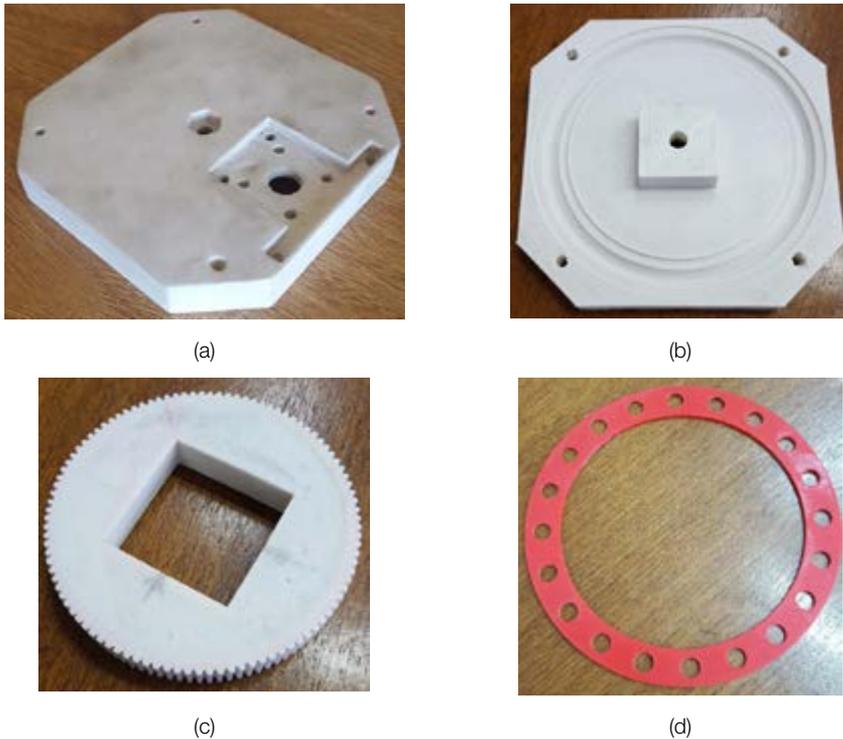


Figura 27. Base giratoria: partes.

5. Evaluación costos y alternativas

Para tener una noción de lo involucrado en tiempos y costos de reposición en base de construcción del prototipo funcional con sus sistemas de comando a continuación se expone una tabla con los tiempos estrictamente de construcción (no se contempla el desarrollo) y el costo de materiales y componentes hecho por secciones y módulos.

Item	Tiempo de construcción [h]	Costo [USD]
Base giratoria	55	75
Carro contenedor	105	195
Conjunto mecanismo articulado del brazo	35	45
Conjunto muñeca-pinza	72	60
Plataforma terrestre de orugas	350	450
Total	617	825

Tabla 1. Costo estimado de construcción del equipo completo.

6. Conclusiones

De todo lo expuesto resulta un prototipo con una gran perspectiva de éxito para la adaptación a funciones específicas o propias de cada trabajo o actividad. Puede entreverse un gran potencial en áreas de uso industrial, aplicaciones a rescatistas, bomberos, manipulación de productos radioactivos, seguimiento en terrenos de producción agraria, baldíos, etc.

Como gran virtud del trabajo realizado se remarca que descartando el costo de la ingeniería aplicada por los profesionales actuantes, ha sido posible construirlo con materiales sumamente económicos y de uso común, con lo que una vez refinado el modelo los costos de producción son bajísimos en relación a un dispositivo similar fabricado fuera del país. Para mencionar un dato de costo la suma actual de lo invertido en todos los aspectos no supera los 1000 dólares.

Finalmente, este trabajo permitió adquirir el conocimiento de fabricación y control de este tipo de vehículos. A futuro se completarán estudios de vibración de la plataforma a fin de poder minimizarlos, a su vez se pretende efectuar estrategias de control de estabilidad del vehículo para poder resolver algunos aspectos que se han notado limitados (en las pruebas experimentales) en el comportamiento dinámico general de la plataforma.

- a) Es plenamente factible emplear impresión 3D en plásticos para la realización de pinzas de manipulación, para uso en robot de operación de cargas peligrosas, a una baja fracción del costo del caso homólogo construido en materiales metálicos, garantizando resistencia y operatividad en condiciones normales.
- b) El costo de construcción del conjunto superior de base-carro-brazo-pinza, mayormente hechos en plástico se hallaría en un entorno rondando los 400 USD, pudiéndose llevar a cabo en menos de quince *días* laborales. Esto es sustancialmente más barato y más rápido que la construcción de su homóloga en metal.
- c) La utilización de un elemento sencillo y económico para el sentido de fuerza es plenamente factible con buen grado de previsibilidad.
- d) La resistencia mecánica estructural es más que suficiente para los límites de carga y transportes propuestos en el diseño. La pieza más solicitada se halla dentro del rango elástico

Referencias

- Boyu Wei, et al. Design of a Large Explosive Ordnance Disposal Robot, Second International Conference on Intelligent Technology and automation, 2009.
- Franchi G., Ten Pas A., Platt R., Panzieri S. *The Baxter Easyhand: A Robot Hand that costs \$150 US in parts*. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), ISBN 978-1-4799-9994-1, sep.28-oct.2 2015, Hamburgo, Alemania.
- Kucewicz, M., Barnowski, P., Malachowski, J., Poplawski, A., Platek, P. Modelling and characterization of 3D printed cellular structures, *Materials and Design* 142, 177-189, 2018.
- Li Xuewen, Men Cai, Liang Jianhong. Research on Simulation and Training System for EOD Robots”, IEEE International Conference on industrial informatics, pp 810-814, 2006.
- Mainetti C, Romero A., Piovan M. *Plataforma multipropósito para aplicación en robots manipuladores de cargas peligrosas*, Actas del IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, sep.2-5 2014, Resistencia, Chaco, Argentina.
- Mc.Roberts, M.R. *Earthshine Design Arduino Starters Kit Manual - A Complete Beginners Guide to the Arduino 2nd Edition*.EarthshineDesign, UnitedKingdom, 2009.
- Ollero Baturone A., *Robotica: Manipuladores y robots móviles*, Marcombo Editores, 2007.
- Pahl G, Beitz W., Feldhusen J., Grote K. *Engineering design: a systematic approach*. 3ra Edición. Springer-Verlag London Limited, 2007.
- Piovan M., Romero A. *Caracterización de plásticos para impresoras 3D*. Actas del IV Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, sep.2-5 2014, Resistencia, Chaco, Argentina.
- Rateni G., Cianchetti M., Ciuti G., Menciassi A., Laschi, C. *Design and development of a soft robotic gripper for manipulation in minimally invasive surgery: a proof of concept*. *Meccanica*, 50, 2855-2863, 2015.
- Singh P., Kumar A., Vashitth M. *Design of a Robotic Arm with Gripper and End Effector for Spot Welding*. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 1,3,92-97, 2013.
- Telegenov K., Telegenov Y., Shintemirov A. *A Low-Cost Open-Source 3-D-Printed*

Three-Finger Gripper Platform for Research and Educational Purposes.IEEE Access, 3, 638-647, 2015.

Vergara F. M., Gulino E., *Diseño Mecánico de un Vehículo Tele-operado*, Actas II Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica, Nov 7-9, 2010 San Juan, San Juan, Argentina.