

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE MOTORES TIPO DC DE LAZO CERRADO  
PARA LA TRASLACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL

Trabajo de graduación presentado por:  
Estuardo Antonio Sandoval Acevedo  
para optar al grado académico de  
Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2011



**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE MOTORES  
TIPO DC DE LAZO CERRADO PARA LA TRASLACIÓN DE UN ROBOT  
MÓVIL**

# UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL DE MOTORES TIPO DC DE LAZO CERRADO  
PARA LA TRASLACIÓN DE UN ROBOT MÓVIL

Trabajo de graduación presentado por Estuardo Antonio Sandoval Acevedo para optar al grado  
académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala

2011

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	vi
LISTA DE TABLAS .....	viii
LISTA DE ECUACIONES .....	ix
RESUMEN .....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. JUSTIFICACIÓN .....	2
III. OBJETIVOS.....	3
A. Generales .....	3
B. Específicos.....	3
IV. MARCO TEÓRICO .....	4
A. Sensores para medición de velocidad y posición .....	4
B. ¿Cómo controlar la velocidad y posición de un motor DC?.....	5
1. Modelado matemático de motores DC de imán permanente. ....	5
2. Sistema de control de velocidad de un motor DC sin carga. ....	7
C. Método de elementos finitos y su aplicación en análisis de esfuerzos .....	8
1. Esfuerzo.....	8
2. Componentes cartesianos del esfuerzo.....	9
3. ¿Qué es el análisis por elementos finitos y su uso en elementos mecánicos?.....	9
4. Esfuerzo tridimensional general .....	10
5. Autodesk Inventor: Análisis de esfuerzos por método de elementos finitos.....	10
V. MATERIALES .....	11
VI. MÉTODOS Y RESULTADOS .....	12
A. Fase número 1 "Selección de hardware" .....	12
B. Fase número 2 "Diseño de software" .....	14
C. Fase número 3 "Implementación de hardware" .....	16
D. Fase número 4 "Análisis de potencia" .....	19
E. Fase número 5 "Análisis mecánico" .....	20

1.	Análisis de esfuerzos en soporte de motor .....	22
2.	Análisis de esfuerzos en aro.....	26
3.	Análisis de esfuerzos en eje .....	29
F.	Fase número 6 "Medición de parámetros del sistema" .....	33
G.	Fase número 7 "Diseño de sistema analógico de control" .....	36
VII.	CONCLUSIONES.....	42
VIII.	RECOMENDACIONES.....	43
IX.	BIBLIOGRAFÍA.....	44
X.	ANEXOS.....	45
A.	Diagrama de flujo y código fuente programa de control .....	45
B.	Diseño de placa de regulador de voltaje .....	57
C.	Diseño de placa de transceptor .....	58

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura No. 1 Incrementadores optomecánicos típicos .....	4
Figura No. 2 Modelo de un motor DC .....	5
Figura No. 3 Ejemplo de diagrama de bloques .....	7
Figura No. 4 Diagrama de bloques de un motor DC controlado sin carga .....	8
Figura No. 5 Diagrama de cuerpo libre de una viga simplemente apoyada .....	9
Figura No. 6 a) Esfuerzo tridimensional general, b) Esfuerzo plano .....	9
Figura No. 7 Ejemplo de aplicación de análisis de elementos finitos .....	10
Figura No. 8 Resumen de proceso de análisis y simulación del sistema .....	12
Figura No. 9 Motor seleccionado.....	13
Figura No. 10 Controlador de posición Parallax .....	13
Figura No. 11 Diagrama de flujo del uso de las funciones del controlador .....	15
Figura No. 12 Diagrama de envío y recepción de datos .....	16
Figura No. 13 Optoacoplador utilizado para desacople entre alimentaciones .....	17
Figura No. 14 Posición de los puente H .....	17
Figura No. 15 aislado de los motores.....	18
Figura No. 16 Conexión Microcontrolador-transceptor-codificadores .....	18
Figura No. 17 Batería de 12V TYSONIC .....	19
Figura No. 18 Estructura con motores.....	21
Figura No. 19 Figura de esfuerzos en superficie superior de la base de los motores .....	22
Figura No. 20 Área de anclaje .....	23
Figura No. 21 Esfuerzo de Von Mises .....	24
Figura No. 22 Primer esfuerzo principal .....	25
Figura No. 23 Tercer esfuerzo principal.....	25
Figura No. 24 Deformación de la pieza.....	26
Figura No. 25 Carga puntual radial en aro .....	27
Figura No. 26 Distribución de esfuerzos de Von Mises en Aro.....	27
Figura No. 27 Área de aplicación del esfuerzo en aro .....	28
Figura No. 28 distribución de esfuerzos de aro con llanta .....	29
Figura No. 29 Deformación del aro con llanta .....	29
Figura No. 30 Lugar de aplicación de fuerza en eje .....	30
Figura No. 31 Área de anclaje de eje .....	30
Figura No. 32 Deformación de eje .....	31
Figura No. 33 Esfuerzo de Von Mises sobre eje.....	31

Figura No. 34 Diagrama de cuerpo libre de eje .....	32
Figura No. 35 Gráfica de deflexión de eje.....	32
Figura No. 36 Gráfica de esfuerzo de tensión de eje.....	32
Figura No. 37 Relación entre deformación de eje y avance longitudinal .....	33
Figura No. 38 Circuito de resistencia externa en serie con motor .....	34
Figura No. 39 Circuito de tacómetro .....	35
Figura No. 40 Medición de velocidad de motor con tacómetro.....	35
Figura No. 41 Diagrama de lazo de control analógico .....	36
Figura No. 42 Respuesta al impulso con primera aproximación de constantes.....	38
Figura No. 43 Respuesta al impulso de la segunda propuesta de constantes .....	39
Figura No. 44 Señal de referencia de 12V.....	40
Figura No. 45 Señal de medición para señal de referencia de 12V .....	40
Figura No. 46 Comparación entre señal de referencia (derecha) y señal de salida del sistema (izquierda) .....	41
Figura No. 47 Diagrama de flujo programa de control .....	45
Figura No. 48 Diseño de circuito regulador .....	57
Figura No. 49 Pistas de placa de regulador de voltaje de 5V.....	58
Figura No. 50 Diseño de circuito de transceptor .....	58
Figura No. 51 Lado 1 de placa de transceptor .....	59
Figura No. 52 Lado 2 de placa de transceptor .....	59

## LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla No. 1 Listado de materiales electrónicos utilizados.....	11
Tabla No. 2 Listado de materiales no electrónicos utilizados.....	11
Tabla No. 3 Resultados de simulación de consumo.....	19
Tabla No. 4 Características del aluminio 6063-T5.....	20
Tabla No. 5 Recuento de masas que soportaran los motores .....	21
Tabla No. 6 Características del aluminio 6061.....	21
Tabla No. 7 Esfuerzo en base de motor .....	22
Tabla No. 8 Cálculo de esfuerzo en aro .....	28
Tabla No. 9 Factor de seguridad del eje del motor.....	33
Tabla No. 10 Mediciones del motor.....	34
Tabla No. 11 Parámetros del motor .....	36
Tabla No. 12 Obtención de constantes de un sistema de control PID con base al método Ziegler-Nichols.....	37
Tabla No. 13 Relaciones de ajuste de control PID .....	38
Tabla No. 14 Arreglo de Routh del sistema analizado .....	41

## LISTA DE ECUACIONES

Página

Ecuación No. 1 Ecuación de malla de la Figura No.2 .....	6
Ecuación No. 2 Fuerza contraelectromotriz .....	6
Ecuación No. 3 Sumatoria de torques sobre el eje del motor .....	6
Ecuación No. 4 Ecuación de torque proporcionado por el motor sin carga .....	6
Ecuación No. 5 Cálculo de los esfuerzos principales.....	23
Ecuación No. 6 Esfuerzo de Von Mises .....	24
Ecuación No. 7 Divisor de voltaje en armadura de motor.....	34
Ecuación No. 8 Ecuación de constante de tiempo.....	36
Ecuación No. 9 Función de transferencia de motor .....	37
Ecuación No. 10 Función de transferencia de bloque PID.....	39
Ecuación No. 11 Función de transferencia del sistema .....	41

## **RESUMEN**

Este trabajo fue elaborado y orientado plenamente al estudio del conjunto de motores y ruedas con controlador de posición marca Parallax implementado en el robot móvil “RAEC Robot Cartero” de la Universidad del Valle de Guatemala. El sistema Parallax consiste en dos motores tipo DC con sus controladores tipo puente H, dos llantas tubulares, dos bases y los ejes para ensamblar con su respectivo controlador de posición.

El análisis y simulación del sistema se elaboró analizando los componentes mecánicos, electrónicos y eléctricos del sistema. Esto se logró realizando mediciones de cada componente durante el ciclo de trabajo normal y simulando ciclos de trabajo de larga duración. Se observó al sistema trabajar en situaciones de diferente consumo de potencia. Con este proceso se obtuvieron las condiciones de operación del sistema bajo la aplicación del robot móvil “RAEC Robot Cartero” y el diseño de un sistema analógico equivalente al Parallax.

La razón por la que se realizó el estudio del sistema Parallax aplicado al robot móvil “RAEC Robot Cartero” y el diseño de un sistema analógico equivalente es que éste tuvo unas condiciones de uso y operación únicas en su clase en el contexto universitario dado que fue la primera implementación de este tipo de dispositivos en la UVG.



# I. INTRODUCCIÓN

El uso de robots autómatas móviles en nuestro medio crece más con cada día en contexto publicitario, de oficina o industrial. En conjunto con este fenómeno también existe el aumento en paralelo de la búsqueda de medios para el desplazamiento de estos dispositivos. Estos medios de desplazamiento suelen ser de precisión para facilitar la movilidad automática de los robots en los ambientes cotidianos.

El grupo de desarrollo del megaproyecto Robot Cartero (RAEC) desarrollado en la Universidad del Valle de Guatemala expresaron su necesidad de un sistema preciso y potente para implementar en su robot tipo móvil.

Para satisfacer esta necesidad se planteó un sistema de control de movimiento de bajo costo y características suficientes para realizar la tarea planteada por este grupo de desarrollo. Este sistema consistió en motores de tipo DC utilizados normalmente para el movimiento de limpia parabrisas de carros. Además de los motores el sistema posee un controlador de posición y velocidad. La combinación de motores DC y controladores de posición satisface los requerimientos del robot móvil para un movimiento relativamente preciso.

Al implementar el sistema de motores se plantearon problemas paralelos como el consumo energético del mismo, resistencia mecánica de cada componente estando bajo cargas y esfuerzos y la posibilidad de diseñar un sistema analógico capaz de controlar la velocidad de estos motores. Como respuesta a estos problemas se elaboraron simulación de operación de los motores medición de parámetros y en base a estos el diseño del sistema analógico de control anteriormente mencionado.

## II. JUSTIFICACIÓN

El objetivo del proyecto fue el análisis y la simulación del sistema de traslación de lazo cerrado del robot móvil el Megaproyecto "RAEC Robot Cartero". El sistema que se analizó incluyó el análisis mecánico, programación y control digital.

La razón del desarrollo del proyecto fue la recaudación de datos mecánicos, electrónicos y eléctricos del sistema Parallax en la aplicación particular del robot. Esto se realizó dado que ésta es una de las primeras aplicaciones de este sistema de motores en proyectos de la UVG por lo que es necesario dejar una documentación de su funcionamiento y operación para que en futuras aplicaciones se pueda tener un desarrollo mayor de los proyectos dado que se tendrá un marco teórico y experimental para acelerar el proceso de diseño.

Otra razón para la medición de las características electrónicas, eléctricas y mecánicas del sistema fue para tener una base para establecer el planteamiento de un sistema de control analógico similar al estudiado. Además, como observación final fue necesario agregar que al tener un análisis sólido del sistema mecánico, electrónico, e informático de instrucciones se pueden sugerir una variedad de aplicaciones para robots o sistemas con características similares al estudiado.

### **III. OBJETIVOS**

#### **A. Generales**

- Describir y modelar el sistema de traslación de un robot móvil .
- Diseñar un sistema de control analógico de funcionamiento equivalente al de Parallax basándose en la información obtenida durante el análisis.

#### **B. Específicos**

- Analizar la durabilidad mecánica de las piezas del sistema en la aplicación del Megaproyecto "RAEC Robot Cartero".
- Crear un lazo de control analógico que asemeje el funcionamiento del sistema Parallax para crear una alternativa de sistemas de movimiento de precisión para robots móviles.
- Obtener el consumo energético real del sistema a partir de simulaciones de trabajo del mismo.

## IV. MARCO TEÓRICO

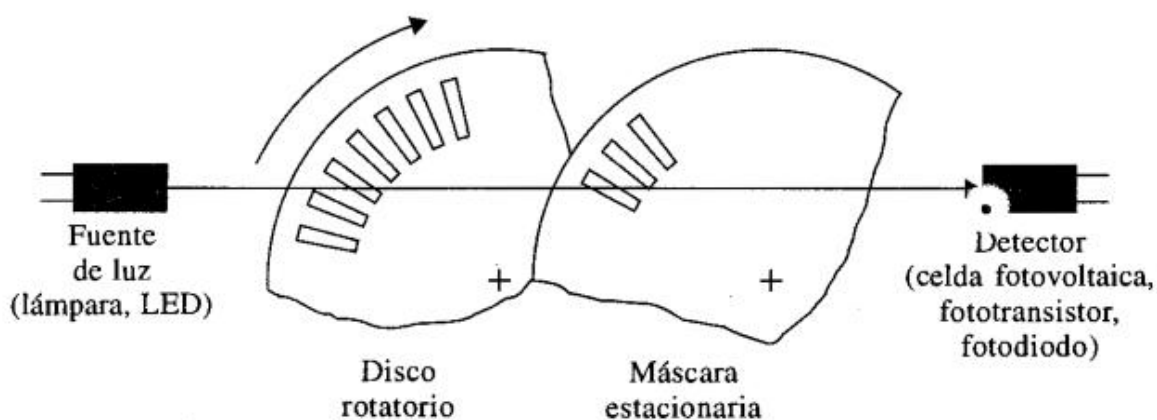
### A. Sensores para medición de velocidad y posición

Los sensores y codificadores son componentes importantes utilizados en sistemas de control para la verificación del desempeño y retroalimentación en el sistema, entre ellos podemos encontrar los tacómetros, codificadores de posición incrementales, absolutos, etc. [5]

Los codificadores incrementales se encuentran con frecuencia en sistemas de control que desean convertir desplazamiento lineal o rotatorio en un código digital o señales de pulsos. Los codificadores que producen una señal digital de salida se conocen como codificadores absolutos. En términos más simples, los codificadores absolutos producen como salida un código digital distinto por cada posición en la que este se encuentra. Por otro lado, los codificadores incrementales proveen un pulso por cada cambio de posición pero no hacen referencia a que posición es. [5]

Los codificadores incrementales (Figura No.1) están disponibles en las formas lineales y rotatorias. Un codificador incremental típico rotativo tiene cuatro partes básicas: una fuente de luz, un disco giratorio, una máscara estacionaria y un detector. El disco tiene sectores opacos y transparentes distribuidos en forma alterna. Un par de estos sectores representa un periodo incremental. La máscara se usa para dejar pasar o bloquear la luz entre la fuente de luz y el fotodetector localizado detrás de la máscara. Para los codificadores de baja resolución, la máscara no es necesaria. [6]

Figura No. 1 Incrementadores optomecánicos típicos [5]

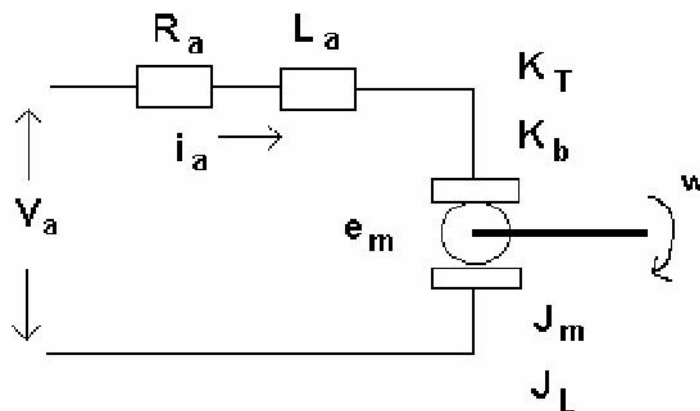


## B. ¿Cómo controlar la velocidad y posición de un motor DC?

1. **Modelado matemático de motores DC de imán permanente.** Los motores DC se usan de forma extensa en sistemas de control, por lo cual se establecen modelos matemáticos con propósito de análisis para motores DC en aplicaciones de control. Se utiliza un circuito equivalente para representar el motor (Figura No.2). La armadura está modelada como un circuito con resistencia  $R_a$  conectada en serie a una inductancia  $L_a$ , y a una fuente de voltaje  $e_b$  que representa la fuerza contraelectromotriz en una armadura cuando el rotor gira. Las variables y parámetros del motor se definen:

- $i_a(t)$ = corriente de armadura
- $R_a$ = resistencia de armadura
- $e_b(t)$ = fuerza contraelectromotriz
- $T_L(t)$ = par de carga
- $T_g(t)$ = par del motor
- $\Theta_m(t)$ = desplazamiento del rotor
- $K_t$ = constante del par
- $L_a$ = inductancia de la armadura
- $V_a(t)$ = voltaje aplicado
- $K_b$ = constante de la fuerza contraelectromotriz
- $\phi$ = flujo magnético en el entre hierro
- $\omega_m(t)$ = velocidad angular del rotor
- $J_m$ = inercia del rotor
- $T_f(t)$ = Torque de fricción

Figura No. 2 Modelo de un motor DC [3]



El control del motor DC se aplica a las terminales de la armadura en la forma del voltaje aplicado  $V_a(t)$ . Elaborando una ecuación de malla sobre el circuito modelado en la Figura No.2 se plantea la siguiente ecuación:

**Ecuación No. 1 Ecuación de malla de la Figura No.2 [3]**

$$V_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_m$$

Donde:

**Ecuación No. 2 Fuerza contraelectromotriz [3]**

$$e_m = K_b \omega_m$$

Realizando la sumatoria una sumatoria de torques sobre el eje del motor se obtiene como resultante el torque interno generado ( $T_g$ ) sobre el mismo. Este torque se encuentra en función de la inercia tanto del motor ( $J_m$ ) como de la carga ( $J_L$ ) además de incluir los torques que genera la carga ( $T_L$ ) y que genera la fricción estática que existe entre el motor y las escobillas ( $T_F$ ). [3]

**Ecuación No. 3 Sumatoria de torques sobre el eje del motor [3]**

$$T_g = (J_m + J_L) \frac{d\omega}{dt} + T_F + T_L$$

Como motivo de análisis el motor no es sometido a carga alguna, a consecuencia de esto, dentro de la sumatoria de torques no se toma en cuenta el torque ( $T_L$ ) de la carga ni su inercia ( $J_L$ ). Tomando estas consideraciones la ecuación toma la siguiente forma :

**Ecuación No. 4 Ecuación de torque proporcionado por el motor sin carga [3]**

$$T_g = J_m \frac{d\omega}{dt} + T_F$$

El torque  $T_F$  si es considerado debido a que si no se vence esta fuerza mecánica el motor no gira y genera una no linealidad llamada zona muerta. [3]

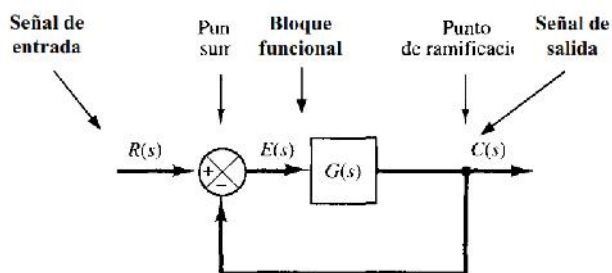
2. **Sistema de control de velocidad de un motor DC sin carga.** Un sistema de control puede tener varios componentes. Para mostrar las funciones que lleva a cabo cada componente en la ingeniería de control, por lo general se usa una representación denominada diagrama de bloques.

Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente. Tal diagrama muestra las relaciones existentes entre los diversos componentes. [7]

En un diagrama de bloques se enlazan una con otra todas las variables del sistema, mediante bloques funcionales. El bloque funcional o simplemente bloque es un símbolo para representar la operación matemática que sobre la señal de entrada hace el bloque para producir la salida.

La Figura No. 3 muestra un elemento del diagrama de bloques. La punta de la flecha que señala el bloque indica la entrada, y la punta de la flecha que se aleja del bloque representa la salida. Tales flechas se conocen como señales. [7]

Figura No. 3 Ejemplo de diagrama de bloques [7]

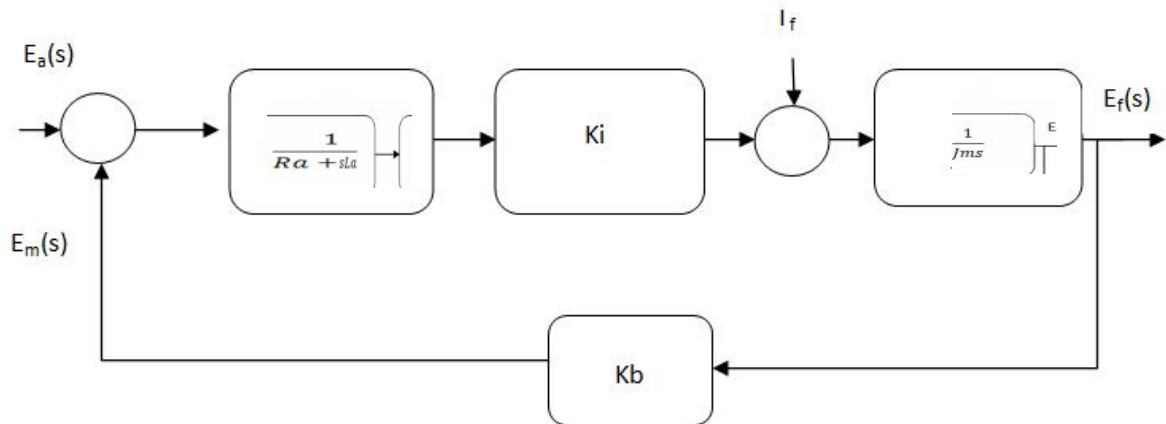


Las dimensiones de la señal de salida del bloque son las dimensiones de la señal de entrada multiplicadas por las dimensiones de la función de transferencia en el bloque.

Un diagrama de bloques contiene información relacionada con el comportamiento dinámico, pero no incluye información de la construcción física del sistema. En consecuencia, muchos sistemas diferentes y no relacionados pueden representarse mediante el mismo diagrama de bloques.

El control del motor DC sin carga en el rotor, modelado como un diagrama de bloques (Figura No.3) y tomando en cuenta las ecuaciones de torque y parámetros es representado de la siguiente manera.

Figura No. 4 Diagrama de bloques de un motor DC controlado sin carga



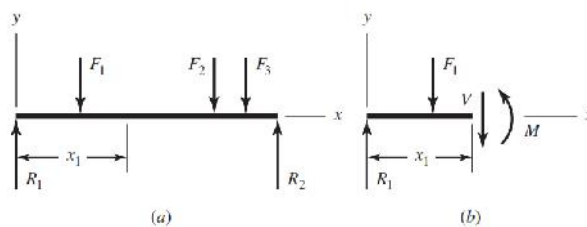
Siendo:

- $E_a(s)$  la señal de referencia
- $E_m(s)$  la señal de medición (velocidad del motor)
- $E_f(s)$  la señal de salida del sistema
- $I_f$  El torque generado por la fricción

### C. Método de elementos finitos y su aplicación en análisis de esfuerzos

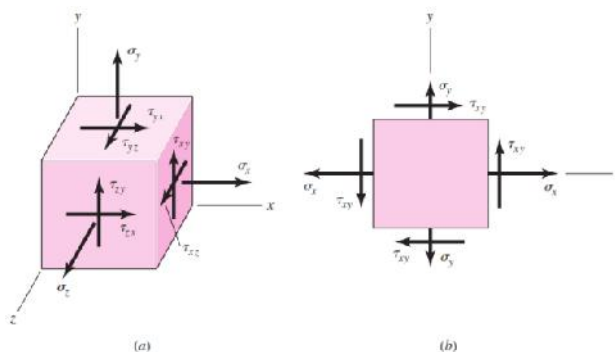
1. **Esfuerzo.** Cuando se aísla una superficie interna (Figura No.5 b), la fuerza y el momento totales que actúan sobre la superficie se manifiestan a sí mismos como distribución de fuerzas a través de toda el área. La distribución de la fuerza que actúa en un punto sobre la superficie es única y tendrá componentes en las direcciones normal y tangencial llamados esfuerzos normales y esfuerzos cortante y tangencial, respectivamente. Los esfuerzos normales y cortantes se identifican con las letras griegas  $\sigma$  (sigma) y  $\tau$  (tau), respectivamente. Si la dirección de  $\sigma$  es saliente de la superficie es un esfuerzo de tensión y es un esfuerzo normal positivo. Si  $\sigma$  entra hacia la superficie es un esfuerzo compresivo y comúnmente se consideran una cantidad negativa. [4]

Figura No. 5 Diagrama de cuerpo libre de una viga simplemente apoyada [4]



2. **Componentes cartesianos del esfuerzo.** Los componentes cartesianos del esfuerzo se establecen mediante la definición de tres superficies mutuamente ortogonales en un punto dentro del cuerpo. Las normales a cada superficie se establecen como los ejes cartesianos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Generalmente, cada superficie tiene un esfuerzo normal y uno cortante. El esfuerzo cortante puede tener componentes a lo largo de los ejes cartesianos. Por ejemplo, en la Figura No. 6 se muestra el aislamiento de un área superficial infinitesimal en el punto Q dentro de un cuerpo donde la normal a la superficie es la dirección  $x$ . El esfuerzo normal se denomina  $\sigma_x$ . El símbolo  $\sigma$  indica un esfuerzo normal, mientras que el subíndice  $x$  señala la dirección de la normal a la superficie. El esfuerzo cortante neto que actúa sobre la superficie es  $(\tau_x)_{total}$ , el cual puede descomponerse en componentes en las direcciones  $y$  y  $z$ , los cuales se marcan como  $\tau_{xy}$  y  $\tau_{xz}$ , respectivamente (Figura No. 6). [4]

Figura No. 6 a) Esfuerzo tridimensional general, b) Esfuerzo plano [4]



3. **¿Qué es el análisis por elementos finitos y su uso en elementos mecánicos?** La técnica de análisis por elementos finitos consiste en dividir la geometría en la que se requiere resolver una ecuación diferencial de un campo escalar o vectorial en un dominio, en pequeños elementos, teniendo en cuenta unas ecuaciones de campo en cada elemento, los elementos del entorno de vecindad y las fuentes generadoras de campo en cada elemento. [4]

Esta técnica es muy utilizada en el ámbito de la ingeniería debido a que muchos problemas físicos de interés se formulan mediante la resolución de una ecuación diferencial en derivadas parciales, a partir de cuya solución es posible modelar problemas en electromagnetismo, cálculo de estructuras, etc.). Esta técnica se encuentra automatizada en las herramientas de software comerciales, llamadas herramientas de análisis por elementos finitos

para problemas físicos de propósito general, como aplicadas a problemas físicos particulares tales como análisis de esfuerzos en componentes mecánicos, distribución de los mismo, deformaciones, entre otros. [4]

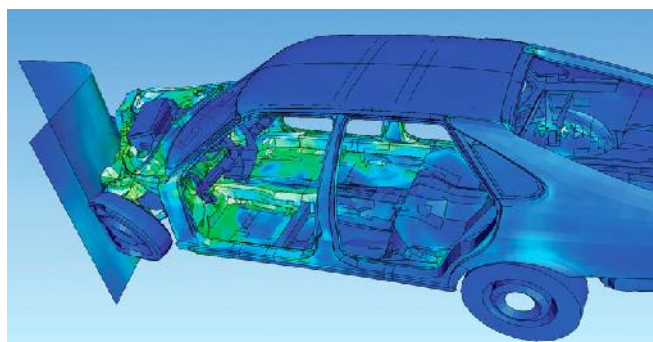
4. **Esfuerzo tridimensional general.** Análogamente al esfuerzo plano, existe una orientación particular del elemento del esfuerzo en el espacio, en la que todas las componentes del esfuerzo cortante son iguales a cero. Cuando un elemento tiene esta orientación particular, las normales a las caras son mutuamente ortogonales, corresponden a las direcciones principales y los esfuerzos normales asociados con estas caras son los esfuerzos principales. Como hay tres caras, existen tres direcciones principales y tres esfuerzos principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ . Para el esfuerzo plano, la superficie libre de esfuerzo contiene el tercer esfuerzo principal, el cual es cero. [4]

5. **Autodesk Inventor: Análisis de esfuerzos por método de elementos finitos.** Autodesk Inventor Professional posee herramientas de análisis de tensión y entornos de simulación dinámica. El entorno de análisis de tensión le permite realizar análisis estáticos en piezas y ensamblajes de materiales de los componentes que se definan, tales como: cargas, restricciones y condiciones de contacto. [4]

Un segundo tipo de análisis de tensión consiste en modelar las piezas como un conjunto de vigas simples e interpolar las reacciones que estas generan entre sí al ser expuestas a diferentes tipos de esfuerzos. [1]

Aunque el análisis de tensión los términos y análisis de elementos finitos (FEA) se usan indistintamente en la conversación, puede ser útil para entender estos términos en relación con las herramientas a su disposición en el entorno de Inventor de análisis de tensión. FEA es un análisis de un objeto complejo resuelto dividiendo ese objeto en una malla de elementos más pequeños en los que los cálculos manejables se pueden ejecutar. El análisis de esfuerzo realizado por Inventor utiliza este método para que pueda analizar su diseño con un conjunto dado de condiciones especificadas por usted a fin de determinar las tendencias básicas en cuanto a los detalles de su diseño. Derivación de una respuesta exacta a partir del análisis de un modelo generalmente está reservada para un analista (Figura No. 7). [1]

Figura No. 7 Ejemplo de aplicación de análisis de elementos finitos [1]



## V. MATERIALES

Tabla No. 1 Listado de materiales electrónicos utilizados

Descripción	Cantidad
Controlador de posición marca Parallax.	2
Motor DC de 12V marca Parallax.	2
Regulador de voltaje positivo 1A (78L05) o para circuitería TTL.	1
Microcontrolador CMOS Microchip PIC16F887, encargado del control digital del movimiento de motores.	1
Optoacoplador, encargado de desacoplar circuito de potencia con circuito de control.	1
Batería TYSONIC de 12v 35Ah.	1
Batería TYSONIC de 6v 12Ah.	1
Transistor TIP 131a.	1
Transistor TIP 132.	1

Tabla No. 2 Listado de materiales no electrónicos utilizados

Descripción	Cantidad
Tarugos de 1/2 de pulgada.	4
Perno de 1/4 pulgada.	4
Base de aluminio para motor Parallax.	2
Eje de aluminio del kit Parallax.	2

## VI. MÉTODOS Y RESULTADOS

El sistema de motores y controlador de posición Parallax analizado fue implementado en el movimiento del robot móvil del Megaproyecto de Robot Automático de Entrega de Correspondencia (RAEC). El sistema fue capaz de realizar movimientos de precisión en un ambiente de oficinas teniendo una retroalimentación de posición hacia el sistema controlador. Las variables analizadas, programadas y/o controladas durante el proceso de investigación fueron las siguientes:

- Velocidad de rotación de las llantas.
- Rampa de aceleración del motor.
- Posición actual de los motores.
- Consumo energético durante simulación de uso.
- Factores de seguridad mecánicos en ejes y bases.

El proceso de implementación, análisis y simulación, tanto software como hardware, que fue elaborado se resume en el siguiente diagrama modular.

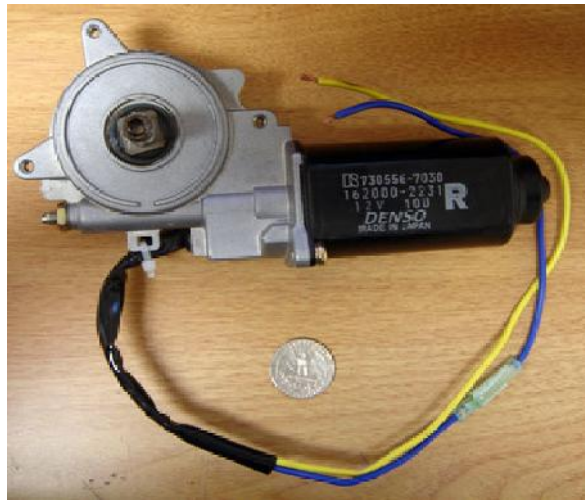
Figura No. 8 Resumen de proceso de análisis y simulación del sistema



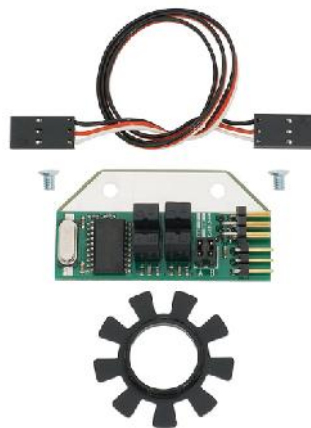
### A. Fase número 1 "Selección de hardware"

La implementación de un sistema de movimiento de precisión para un robot móvil requiere llevar de la mano dos conceptos primordiales, el torque que pueden entregar y el nivel de control que pueden ofrecer.

La metodología para la selección de los motores fue a base del requerimiento más importante del proyecto, el cual fue el torque. Los motores seleccionados por tener un torque con la magnitud necesaria para la implementación de un robot de mensajería fueron motores de limpia parabrisas de automóvil (Figura No.9). Los motores de limpia parabrisas constan de un motor DC y una caja reductora con una relación de engranajes.

**Figura No. 9 Motor seleccionado**

A partir del motor de limpia parabrisas se investigó un conjunto que lo utilizara y que cumpliera con el requerimiento de exactitud en el movimiento, debido a esto se seleccionó el conjunto de motores Parallax. Estos están conformados por un par de motores de tipo limpia parabrisas con un codificador de posición incremental, que refleja hasta 37 posiciones por revolución de llanta, con control de velocidad y aceleración (Figura No.10). Cada posición debido a los 5 cm de radio de la llanta reflejó un avance lineal de 0.85 cm. Para la aplicación se utilizó como avance mínimo una vuelta completa de cada llanta dando así un avance mínimo de 8.5 cm para esta aplicación.

**Figura No. 10 Controlador de posición Parallax**

El circuito de potencia tipo puente H para alimentación de los motores seleccionado fue el HB-25 marca Parallax. La razón por la cual se seleccionaron estos motores es que pueden entregar hasta 25 amperios de corriente directa siendo ésta la corriente máxima de consumo de los motores del kit anteriormente discutido además de ser los recomendados por el fabricante para ser utilizados en conjunto con el mismo y comparado con otros productos investigados como el integrado L298N o el " Devantech MD25 Dual " lo cuales ofrecían un voltaje suficiente para alimentar el sistema pero no la corriente necesaria para que éste funcionara se tomó la decisión previamente mencionada.

## **B. Fase número 2 "Diseño de software"**

El sistema Parallax de posicionamiento cuenta con un conjunto de instrucciones propias del fabricante. Los encabezados de las instrucciones son palabras de 8 bits que constan de dos partes: el código de instrucción y la dirección del motor al que apunta. El conjunto de instrucciones esta subdividido en tres grupos de acuerdo a la tarea que cada instrucción realiza:

- Instrucciones de acción
- Instrucciones de configuración
- Instrucciones de consulta

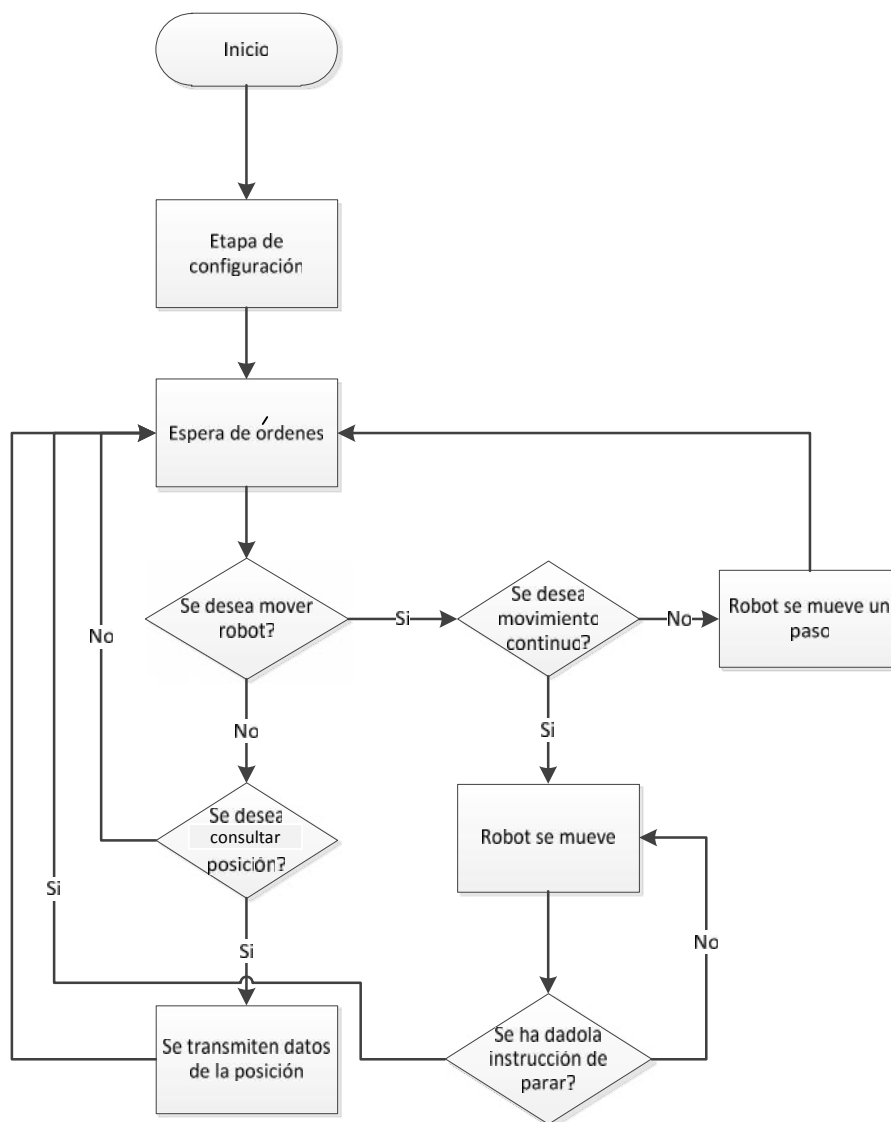
La programación de los motores requirió el uso de los tres tipos de instrucciones. El lenguaje de programación inicial utilizado fue MikroPascal de MikroE, se seleccionó este lenguaje debido a que es un lenguaje procedural muy bien estructurado en donde se puede identificar rápidamente la posición de las variables, operaciones y ciclos. Posteriormente los procedimientos elaborados fueron portados al lenguaje ensamblador de Microchip y a C# del DSPIC a petición de los integrantes del grupo del Megaproyecto RAEC.

Al iniciar el sistema el programa tiene que pasar por una etapa de configuración. Esta etapa es implementada en un procedimiento de configuración y es necesaria para configurar los 19.2 Kb/s de frecuencia para el envío de datos hacia los controladores de los motores.

Se elaboraron dos tipos de procedimientos de movimiento para los motores:

- Un grupo de ellos tuvo como propósito el movimiento intermitente de los motores, avanzando como paso mínimo una vuelta por llamada a procedimiento.
- El otro grupo se encargó del movimiento continuo de los motores. Durante la ejecución del segundo grupo de procedimientos los motores continuarán moviéndose hasta que se les dé un reinicio por software por medio de la instrucción CLR

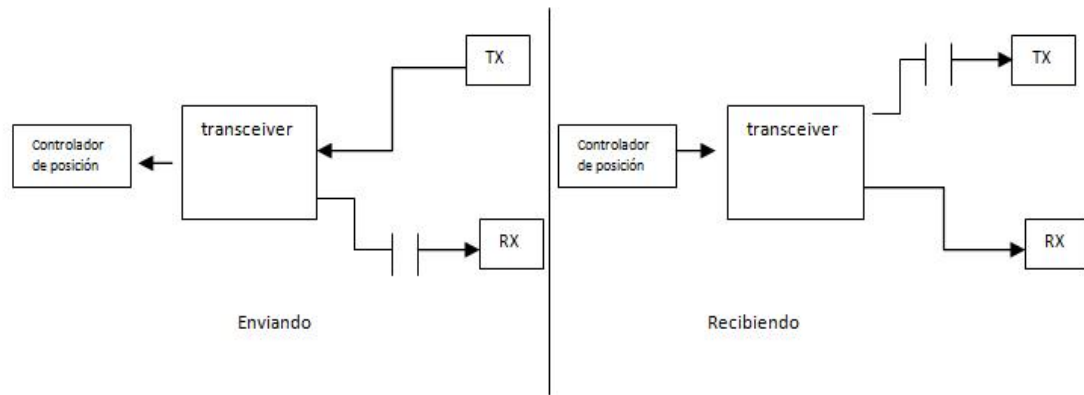
Figura No. 11 Diagrama de flujo del uso de las funciones del controlador



El funcionamiento de ambos grupos de procedimientos consistió en mandar la instrucción vía serial de movimiento asignándole la dirección del motor que se desea mover.

El procedimiento de consulta de datos consiste en conocer la posición relativa actual de cada motor independientemente. El controlador de posición al recibir la instrucción de consulta espera un determinado tiempo para responder por medio de la misma línea de comunicación lo que asemeja a un tipo de comunicación "Half-duplex" asíncrono. El Microcontrolador PIC16f887 utilizado posee un módulo de comunicación "Half-duplex" pero síncrono por lo que se debe elaborar un "transceptor" (Figura No.12) para la recepción de información hacia el Microcontrolador. Para controlar este "transceptor" se añadió al procedimiento de consulta una señal de control que se encarga de decir cuándo se envía o cuándo se recibe información.

Figura No. 12 Diagrama de envío y recepción de datos



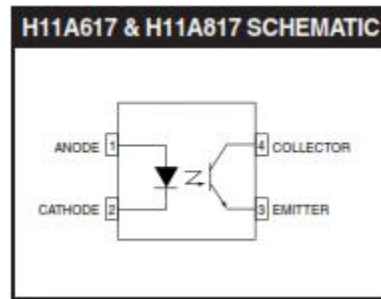
Todos los procedimientos que se encuentran en versiones que interactúan con un solo motor se encuentran para controlar los dos motores simultáneamente.

### C. Fase número 3 "Implementación de hardware"

Tomando en cuenta todos los componentes que posee el kit Parallax, en esta fase se implementaron tanto circuitos de desacople de las fuentes de alimentación, transceptor de comunicación entre el Microcontrolador y el controlador de posición como montaje y acople de los motores a la estructura del robot RAEC.

El desacople de las fuentes de alimentación. Debido a que el sistema consta de dos fuentes de alimentación (12V para motores y 5V para controladores) estas debieron de ser aisladas eléctricamente una de la otra para evitar interferencia de cualquier tipo de ruido generado por los motores del circuito de potencia. El desacople se diseñó usando un optoacoplador 817 (Figura No.13), el cual del lado del diodo emisor de luz tiene el circuito de control y del lado del transistor el de potencia.

Figura No. 13 Optoacoplador utilizado para desacople entre alimentaciones [3]



El montaje de los motores en la estructura del RAEC. Para fijar los motores a la estructura de aluminio del RAEC se utilizaron pernos de dos pulgadas de largo y un 1/4 de pulgada de diámetro. Los puentes H HB-25 de Parallax fueron montados en un nivel superior del Robot (Figura No.14).

Figura No. 14 Posición de los puente H



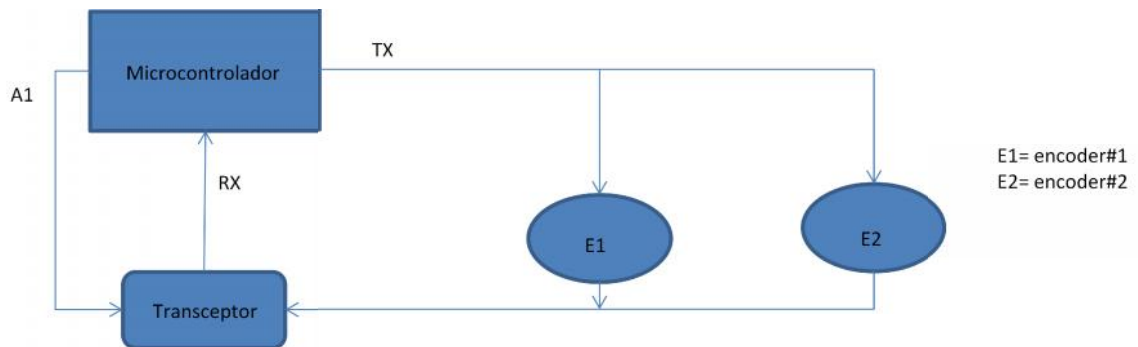
Durante montaje de los motores se optó aislar la continuidad entre el bloque soporte del eje de los motores y la placa del controlador de posición. El aislamiento entre la estructura y los motores en la sección de contacto transversal se implemento utilizando plywood como intermediario entre los materiales (Figura No.15). En el área de contacto entre los pernos y el tubo de aluminio del RAEC se utilizaron tarugos plásticos de media pulgada.

Figura No. 15 aislado de los motores



Una vez montados los motores y controladores en la estructura se conectó en serie los controladores de posición para implementar la red de comunicación descrita por el fabricante, se conectaron las fuentes de alimentación el transceptor y el acople opto-eléctrico entre los circuitos. La conexión entre el PIC y el transceptor fabricado se hizo por medio de los pines RC6 y RC7, los cuales cumplían su función como TX y RX del modulo serial. Para el bit de control del transceptor se utilizó el pin A1, cuando este pin se encuentra en un cero lógico el PIC se encuentra listo para mandar y cuando se encuentra en un uno lógico está preparado para recibir información de los controladores de posición (Figura No.16).

Figura No. 16 Conexión Microcontrolador-transceptor-codificadores



## D. Fase número 4 "Análisis de potencia"

El análisis de potencia se resume al monitoreo de consumo de energía de la batería de los motores durante situaciones de trabajo continuo. Este análisis se elaboró conectando el de forma directa los motores a la batería de 12V TYSONIC (Figura No.17) completamente cargada. Se realizaron 5 simulaciones de operación, obteniendo así el consumo de corriente en cada uno y comparándolo con la cantidad de energía que puede entregar la batería.

Figura No. 17 Batería de 12V TYSONIC



Tabla No. 3 Resultados de simulación de consumo

	Simulación #1	Simulación #2	Simulación #3	Simulación #4	Simulación #5
<b>Corriente(1 motor sin carga)(A)</b>	1.097	1.101	1.007	1.096	1.077
<b>Voltaje(V)</b>	12.01	12.01	12.01	12.01	12.01
<b>Capacidad de batería(Ah)</b>	35	35	35	35	35
<b>Eficiencia de consumo eléctrico</b>	70%	70%	70%	70%	70%
<b>Cantidad de motores</b>	2	2	2	2	2
<b>Duración estimada de batería(Horas)</b>	11.17	11.13	12.16	11.18	11.37

La vida promedio de la batería siendo utilizada por los motores sin carga alguna fue de 11.52 horas asumiendo que solo el 70% de la energía era aprovechada para el movimiento del motor.

## E. Fase número 5 "Análisis mecánico"

El análisis mecánico de los motores se centró en el estudio de esfuerzos en las bases de los motores, los ejes y los aros. Tomando algunas medidas facilitadas por el fabricante y haciendo el levantamiento de medidas faltantes se realizaron planos de planta de cada pieza.

Los planos de planta de las piezas sirvieron de base para la realización de modelos 3D en el programa Autodesk Inventor 2011. Estos modelos fueron sometidos a los tres pesos más significativos del robot, los cuales eran: la estructura, la batería y posibles cargas que reciba la estructura ya en operación.

El peso de la batería fue de 25.35 lb (11.523 Kg), estos datos fueron obtenidos directamente del fabricante. El peso de la estructura (Figura No.18) tuvo que ser calculado debido a que fue construida por estudiantes de la universidad y no se tiene un dato exacto previo. La magnitud del peso estuvo en función a la densidad del material utilizado para su construcción. Los materiales utilizados para la estructura fueron comprados en la empresa Alumicentro S.A., esta empresa utiliza el aluminio 6063-T5 con densidad de 2.7g/cc en sus productos (Tabla No.4). Con base en la densidad del material y al volumen del material usado en los tubos y planchas se calculó que la estructura poseía una masa de 5.823 Kg. Para las cargas varias se asignó un peso aproximado de 5 lb (2.273Kg). Sumando las cargas se tiene una masa total de 19.62 Kg.

Tabla No. 4 Características del aluminio 6063-T5

<b>Dureza B</b>	60
<b>Dureza K</b>	83
<b>Dureza V</b>	70
<b>Sut</b>	152 Mpa
<b>Sy</b>	145 Mpa
<b>E</b>	68.9 GPa
<b>Erogación a la ruptura</b>	12%
<b>Radio de Poisson</b>	0.33
<b>Esfuerzo a la fatiga</b>	68.9 Mpa
<b>Modulo de corte</b>	25.8 GPa
<b>Resistencia al corte</b>	117 Mpa
<b>Densidad</b>	2.7 g/cc

Tabla No. 5 Recuento de masas que soportaran los motores

<b>Masa varios</b>	2.273	kg
<b>Masa Estructura</b>	5.823	kg
<b>Masa Batería</b>	11.523	kg
<b>Masa total</b>	<b>19.618</b>	<b>kg</b>

Figura No. 18 Estructura con motores



Los componentes enviados por Parallax están contruidos a base de aluminio 6061 con las siguientes características:

Tabla No. 6 Características del aluminio 6061

<b>Aluminum-6061</b>	
<b>Densidad</b>	2.71 g/cm <sup>3</sup>
<b>Resistencia al corte</b>	275 MPa
<b>Esfuerzo último a la tensión</b>	310 MPa
<b>Modulo de Young</b>	68.9 GPa
<b>Radio de Poisson</b>	0.33 ul
<b>Modulo de corte</b>	25.9023 GPa
<b>Coficiente de expansión</b>	0.0000236 ul/c
<b>Conductividad térmica</b>	167 W/( m K )
<b>Calor especifico</b>	1256.1 J/( kg c )

1. **Análisis de esfuerzos en soporte de motor.** Dado que la base de los motores es el elemento que recibe directamente parte del peso del robot fueron los primeros en ser analizados. Para el análisis de una base se tomó el peso anteriormente calculado dividido dentro de 4 debido a que el robot descansa sobre los dos motores y dos llantas locas de soporte.

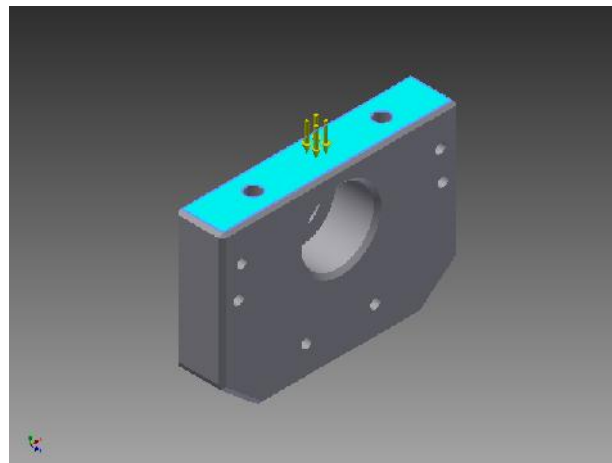
Para distribuir la fuerza en toda el área de contacto de la base se calculo el esfuerzo equivalente. El área a analizar era de  $1388.866 \text{ mm}^2$ , la cual al aplicarle la fuerza de  $48.07 \text{ N}$  refleja un esfuerzo de  $0.0346 \text{ Mpa}$  (Tabla No.7). [4]

Tabla No. 7 Esfuerzo en base de motor

<b>Fuerza por peso</b>	192.261	N
<b>Fuerza sobre una base</b>	48.065	N
<b>Área de contacto</b>	1388.866	$\text{mm}^2$
<b>Esfuerzo en una base</b>	0.035	Mpa

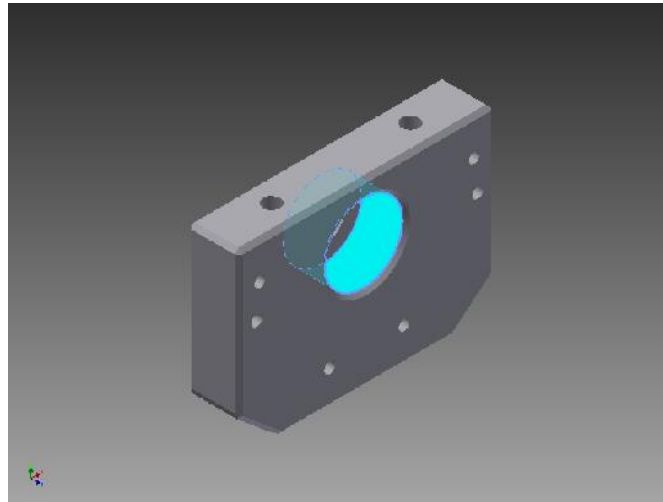
Una vez calculado el esfuerzo por base este fue aplicado al modelo 3D para proceder con el análisis de esfuerzos en la estructura, para ello se utilizo el analizador de esfuerzos de "Inventor".

Figura No. 19 Figura de esfuerzos en superficie superior de la base de los motores



El punto o área (Figura No.19) de anclaje es aquel que no sufrirá desplazamiento alguno debido a los esfuerzos aplicados. El área de la base utilizada durante el análisis como punto de referencia del anclaje fue el área cilíndrica donde es colocado el cojinete que soporta la flecha del motor (Figura No.20).

Figura No. 20 Área de anclaje



El análisis de esfuerzos de Inventor reflejó los siguientes datos de interés:

- Esfuerzos principales
- Esfuerzo de Von Mises
- Deformaciones de la pieza

Los tres esfuerzos principales del análisis tridimensional están dados por la siguiente ecuación de tercer grado, la cual está en función de los esfuerzos de tensión de los diferentes ejes y por los esfuerzos cortantes en los diferentes planos. [4]

**Ecuación No. 5 Cálculo de los esfuerzos principales**

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_x\sigma_z + \sigma_y\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{zx}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0$$

Siendo:

- $\sigma$ : Esfuerzo principal
- $\sigma_x$ : Esfuerzo de flexión sobre el eje x
- $\sigma_y$ : Esfuerzo de flexión sobre el eje y
- $\sigma_z$ : Esfuerzo de flexión sobre el eje z
- $T_{xy}$ : Esfuerzo de corte sobre el plano xy
- $T_{yz}$ : Esfuerzo de corte sobre el plano yz
- $T_{zx}$ : Esfuerzo de corte sobre el plano zx

Interpretando el análisis de esfuerzos de Von Mises (Figura No.21) en la base se del motor se puede apreciar una concentración de esfuerzos mayor en el área superior donde fue colocado el cojinete con el valor máximo de 0.113MPa siendo este despreciable al ser comparado con el esfuerzo ultimo del aluminio 6061 (Tabla No.6). Observando la forma de la ecuación No.6 podemos decir que mientras mayores sean los esfuerzos principales mayor será el esfuerzo de Von Mises. Por lo que al ver las figuras No.22 y No.23 se pudo corroborar que de igual manera que el esfuerzo de Von Mises el primer y tercer esfuerzo tienen una concentración mayor en el área del cojinete aunque no precisamente en el área superior las 2.

**Ecuación No. 6 Esfuerzo de Von Mises**

$$\sigma' = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2}$$

Siendo:

- $\sigma'$ : Esfuerzo de Von Mises
- $\sigma_1$ : Primer esfuerzo principal
- $\sigma_2$ : Segundo esfuerzo principal
- $\sigma_3$ : Tercer esfuerzo principal

**Figura No. 21 Esfuerzo de Von Mises**

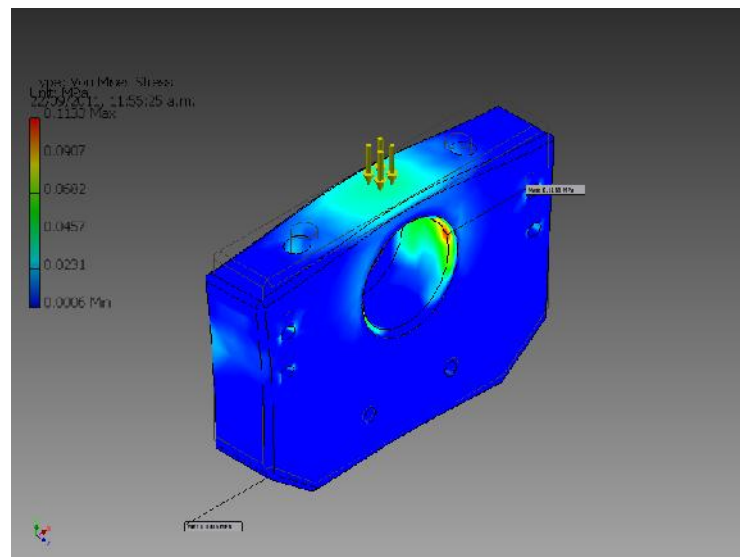


Figura No. 22 Primer esfuerzo principal

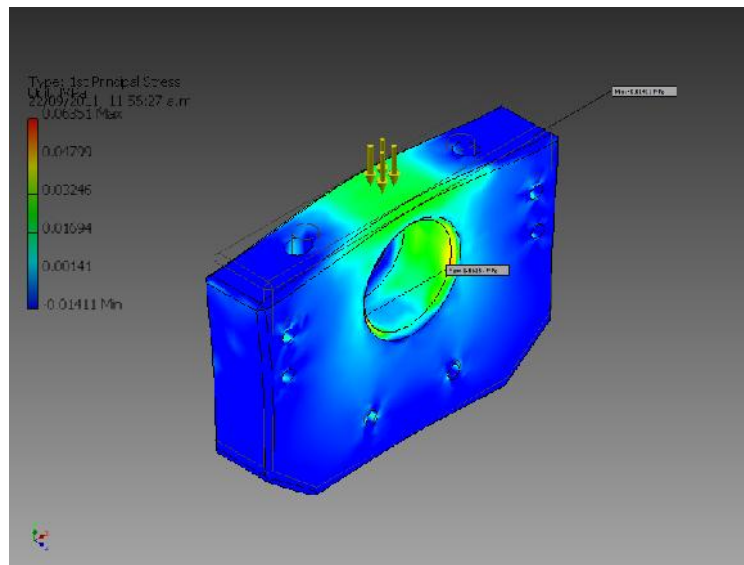
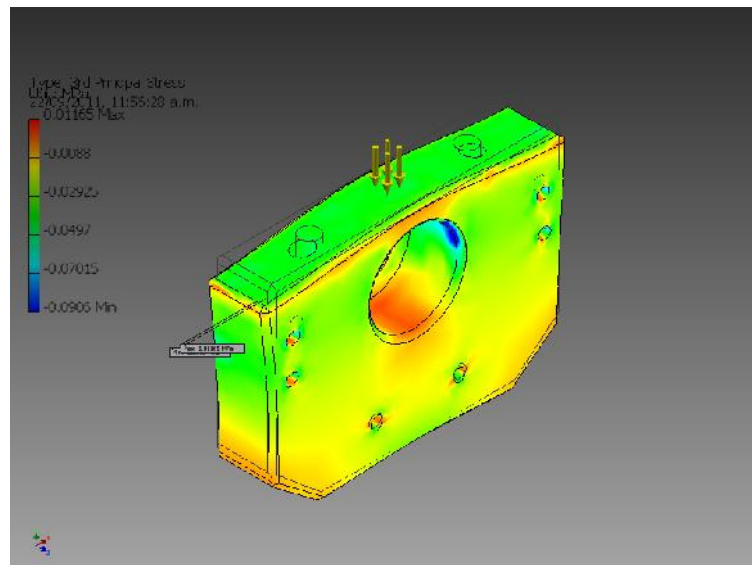
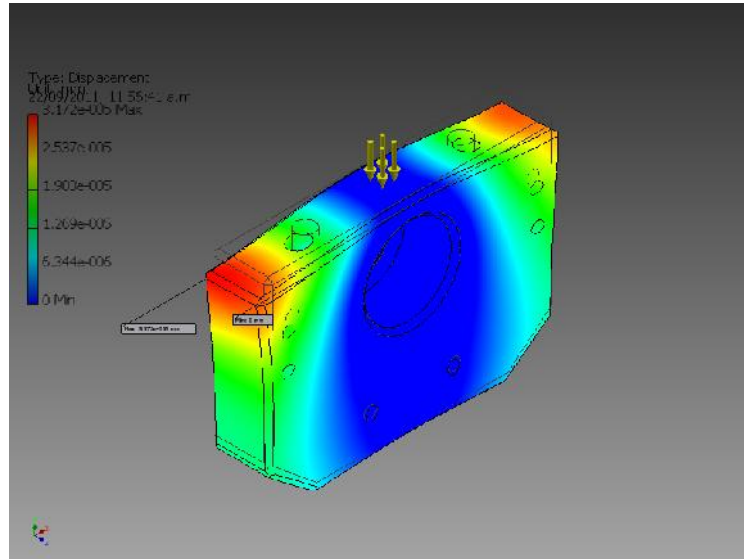


Figura No. 23 Tercer esfuerzo principal



Aplicados estos esfuerzos a la pieza se tuvieron deformaciones mínimas en el material siendo la máxima de  $3.17 \times 10^{-5}$  mm (Figura No.24)

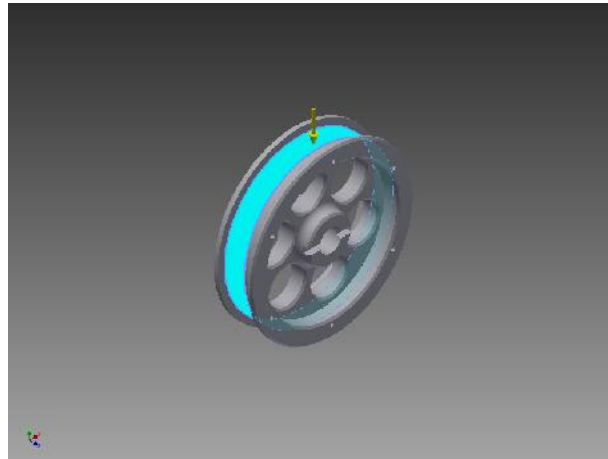
Figura No. 24 Deformación de la pieza



**2. Análisis de esfuerzos en aro.** El modelo que se analizó en el caso del aro es un ensamble que consta de dos piezas unidas por restricciones de movimiento en sus uniones. Para el análisis de esfuerzos del ensamble se plantearon dos diferentes situaciones de operación. Una situación extrema de operación donde el aro no posee llanta de soporte y este está en contacto directo con el suelo. La otra situación de simulación fue con la llanta distribuyendo de manera ideal la presión del aire de la llanta en la superficie de aro agregándole la presión generada por el peso soportado.

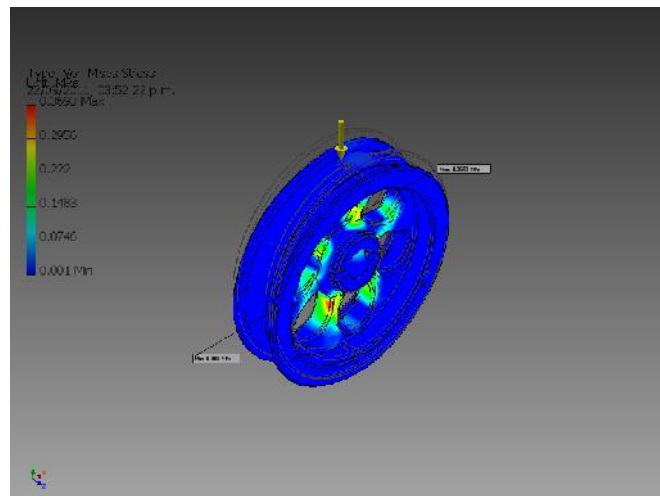
Para el primer caso la carga se modelo como una carga puntual radial al aro con la magnitud de un cuarto de la fuerza generada por el total del peso del robot (Figura No.25). El punto de anclaje para esta simulación fue tomado en el área donde el eje es insertado en el aro asumiendo que a partir de ese punto se darían todas las demás deformaciones.

**Figura No. 25 Carga puntual radial en aro**



De igual manera que en la base del motor se tuvieron los datos de esfuerzos principales y de Von Mises y las deformaciones de cada punto. Al analizar los modelos de esfuerzo de Inventor se pudo apreciar que la concentración de esfuerzos en las secciones de menor área transversal siendo estos de 0.3693 MPa (Figura No.26) siendo este despreciable al ser comparado de igual manera con el esfuerzo ultimo a la tensión del aluminio utilizado (Tabla No.6).

**Figura No. 26 Distribución de esfuerzos de Von Mises en Aro**



Para el segundo análisis se distribuyeron las 35 psi de la llanta inflada en la superficie del aro agregándole un esfuerzo (Tabla No.7), asumiendo su distribución uniforme, en la superficie del aro y generado por la carga que aplica el peso del robot, las demás condiciones de simulación tales como el punto de anclaje permanecieron iguales al caso anterior.

Figura No. 27 Área de aplicación del esfuerzo en aro

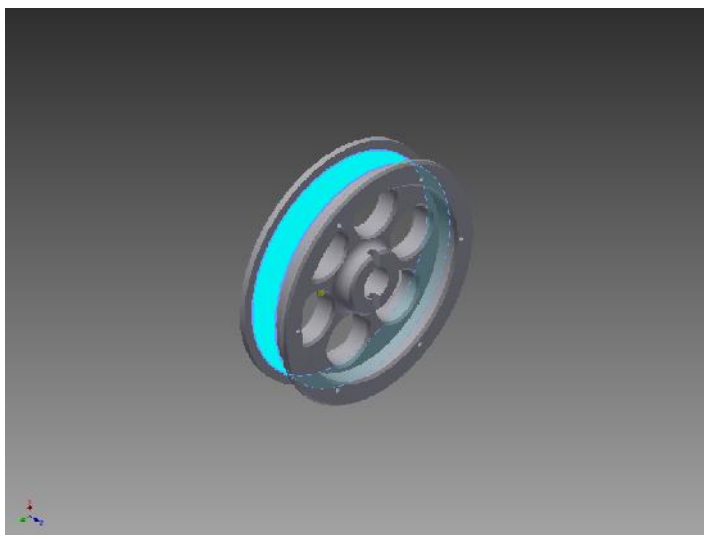


Tabla No. 8 Cálculo de esfuerzo en aro

<b>Diámetro</b>	<b>87.63</b>	<b>Mm</b>
<b>H (ancho del aro)</b>	22.55	Mm
<b>Área de contacto</b>	6207.96	mm <sup>2</sup>
<b>Fuerza</b>	48.065	N
<b>Esfuerzo en área de contacto</b>	0.007742473	Mpa
<b>Esfuerzo por aire en llanta</b>	0.241316495	Mpa
<b>Esfuerzo total</b>	0.249058968	Mpa

Con esta nueva distribución de la fuerza se apreció una distribución de los esfuerzos en el aro más homogénea en donde de igual manera el esfuerzo de Von Mises fue mayor en las secciones de menor área transversal del aro con un valor de 0.3185 MPa (Figura No.28). La deformación máxima del aro fue de  $1.195 \times 10^{-4}$  mm en la pieza que no tiene soporte radial (Figura No.29).

Figura No. 28 distribución de esfuerzos de aro con llanta

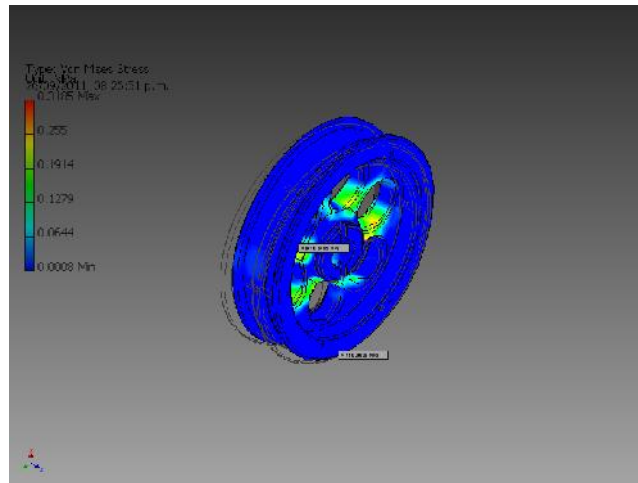
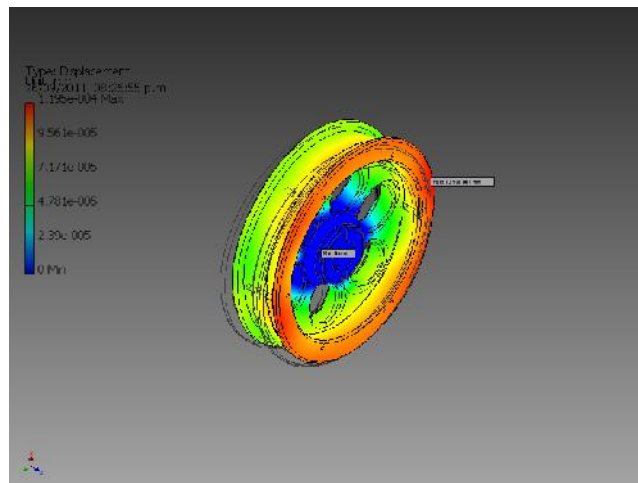


Figura No. 29 Deformación del aro con llanta



3. **Análisis de esfuerzos en eje.** El eje se analizó desde dos puntos de vista: del analizador de esfuerzos de inventor y el acelerador de diseño de ejes. Este doble análisis se elaboró debido a que en este elemento es donde se reflejó la mayor concentración de esfuerzos.

Para el análisis de esfuerzos, como en los elementos anteriores, se seleccionó un punto de aplicación de la fuerza y un punto de anclaje. El lugar de aplicación de la fuerza fue el extremo que estuvo en contacto con aro de la llanta (Figura No.30), esta fuerza se modeló como una carga puntual de magnitud igual a un cuarto del peso total de la estructura previamente calculado. El lugar de anclaje fue el área de contacto con el cojinete (Figura No.31).

Figura No. 30 Lugar de aplicación de fuerza en eje

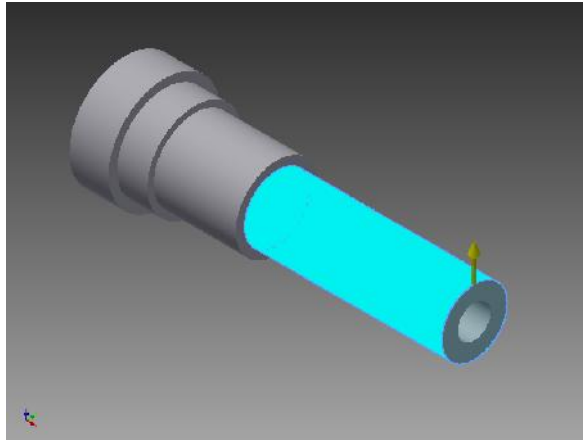
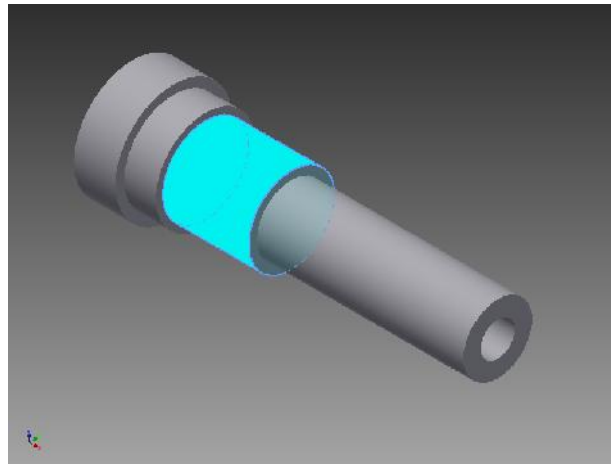


Figura No. 31 Área de anclaje de eje



El análisis reflejó un esfuerzo de Von Mises máximo de 8.231 MPa ubicado en el cambio de sección del área de contacto con el cojinete (Figura No.33), siendo éste el mayor esfuerzo registrado en el análisis de los tres elementos.

Las deformaciones en el eje también reflejaron un aumento considerable en comparación a las demás partes, siendo la máxima de 0.01009 mm en el extremo donde es colocado el aro de la llanta(Figura No.32). La comparación de la deformación entre piezas indica que la pieza más sensible a aumentos de cargas es el eje.

Figura No. 32 Deformación de eje

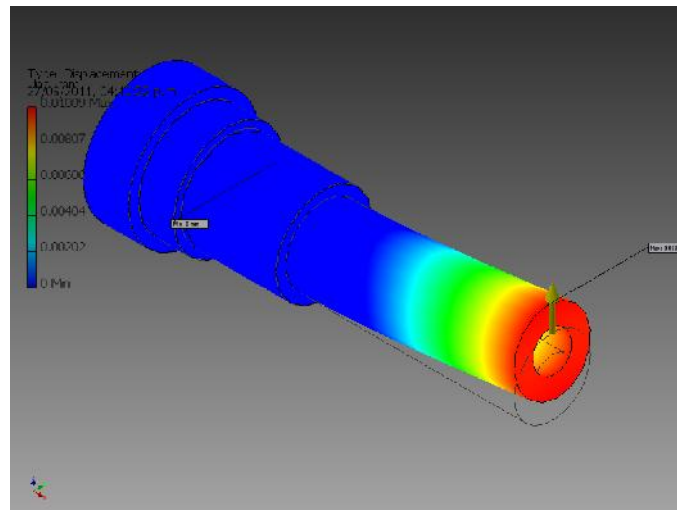
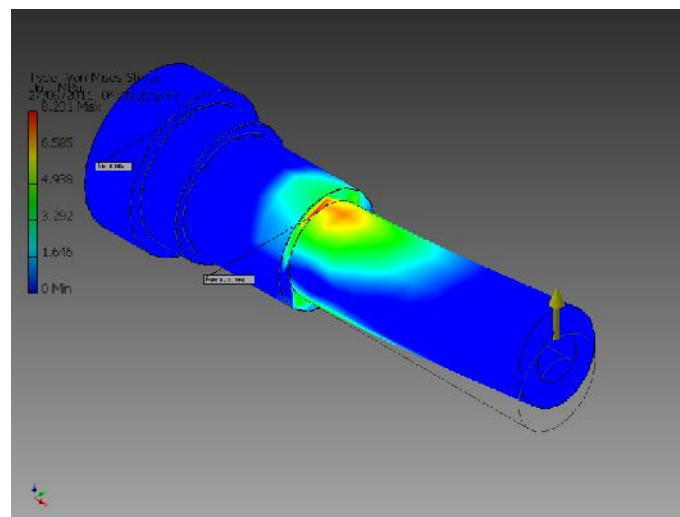


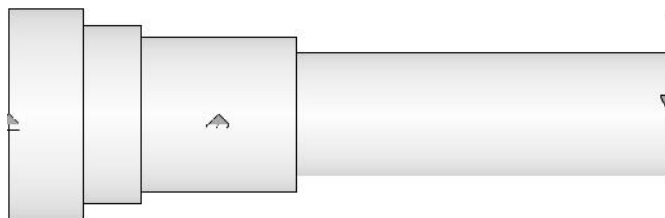
Figura No. 33 Esfuerzo de Von Mises sobre eje



El análisis del eje por el acelerador de diseño de Autodesk Inventor partió de igual manera de un diseño 3D. El modelo generado tuvo las mismas medidas que el utilizado para el análisis de esfuerzos.

El acelerador de diseño modela el diseño como una viga con los soportes y fuerzas que el usuario decida. En este análisis se posicionó una fuerza concentrada igual a un cuarto del peso de la estructura soportada en el extremo donde se acopló el aro de la llanta tal como se hizo en el análisis de esfuerzos. Los soportes se colocaron en la sección donde estaría posicionado el cojinete y en el extremo de la sección que estaría acoplada al motor (Figura No.34).

Figura No. 34 Diagrama de cuerpo libre de eje



Usando este modelo para analizar el eje se obtuvo una deflexión máxima en el punto de aplicación de la fuerza (Figura No.35) y un esfuerzo máximo de 7.9205 MPa en el cambio de sección entre la sección donde se aplica la fuerza y donde fue colocado el cojinete (Figura No.36).

Además este modelo muestra como los cambios de la sección transversal del eje afectan directamente a los valores del esfuerzo de tensión sobre el mismo mostrándose como discontinuidades dentro de la grafica de la Figura No. 36.

Figura No. 35 Gráfica de deflexión de eje

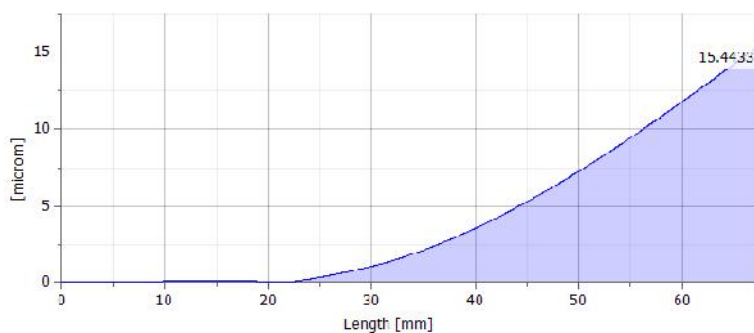
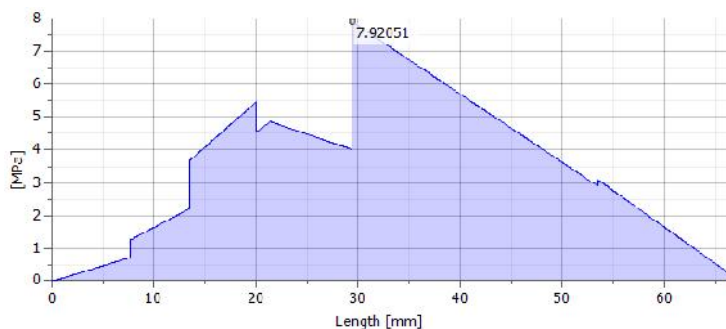


Figura No. 36 Gráfica de esfuerzo de tensión de eje



Tanto el análisis de esfuerzos como el generado por el acelerador de diseño reflejaron una concentración de esfuerzos en el mismo punto y de magnitud relativamente mayor a la de los otros dos elementos previamente analizados siendo el eje el componente más sensible a falla en dado caso se dé una sobre carga de peso en la estructura.

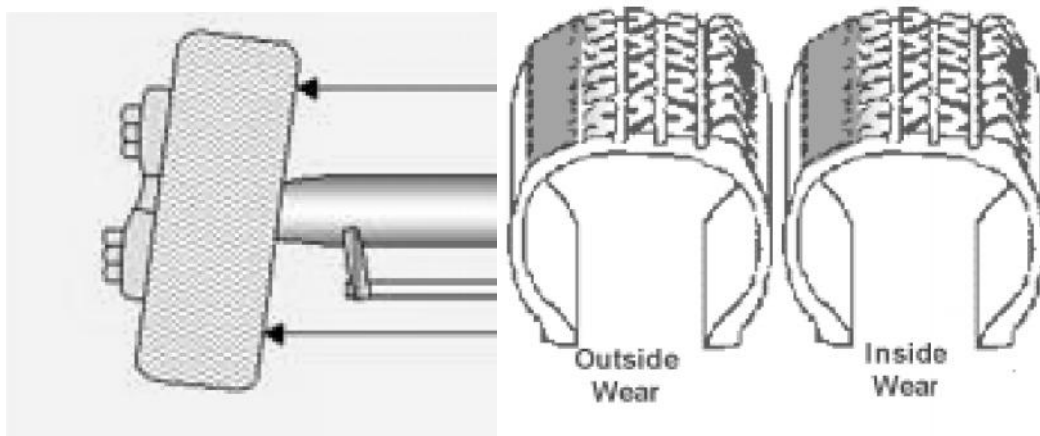
El factor de seguridad del eje fue calculado tomando el valor máximo del esfuerzo reflejado en el análisis de esfuerzos y el esfuerzo ultimo a la tensión del material (Tabla No.7).

Tabla No. 9 Factor de seguridad del eje del motor

Esfuerzo Max(MPa)	Esfuerzo ultimo de tensión (MPa)	Factor de seguridad
8.23	310	37.67

Una deformación plástica en el eje implicaría cambio en el área de contacto de la llanta (Figura No.37), modificando así el perímetro de avance de la misma teniendo como consecuencia que si la deformación es considerable a comparación.

Figura No. 37 Relación entre deformación de eje y avance longitudinal

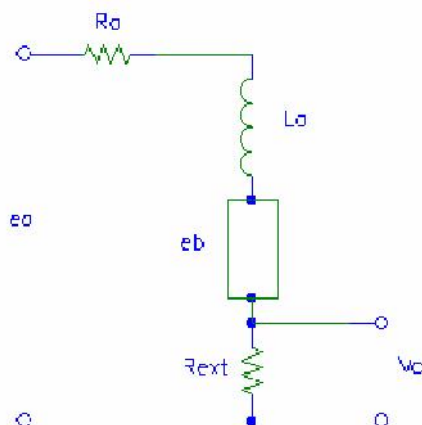


## F. Fase número 6 "Medición de parámetros del sistema"

La medición de parámetros del sistema se centro totalmente en el análisis de los motores. Los motores fueron sometidos a dos pruebas, éstas consistieron en la medición del voltaje en una resistencia externa al motor y la constante de tiempo del motor.

La medición del voltaje en una resistencia externa al motor se llevo a cabo con la construcción de un simple circuito que constaba de un amplificador de potencia, elaborado con el integrado TIP120, y una resistencia de 0.5 ohm en serie con el motor (Figura No.38).

Figura No. 38 Circuito de resistencia externa en serie con motor



El circuito de potencia fue alimentado por una onda cuadrada generada de amplitud de 12V ( $e_a$ ) y un ciclo de trabajo del 50%. A una frecuencia de 851 Hz se apreció que la fuerza del motor no vencía la fuerza de fricción del eje, en consecuencia el voltaje inducido en el inductor de la armadura es cero y el voltaje aplicado se divide únicamente en la resistencia externa e inductancia de la armadura.

El voltaje en la resistencia externa ( $V_o$ ) fue de 0.55 V. Aplicando la fórmula de divisor de voltaje en la armadura del motor (Ecuación No. 7) se pudo averiguar el valor de la resistencia de la armadura del motor ( $R_a$ ), el cual fue de 0.5 ohm (Tabla No.10).

Ecuación No. 7 Divisor de voltaje en armadura de motor

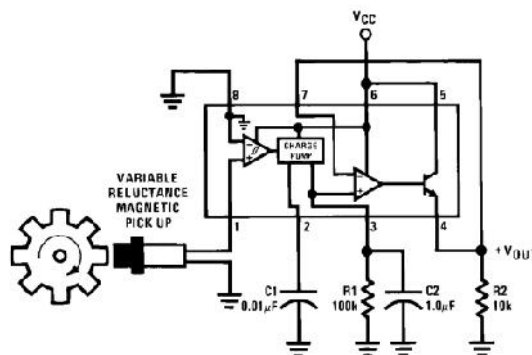
$$V_o = \frac{R_{ext}}{R_a + R_{ext}} \cdot e_a$$

Tabla No. 10 Mediciones del motor

Corriente(1 motor sin carga)	1.097	A
Voltaje( $e_a$ )	12.01	V
Frecuencia de alimentación	851	Hz
Voltaje de resistencia de carga( $V_o$ )	0.55	V
Resistencia de carga	0.5	$\Omega$
Constante de tiempo	590	ms

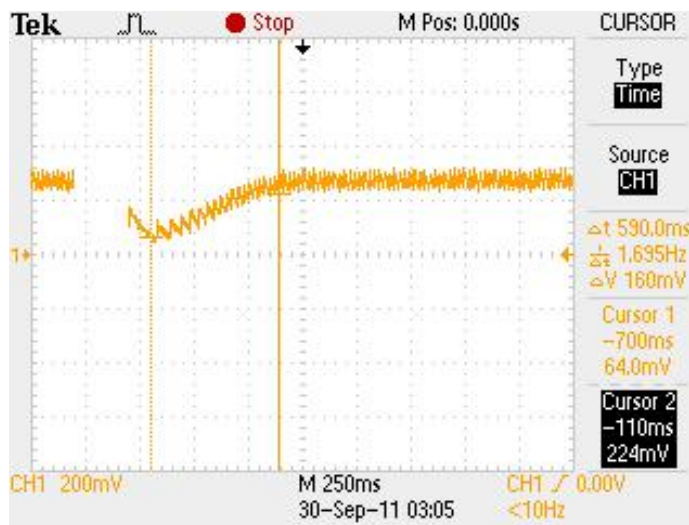
La medición de la constante de tiempo del motor se realizó con la construcción de un tacómetro usando como base el integrado LM2907, el cual es un convertidor de frecuencia a voltaje, y un circuito simple de un seguidor construido con un optoacoplador. El circuito del tacómetro fue extraído de las aplicaciones básicas del integrado (Figura No.39).

Figura No. 39 Circuito de tacómetro



La constante de tiempo es el tiempo en que una señal tarda en llegar al 90% del valor estable que esta posee. Al hacer mediciones con el tacómetro construido y el osciloscopio (Figura No.40) se obtuvo que la constante de tiempo del motor es 590ms (Tabla No.10).

Figura No. 40 Medición de velocidad de motor con tacómetro



Se utilizó el valor de la constante de tiempo en conjunto con los valores de la resistencia externa y la resistencia de armadura para calcular la inductancia de la armadura (Ecuación No.8), la cual dio un valor de 6.44 H.

Ecuación No. 8 Ecuación de constante de tiempo

$$\tau = \frac{L_a}{R_a + R_{ext}}$$

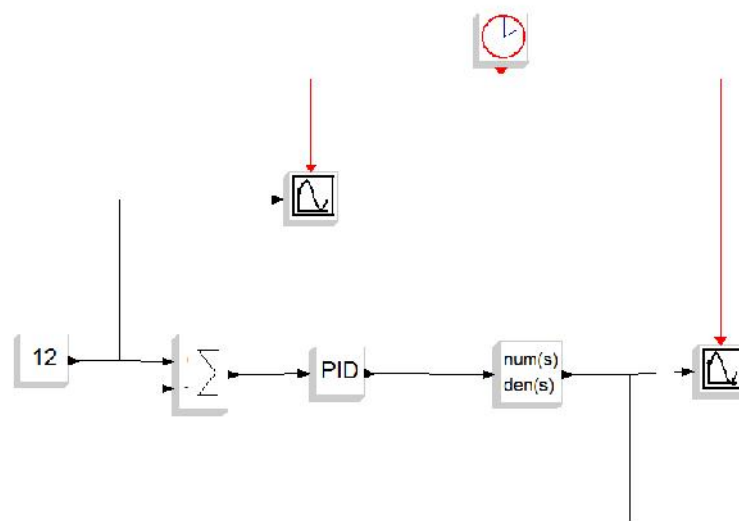
Tabla No. 11 Parámetros del motor

Resistencia de armadura(Ra)	10.42	Ω
Inductancia de armadura(la)	6.44	H

## G. Fase número 7 "Diseño de sistema analógico de control"

El diseño de un sistema analógico de control para los motores analizados se hizo utilizando los parámetros del motor anteriormente medidos y aplicándolos a la función de transferencia de un motor DC. Para el diseño se utilizó el programa simulador de sistemas de control de nombre "ScicosLab". En este programa se elaboró un control con retroalimentación negativa ideal que constaba de un PID, la función de transferencia del motor y la señal de control.

Figura No. 41 Diagrama de lazo de control analógico



El modelo del control PID utilizado fue el siguiente manera: (3)

$$PID(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd * s$$

- Kp (constante de proporcionalidad).
- Ki=Kp/Ti, siendo Ti la constante de tiempo integral.
- Kd=Kp\*Td, siendo Td la constante de tiempo derivativa.

La función de transferencia tomó en cuenta la inductancia y resistencia de armadura. Se buscó que en la respuesta al impulso del control con una sobreelevación menor a un voltio para no dañar los motores y disminuir a la mitad la constante de tiempo.

**Ecuación No. 9 Función de transferencia de motor**

$$H_{motor} = \frac{1}{Ra + sLa} = \frac{1}{10.42 + 6.44s}$$

La metodología utilizada para establecer una primera aproximación para los valores del control fue utilizar el método de sintonización de Ziegler-Nichols.

Primero se estableció  $T_i = \infty$  y  $T_d = 0$ , a partir de cero se incremento el valor del control proporcional hasta un valor crítico  $K_{cr}$  en donde la salida exhibió oscilaciones con un periodo  $P_{cr}$  correspondiente. Dando un valor de:

- $K_{cr} = 20$
- $P_{cr} = 0.51$

**Tabla No. 12 Obtención de constantes de un sistema de control PID con base al método Ziegler-Nichols**

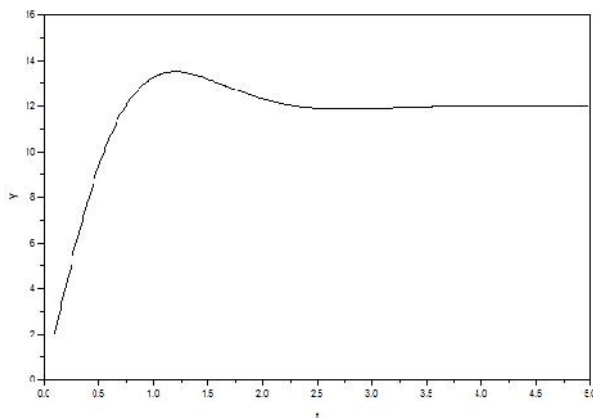
Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0.45K_{cr}$	$1/1.2 P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Usando esta función de transferencia y utilizando el segundo método de sintonización de Ziegler-Nichols se realizó una primera aproximación para los valores constantes del control PID de:

- Kp: 12
- Ki: 47.06
- Kd: 0.765

La respuesta al impulso generada con esta primera propuesta fue:

**Figura No. 42 Respuesta al impulso con primera aproximación de constantes**



Utilizando estos valores se observó una sobre elevación de 1.8 voltios y una constante de tiempo de 520 ms, siendo estos resultados diferentes a los deseados. Se realizaron varias iteraciones utilizaron diferentes valores del control tomando en cuenta las relaciones que existen con la sobreelevación, error estacionario, y velocidad de reacción (Tabla No.13).

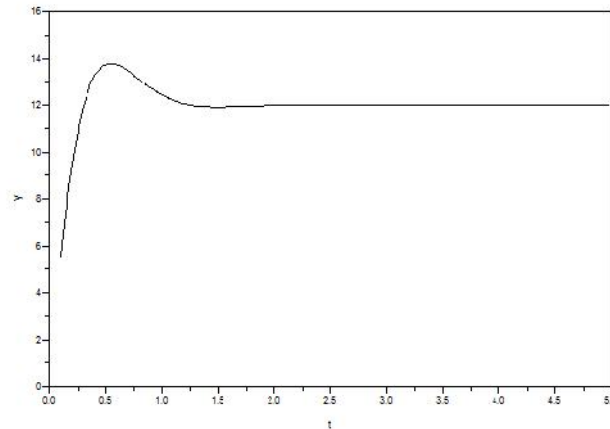
**Tabla No. 13 Relaciones de ajuste de control PID**

	<b>Kp aumenta</b>	<b>Ti disminuye</b>	<b>Td aumenta</b>
<b>Estabilidad</b>	Se reduce	Disminuye	Aumenta
<b>Velocidad de respuesta</b>	Aumenta	Aumenta	Aumenta
<b>Error estacionario</b>	No eliminado	Eliminado	No eliminado

Como segunda aproximación se expusieron los siguientes valores:

- Kp: 50
- Ki: 200
- Kd: 3

**Figura No. 43 Respuesta al impulso de la segunda propuesta de contantes**



Dados estos valores se observó una disminución en la constante de tiempo a 220 ms y una sobreelevación de 2V. Analizando estos datos se apreció una mejora en el tiempo de respuesta del sistema y un valor de sobreelevación inaceptable en comparación con los datos deseados.

Realizadas 10 iteraciones adicionales se llegaron a los siguientes valores:

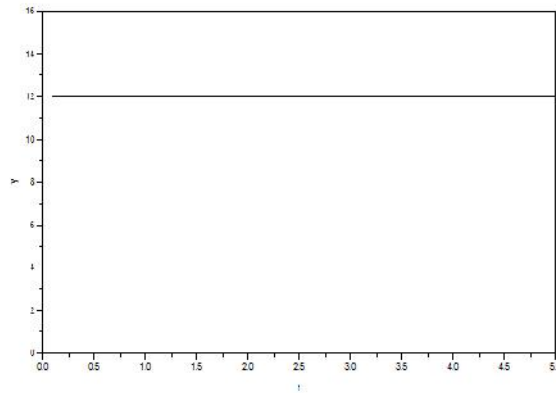
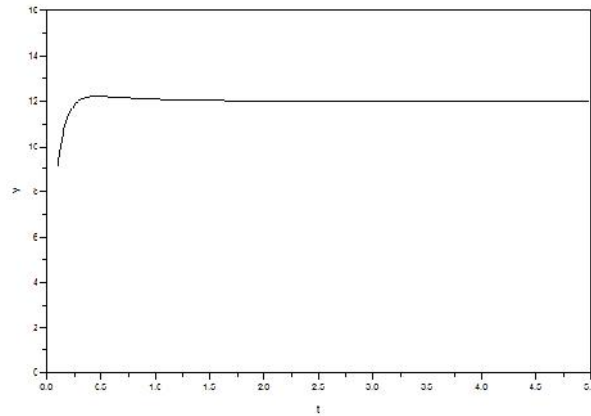
- Kp: 100
- Ki: 180
- Kd: 1.2

La ecuación de transferencia del bloque de control PID con los valores anteriores mostro la siguiente forma:

**Ecuación No. 10 Función de transferencia de bloque PID**

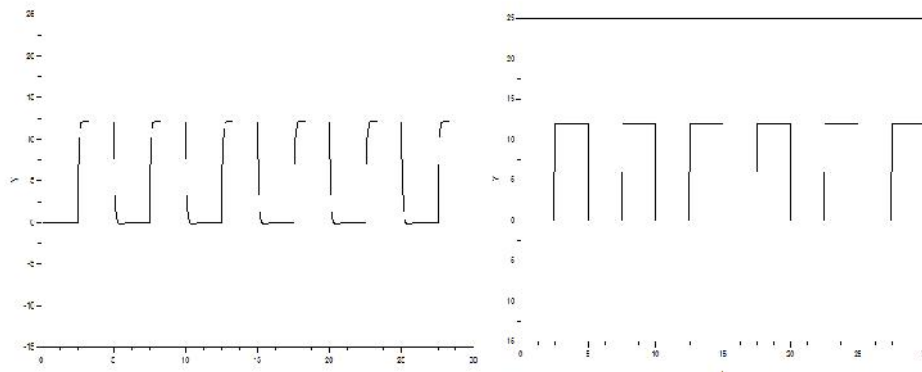
$$H(S) = 100 + \frac{180}{s} + 1.2s$$

Como primera señal de referencia se aplicaron 12 voltios contantes al sistema de control (Figura No.44) y se midió la señal de entrada y la señal de salida. La nueva constante de tiempo que se apreció en las gráficas fue de 200ms aproximadamente (Figura No.45) y una sobreelevacion de 0.2V siendo estos valores aceptables dado que lo que se buscaba era sobreelevación menor a un voltio y una constante de tiempo menor a los 250ms.

**Figura No. 44 Señal de referencia de 12V****Figura No. 45 Señal de medición para señal de referencia de 12V**

Se realizó otra simulación usando una señal cuadrada de 5 segundos de periodo como referencia una señal cuadrada y se observó la capacidad del sistema de seguirla (Figura No. 46).

Figura No. 46 Comparación entre señal de referencia (derecha) y señal de salida del sistema (izquierda)



Para corroborar la estabilidad del sistema de control propuesto se utilizó el criterio de Routh-Hurwitz. Este criterio usa el polinomio del denominador de la función de transferencia de sistema entero. [6]

Para obtener esta función de transferencia se realizó una simplificación de diagrama del sistema (Figura No.41) por algebra de bloques y se obtuvo la siguiente función:

**Ecuación No. 11 Función de transferencia del sistema**

$$\frac{20. (450. + 3. s^2 + 250. s)}{5521. s + 382. s^2 + 9000.}$$

Se tomaron los valores del denominador de la función de transferencia y se aplicaron al arreglo de Routh. Este criterio indica que si no existe cambio de signo en la primera columna del arreglo el sistema es estable (Tabla No. 14).

**Tabla No. 14 Arreglo de Routh del sistema analizado**

<b>S<sup>2</sup></b>	382	9000
<b>S<sup>1</sup></b>	5521	-
<b>S<sup>0</sup></b>	900	-

Dado que el arreglo de Routh no reflejo ningún cambio de signo se puede concluir que los valores asignados al control PID cumplieron con los requerimientos previamente establecidos y generan un sistema estable.

## VII. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos durante los análisis del sistema Parallax podemos concluir:

1. Las deformaciones sobre los componentes de los motores causadas por la fuerzas aplicadas tienen como máximo 0.01009 mm y son despreciables en relación a los 8.5cm de avance mínimo que se utilizó durante la implementación.
2. El componente mecánico que recibe mayor esfuerzo durante la implementación del robot móvil es el eje de los motores, teniendo éste un factor de seguridad de 37.67 por lo que no falla.
3. La batería presenta un tiempo de vida de 11.52 horas durante las simulaciones de consumo mínimo del sistema.
4. La implementación de un control analógico al sistema permitió reducir a la mitad la constante de tiempo del motor sin causar una sobreelevación mayor a un voltio en la alimentación del sistema.

## VIII. RECOMENDACIONES

Una de las limitaciones de este estudio fue que no se pudo contar con otra aplicación del sistema Parallax en un sistema de otro robot móvil para tener un marco de comparación de los datos obtenidos y ver el comportamiento de los motores en aplicaciones que no implicaban movimiento lineal. Para futuros trabajos de investigación involucrando el sistema motorizado Parallax, se recomienda realizar esta comparación para obtener resultados más significativos.

Por otro lado, debido a que el análisis del sistema estaba plenamente orientado a la aplicación de un robot móvil no se analizaron los movimientos de los motores bajo requerimientos de alta precisión. Algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta para rediseñar el sistema son las siguientes:

- Si la base del motor no está debidamente aislado eléctricamente de la estructura donde es montado esto provocará un daño permanente en el codificador de posición.
- Para futuras simulaciones de operación con los motores analizados se recomienda el uso de componentes de alta potencia tales como resistencias, transistores y fusibles de alto amperaje debido al alto consumo de corriente que los motores pueden llegar a tener.

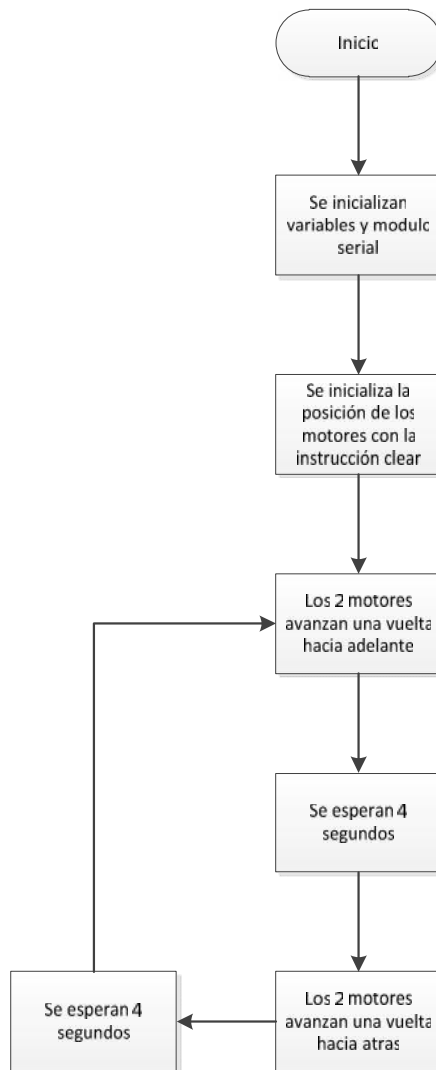
## IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Banach, Daniel T.; Jones, Travis y Kalameja Alan J. 2011. *Autodesk Inventor 2011 Essentials Plus*. 1ra ed. Autodesk
2. Bräunl, Thomas.; *Embedded robotics : mobile robot design and applications with embedded systems / T. Bräunl*. Berlin : Springer, 2003. 434 pp.
3. Bryson, Arthur Earl.; *Applied linear optimal control : examples and algorithms / A.E. Bryson*. Cambridge, UK : Cambridge Univeristy, 2002. 362 pp.
4. Budynas, Richard; Nisbett, J. Keith. *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. 8va ed. México, Mc Graw Hill. 1044 pp.
5. Katsushiko, Ogata. 1998. *Ingeniería De Control Moderna*. 3ra ed. México, Pearson. 997 pp.
6. Kuo, Benjamin C. 1996. *Sistemas de control automático*. 7ma ed. México, Prentice Hall. 898 pp.
7. Rocha, José. *Diagramas de Bloques*. Universidad Autónoma de Nuevo León. 9 pp.

## X. ANEXOS

### A. Diagrama de flujo y código fuente programa de control

Figura No. 47 Diagrama de flujo programa de control



```

list    p=16f887 ; list directive to define processor

#include <p16f887.inc> ; processor specific variable definitions

; '__CONFIG' directive is used to embed configuration data within .asm file.

; The labels following the directive are located in the respective .inc file.

; See respective data sheet for additional information on configuration word.

    __CONFIG __CONFIG1, _LVP_OFF & _FCMEN_ON & _IESO_OFF & _BOR_OFF & _CPD_OFF & _CP_OFF
    & _MCLRE_ON & _PWRTE_ON & _WDT_OFF & _INTRC_OSC_NOCLKOUT

    __CONFIG __CONFIG2, _WRT_OFF & _BOR21V

;*****
;
MAIN_PROGRAM CODE 0x0000

GOTO INICIALIZACION

;***** DEFINICION DE VARIABLES*****

UDATA 0x20

; example of using Shared Uninitialized Data Section

INT_VAR  UDATA_SHR

w_temp   RES    1    ; variable used for context saving

status_temp RES    1    ; variable used for context saving

pclath_temp RES    1    ; variable used for context saving

; example of using Uninitialized Data Section

TEMP_VAR  UDATA      ; explicit address specified is not required

temp_count RES    1    ; temporary variable (example)

CONT2DELAY    RES            1

CONTDELAY     RES            1

```

```

LETRA      RES      1
LLANTA_CUAL RES      1
TEMPORAL   res      1

```

```
,*****ESTE CODIGO ES EL DE LA INTERRUPCIÓN*****
```

```
INTERRUPCION CODE 0X0004
```

```

movwf w_temp      ; save off current W register contents
movf  STATUS,w    ; move status register into W register
movwf status_temp ; save off contents of STATUS register
movf  PCLATH,w    ; move pclath register into w register
movwf pclath_temp ; save off contents of PCLATH register
; isr code can go here or be located as a call subroutine elsewhere
movf  pclath_temp,w ; retrieve copy of PCLATH register
movwf PCLATH      ; restore pre-isr PCLATH register contents
movf  status_temp,w ; retrieve copy of STATUS register
movwf STATUS      ; restore pre-isr STATUS register contents
swapf w_temp,f
swapf w_temp,w    ; restore pre-isr W register contents
RETFIE

```

```
,*****AQUI TERMINA LA INTERRUPCIÓN*****
```

```
,*****Y EMPIEZA EL PROGRAMA PRINCIPAL*****
```

## INICIALIZACION

```
CLRW
```

```
BANKSEL    TRISD
```

```
BSF    TRISD, 0
```

```
BSF    TRISD, 1
```

```
CALL    PREPARA_SERIAL ; se llama a la funcion que prepara el pic para el envío y recepción
serial
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
MOVLW H'28' ; se manda la instrucción de clear al controlador de posición para reiniciar la
posición actual
```

```
BANKSEL    LETRA
```

```
MOVWF LETRA
```

```
CALL    MANDAR
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
call    DELAY
```

```
PRINCIPAL: ; rutina de prueba para avance hacia adelante y posteriormente hacia atrás
```

```
CALL    TODOS_ADELANTE; llamada a funcion para que ambos motores se muevan hacia
adelante
```

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

CALL TODOS\_ATRAS; llamada a funcion para que ambos motores se muevan hacia atrás

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

call DELAY

GOTO PRINCIPAL

DERECHA\_PARA; funcion de reseteo de posición y avance

```
    MOVLW H'9'  
    BANKSEL    LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL    MANDAR
```

RETURN

DERECHA\_ADELANTE; funcion que indica una rotación de la llanta derecha hacia adelante

```
    MOVLW H'21'  
    BANKSEL    LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL    MANDAR  
    MOVLW H'0'  
    BANKSEL    LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL    MANDAR  
    MOVLW D'37'  
    BANKSEL    LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL    MANDAR
```

RETURN

DERECHA\_ATRAS; funcion que indica una rotación de la llanta derecha hacia atrás

```
    MOVLW H'21'  
    BANKSEL      LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL  MANDAR  
    MOVLW H'FF'  
    BANKSEL      LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL  MANDAR  
    MOVLW H'E0'  
    BANKSEL      LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL  MANDAR
```

RETURN

IZQUIERDA\_ADELANTE; funcion que indica una rotación de la llanta izquierda hacia adelante

```
    MOVLW H'22'  
    BANKSEL      LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL  MANDAR  
    MOVLW H'0'  
    BANKSEL      LETRA  
    MOVWF LETRA  
    CALL  MANDAR
```

```
MOVLW D'37'  
BANKSEL     LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR
```

RETURN

IZQUIERDA\_ATRAS; funcion que indica una rotación de la llanta izquierda hacia atrás

```
MOVLW H'22'  
BANKSEL     LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR  
MOVLW H'FF'  
BANKSEL     LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR  
MOVLW H'E0'  
BANKSEL     LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR
```

RETURN

TODOS\_ADELANTE; función que indica una rotación de la ambas llantas hacia adelante

```
MOVLW H'20'  
BANKSEL      LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR  
MOVLW H'0'  
BANKSEL      LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR  
MOVLW D'37'  
BANKSEL      LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR
```

RETURN

TODOS\_ATRAS; función que indica una rotación de la ambas llantas hacia atrás

```
MOVLW H'20'  
BANKSEL      LETRA  
MOVWF LETRA  
CALL  MANDAR  
MOVLW H'FF'  
BANKSEL      LETRA  
MOVWF LETRA
```

```
CALL    MANDAR  
  
MOVLW  H'E0'  
  
BANKSEL    LETRA  
  
MOVWF  LETRA  
  
CALL    MANDAR  
  
RETURN
```

PREPARA\_SERIAL; función que prepara el modulo serial

```
BANKSEL    TXSTA  
  
BCF        TXSTA,SYNC  
  
BSF        TXSTA,BRGH  
  
BANKSEL    RCSTA  
  
BSF        RCSTA,SPEN  
  
BANKSEL    BAUDCTL  
  
BCF        BAUDCTL,BRG16  
  
BANKSEL    SPBRGH  
  
CLRF      SPBRGH  
  
BANKSEL    SPBRG  
  
MOVLW     D'12'  
  
MOVWF     SPBRG  
  
BANKSEL    TXSTA  
  
BSF        TXSTA,TXEN  
  
RETURN
```

MANDAR; función que manda dato de forma serial

```
MOVF      LETRA,W
BANKSEL   TXREG
MOVWF    TXREG
BANKSEL   PIR1
BTFS     PIR1,TXIF
GOTO     $-1
```

RETURN

DELAY

CLRF CONT2DELAY

CICLODEL:

```
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
NOP
```



```
BTFSCL STATUS, 2
GOTO FINFIN
FINDEL:
GOTO CICLODEL
FINFIN:
NOP
RETURN
END
```

## B. Diseño de placa de regulador de voltaje

Figura No. 48 Diseño de circuito regulador

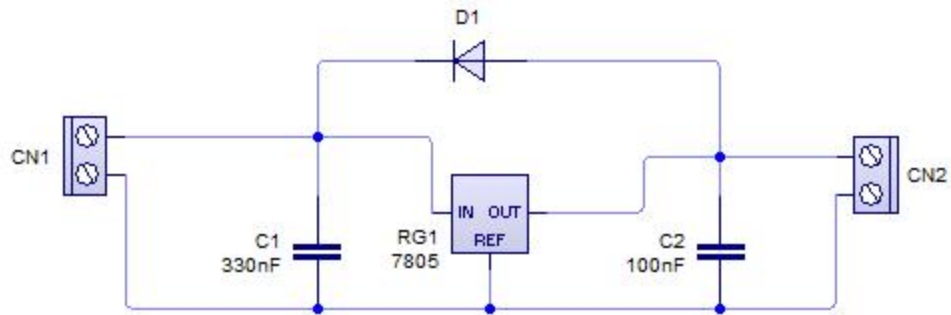
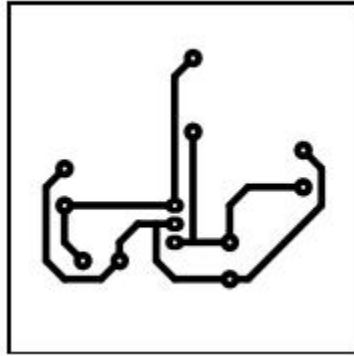


Figura No. 49 Pistas de placa de regulador de voltaje de 5V



### C. Diseño de placa de transceptor

Figura No. 50 Diseño de circuito de transceptor

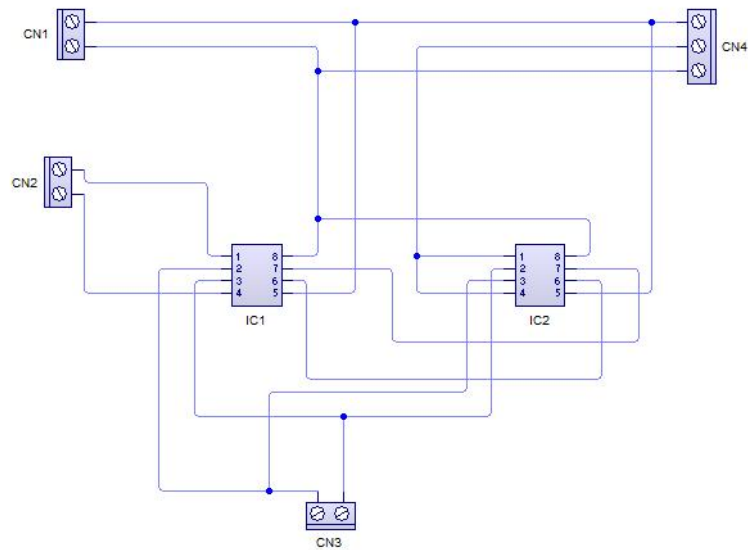


Figura No. 51 Lado 1 de placa de transceptor

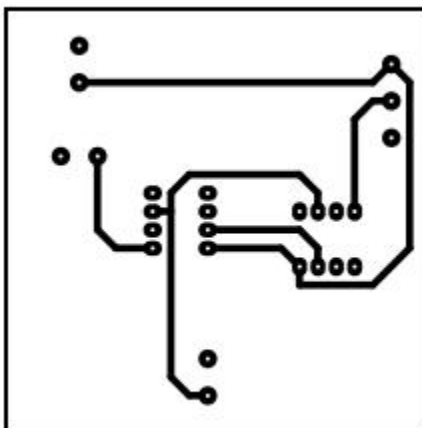


Figura No. 52 Lado 2 de placa de transceptor

