

**OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR QUE
SE UTILIZARÁ EN EL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DE UNA ESFERA
RODANTE**

**MANUEL GUILLERMO QUIJANO ORTEGA
CARLOS GERARDO HERNÁNDEZ CAPACHO**

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2009

**OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR QUE SE
UTILIZARÁ EN EL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DE UNA ESFERA RODANTE**

Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Control e
Instrumentación Industrial

Director del proyecto
MSc. Edgar Barrios Urueña

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA

2009

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Mayo 11 de 2009

DEDICATORIA.

A Dios

A la memoria de mis padres: Ana de Dios y Luis Ramón

Por todo el amor.

A mi gran esposa Luz Marina, mi amor de siempre.

A mis hijos: Andrés Felipe

Y

Ana Gabriela

Por todo su apoyo

MANUEL GUILLERMO QUIJANO ORTEGA

CARLOS GERARDO HERNÁNDEZ CAPACHO

AGRADECIMIENTOS.

Los autores del proyecto expresan sus agradecimientos a la Universidad Pontificia Bolivariana por brindarles oportunidades irrepetibles en la vida con satisfacciones personales y profesionales que son un aliciente que motiva el trabajo diario.

Al Doctor Edgar Barrios, director del proyecto por su formación ejemplar en el conocimiento, la prudencia y en la formación integral.

A los docentes de la Especialización por su aporte técnico y humano en la formación de este proyecto que ha iniciado con la primera cohorte de la Especialización.

Al personal de los laboratorios de electrónica y máquinas eléctricas.

Al estudiante de Ingeniería Electrónica Pedro Plata por acompañar el proceso de desarrollo de este trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. OBJETIVOS.....	13
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3. MARCO TEÓRICO.....	14
3.1 DETERMINACIÓN DE LS PARÁMETROS MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DC.....	16
3.1.1 Determinación de la Constante contraelectromotriz (k_v) para el motor DC.....	16
3.1.2 Determinación de la Resistencia de Armadura (r_a).....	17
3.1.3 Determinación de la Resistencia de Armadura (l_a).....	17
3.1.4 Determinación de la Constante d Torque (k_a).....	18
3.1.5 Determinación de la Constante de Tiempo Mecánica T_M	20
3.1.6. Determinación del Momento de Inercia (J_m).....	22
3.1.7. Obtención del Torque de Fricción y la Corriente de Arranque Del Motor DC.....	23
3.1.8. Determinación de la Constante de Fricción de Coulomb (B)	
3.2 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSPARENCIA PARA EL MOTOR DC Y EL LUGAR DE LAS RAÍCES.....	28
4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE VEHÍCULOS ESFÉRICOS.....	33
5. SISTEMA DEL VEHÍCULO ESFÉRICO DESARROLLADO....	37
5.1. Modelo Físico del Vehículo.....	37
5.2. Circuito Electrónico.....	41
5.3. Estrategia de Control.....	42
CONCLUSIONES.....	44
RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47

RESUMEN

TITULO: OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PARÁMETROS DEL MOTOR QUE SE UTILIZARÁ EN EL SISTEMA DE LOCOMOCIÓN DE UNA ESFERA RODANTE

AUTORES: Manuel Guillermo Quijano Ortega
Carlos Gerardo Hernández Capacho

FACULTAD: Especialización en Control e Instrumentación.

DIRECTOR: Edgar Barrios Urueña

El proyecto consiste en la obtención en forma experimental de los parámetros de un motor de corriente continua, que son: La resistencia de armadura, constante de la inductancia de armadura y de la constante de tiempo eléctrica, determinación del momento de inercia, obtención de la constante de voltaje, determinación de la constante de torque, determinación de la constante de tiempo mecánica, obtención de la corriente de arranque.

Con los anteriores valores de las constantes se obtiene el modelo matemático del motor eléctrico de corriente continua que se utilizará en el diseño del sistema de locomoción una esfera rodante. Una esfera rodante es un robot tipo esférico sobre este tema existen estudios muy recientes y se basan todos ellos en la facilidad que posee una esfera para poderse desplazar.

Algunos centros de investigación están apuntando esfuerzos hacia este tipo de vehículos esféricos aprovechando su bajo consumo de energía para su locomoción, sin embargo no tienen en este momento un producto final que muestre resultado palpables de sus esfuerzos, solo los avances que periódicamente publican en sus sitios web como divulgación de sus proyectos.

PALABRAS CLAVES: Servomotor, Características, Sistemas de control, esfera, robot.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

ABSTRACT

TITLE: PROCUREMENT OF EXPERIMENTAL PARAMETERS OF MOTOR TO BE USED IN THE SYSTEM OF A SPHERE ROLLING LOCOMOTION

AUTHORS: Manuel Guillermo Quijano Ortega
Carlos Gerardo Hernández Capacho

FACULTY: Especialización en Control e Instrumentación.

DIRECTOR: Edgar Barrios Urueña

The project consists of obtaining a pilot in the parameters of a DC motor, which are: the armature resistance, inductance of the armature and the electrical time constant, determining the moment of inertia, obtaining the constant voltage, for determining the torque constant, determining the mechanical time constant, obtaining the starting current.

With the above values of the constants is obtained by the mathematical model of the electric motor current to be used in the system design of a field treadmill locomotion. One area is a rolling ball type robot studies exist on this very recent and are based right in the facility has an area for possible move.

Some research efforts are targeting these vehicles spherical exploiting their low power consumption for locomotion, but not at this time have an end product to show tangible results of their efforts, only the progress regularly published on their sites as disclosure of its web projects.

KEYWORDS: Servomotor, Characteristics, Control Systems, sphere, robot.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia y a la amplia aplicación que tienen los motores eléctricos en los procesos industriales, en la robótica, es importante conocer sus usos y aplicaciones.

Para el diseño del sistema de locomoción de una esfera rodante se han obtenido los parámetros de un motor de corriente continua, utilizando técnicas experimentales.

Las técnicas utilizadas, han sido propuestas, en su gran mayoría, por el ingeniero Ricardo Gálvez Sánchez docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, hasta el año 2008, e implementadas durante el transcurso del laboratorio de sistemas de control I. Las pruebas que se han implementado han sido las siguientes:

Determinación de la resistencia de armadura R_a .

Determinación de la constante de la inductancia de armadura (L_a) y de la constante de tiempo eléctrica (t_e) de los motores DC.

Determinación del momento de inercia (J).

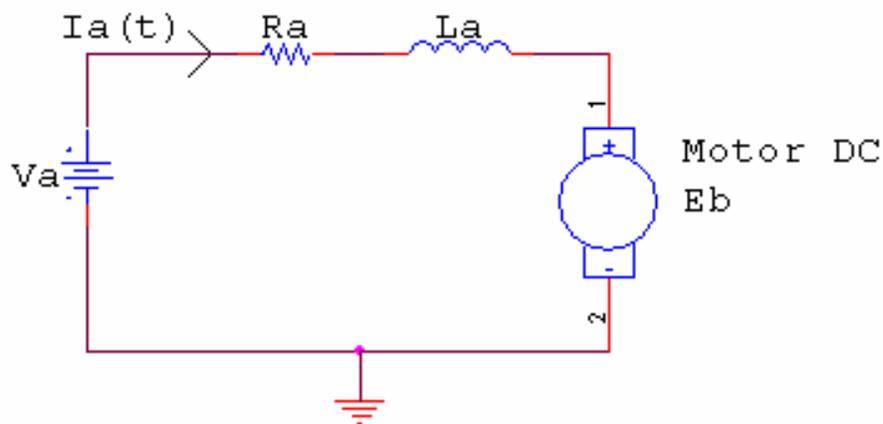
Obtención de la constante de voltaje (K_e) para servomotores CC.

Determinación de la constante de torque (K_t) de los servomotores CC.

Determinación de la constante de tiempo mecánica (t_m) de los servomotores.

Obtención de la corriente de arranque y del torque de fricción en los servomotores de CC.

El tipo de motor a utilizar será de corriente continua, la representación ideal del motor corriente continua de imán permanente se observa en la figura 1.



Fuente: Sistemas Automáticos de control. Benjamín Kuo.

Figura 1. Circuito ideal motor corriente continua imán permanente.

- Eb Fuerza contraelectromotriz de un motor CC (Corriente continua).
- La Inductancia de armadura del motor (Henrios)
- Va Voltaje de entrada al motor (voltios)
- Ra Resistencia de armadura (ohmios)
- la Corriente de armadura (amperios / amperes)

Aplicando la ley de tensiones de Kirchoff (Vea Figura 1):

$$V_a = E_b + (I_a \times R_a) \text{ ó } E_b = V_a - (I_a \times R_a) \quad (1)$$

En la última ecuación se observa que cuando sube el valor de I_a , disminuye el Valor de E_b . La FCEM es proporcional a la velocidad del motor y a la intensidad del campo magnético. Como el motor tiene rotor con imán permanente la constante de FCEM del motor está dada por:

$$K = E_b / N_d. \quad (2)$$

Donde:

rpm = revoluciones por minuto.

K = constante de FCEM del motor y se expresa en Voltios / rpm.

N_d = Velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto o rpm.

Para proceder al análisis o al diseño del sistema de control del motor de corriente continua de imán permanente, es necesario conocer la función de transferencia, lo que se conoce como modelado matemático de la planta. Para determinar la función de transferencia se requiere hallar las constantes del motor.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Obtener experimentalmente el modelo matemático del motor eléctrico que se utilizará en el sistema de locomoción de una esfera rodante.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Obtener experimentalmente los parámetros del motor eléctrico de corriente continua utilizado como actuador para el desplazamiento de la esfera.

Obtener la función de transferencia del motor.

Diseñar el circuito electrónico de control y potencia para el motor eléctrico de corriente continua para implementarlo en un prototipo de una esfera rodante.

3. MARCO TEÓRICO

En los últimos años, el estudio sobre la movilidad de los cuerpos ha aumentado significativamente. Especialmente, los autómatas esféricos donde los investigadores han puesto mayor atención, debido a su mejor capacidad de movimiento, como la de no caer, mayor velocidad de desplazamiento, cambiar de dirección con facilidad [1].

Pensando en la forma de realizar una aplicación con esferas rodantes en la universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, se ha optado por iniciar con el estado del arte y en construir un primer prototipo, a escala, de lo que será un módulo más robusto que se implementará en un próximo trabajo.

Para la realización de este proyecto se encontraron grandes limitantes que se tiene en el país y es acerca de la difícil consecución de motores de corriente continua, que se pueda utilizar en una aplicación de estas características. Para este primer prototipo se utilizarán servomotores Futaba referencia FP-S3000, este tipo de servomotores es ampliamente conocido por los autores del proyecto y han funcionado en una gran variedad de aplicaciones de robótica y aeromodelismo.

El servomotor original se ha modificado un poco en sus estructura física, primero se le ha retirado la tarjeta de control ya que es propósito del presente proyecto diseñarle su propio sistema de control. Otra modificación realizada consistió en retirarle el tope físico al potenciómetro de realimentación, esto con el fin de permitirle al motor realizar un giro continuo.

Las anteriores modificaciones permiten que el servomotor utilizado sea simplemente un motor DC y de esta forma ya se puede aplicar el tratamiento empleado en la determinación de sus parámetros eléctricos y mecánicos. Por lo tanto de ahora en adelante se hablará de motor DC ó motor CC.

Las características básicas de este servomotor, dadas por el fabricante son las siguientes:

Velocidad: 0.23 s/60°

Torque: 44.4 oz-in (3.2 Kg-cm)

Tamaño: 40.4 x 19.8 x 36 mm

Peso: 37.2 g.



Fuente: Futaba corporation.

Figura 2. Fotografía de un servomotor futaba FP-S3003.

3.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA DC.

Después de haber realizado los cambios mencionados y de tener solo el motor DC, se procede a realizar las pruebas técnicas que permiten la obtención de los parámetros del motor DC.

3.1.1 Determinación de la constante contraelectromotriz (k_e) para el motor DC.

En un motor DC cuando se encuentra en rotación, aparece en el inducido una tensión proporcional al producto del flujo por la velocidad angular. Si el flujo es constante, como es nuestro caso la tensión inducida E_b es directamente proporcional a la velocidad angular.

$$K_e = \frac{E_b}{n} = \frac{V}{\omega} \quad (1)$$

Donde:

$E_b = V$ = Fuerza contraelectromotriz (Voltios)

n = Velocidad en (rpm)

ω = Velocidad en (rad/s)

Tabla 1. Relación de voltaje versus velocidad del motor DC.

Vin(Volts)	E_b (Volts)	ω (rad/s)	n(rpm)
2	1,33	14,99	142,95
3	2,38	26,44	253
4	3,42	38,11	364,13

5	4,51	49,99	477,46
---	------	-------	--------

$$K_e (V/rpm) = \frac{E_b}{n} = \frac{V}{\omega}$$

$$K_e = 0.0879$$

3.1.2 Determinación de la Resistencia de Armadura (r_a)

Para la determinación de la resistencia de armadura (R_a), se utilizan dos métodos. El primer método: se obtiene midiendo la resistencia con un multímetro en los devanados de la armadura del motor (esto es en los cables rojo y negro)

Para el método experimental dos: Se ajusta un valor de voltaje mínimo para la alimentación del Motor DC, de tal manera que se mida la corriente de armadura junto antes de comenzar el movimiento del eje del motor, con este valor y por medio de un amperímetro podemos obtener la corriente y aplicando la ley de Ohm se calcula la resistencia de armadura (R_a). En este instante el voltaje contraelectromotriz E_b es cero ya que no hay rotación en el eje.

Por cualquiera de los dos métodos se obtiene el mismo valor de resistencia del servomotor.

$$R_a = 8.3 \Omega$$

3.1.3 Determinación Inductancia de Armadura (L_a)

La inductancia de armadura (L_a) al igual que la resistencia de armadura se medida en los devanados del motor (en los cables rojo y negro), utilizando un instrumento que sirve para medir inductancias llamado LCR meter.

La=1.51 mH

2. Con el conocimiento previo de la resistencia de armadura R_a y la inductancia de armadura (L_a) se puede proceder a calcular la constante de tiempo eléctrica (t_e).

$$L_a = t_e \times R_a \quad (5)$$

$$t_e = \frac{L_a}{R_a}$$

$$t_e = 1.51\text{mH} / 8.38\Omega$$

$t_e = 18.02 \text{ mS}$.

3.1.4 determinación de la constante de torque (K_t)

Mediante una técnica de procedimiento teórico hallar la constante de Torque K_t para motores DC.

La energía entrega por el motor en su eje de rotación es expresada a través de su par electromagnético T_m el cual es proporcional al producto de la corriente de inducido la por el flujo ϕ en el entrehierro, que a su vez es proporcional a la corriente de campo I_f . Pudiéndose entonces escribir:

$$T_m = K_f \cdot I_f \cdot K_i \cdot I_a \quad (6)$$

Cuando el motor posee imanes permanentes entonces se puede asumir que todos los parámetros: $K_f \cdot I_f \cdot K_i \cdot I_a$ se pueden reunir en una sola constante K_t .

Por tanto la anterior expresión queda solamente así:

$$T_m = K_t \cdot I_a \quad (7)$$

Que indica la relación directa del par con la corriente de inducido, siendo la constante K_t de origen experimental.

La constante par de par K_t y la constante de la fuerza contraelectromotriz K_e son dos parámetros separados, para un motor dado, sus valores están estrechamente relacionados.

Se utiliza la técnica llamada paramétrico dimensional que no recurre a la prueba experimental, pero se reconoce como útil y confiable para los motores DC, se basa en utilizar expresiones que guardan una relación paramétrica dimensional directa entre (K_t) con la constante de voltaje (K_e) y cuya comprobación empírica ha sido sustentada.

Dichas relaciones paramétricas son:

$$K_t \text{ (Nm / A)} = K_e \text{ (V / rad s)} \quad (8)$$

$$K_t \text{ (Nm / A)} = 9.5493 \times 10^{-3} K_e \text{ (V / Krpm)} \quad (9)$$

$$K_t \text{ (oz-in / A)} = 1.3524 K_e \text{ (V / Krpm)} \quad (10)$$

Donde:

Nm = Newton-Metro

V = voltios

A = Amperios

rad = radianes

Oz-in = Onza – pulgada

Krpm = Kilo revoluciones por minuto.

Aplicando la técnica paramétrico dimensional de la (ecuación 8), se halla el valor de la constante de torque.

$$K_t = 0.0879 \frac{Nm}{A}$$

3.1.5 Determinación de la constante de tiempo mecánica (tm)

Así como con la corriente de armadura de un motor de corriente continua se encuentra asociada una respuesta transitoria y con ella una constante de tiempo, igualmente otro parámetro activo como la velocidad responden con similares características ante la excitación de voltaje de armadura.

El modelo matemático de un motor de corriente continua presenta la relación directa entre la tensión de armadura y la velocidad en el eje, que experimentalmente se observa, al aplicarse un escalón de voltaje en terminales haciendo generar en principio una característica transitoria de velocidad, seguida de una respuesta de régimen estable para condiciones de carga fija, se involucra por tanto, con esta característica una constante de tiempo, conocida como constante de tiempo mecánica.

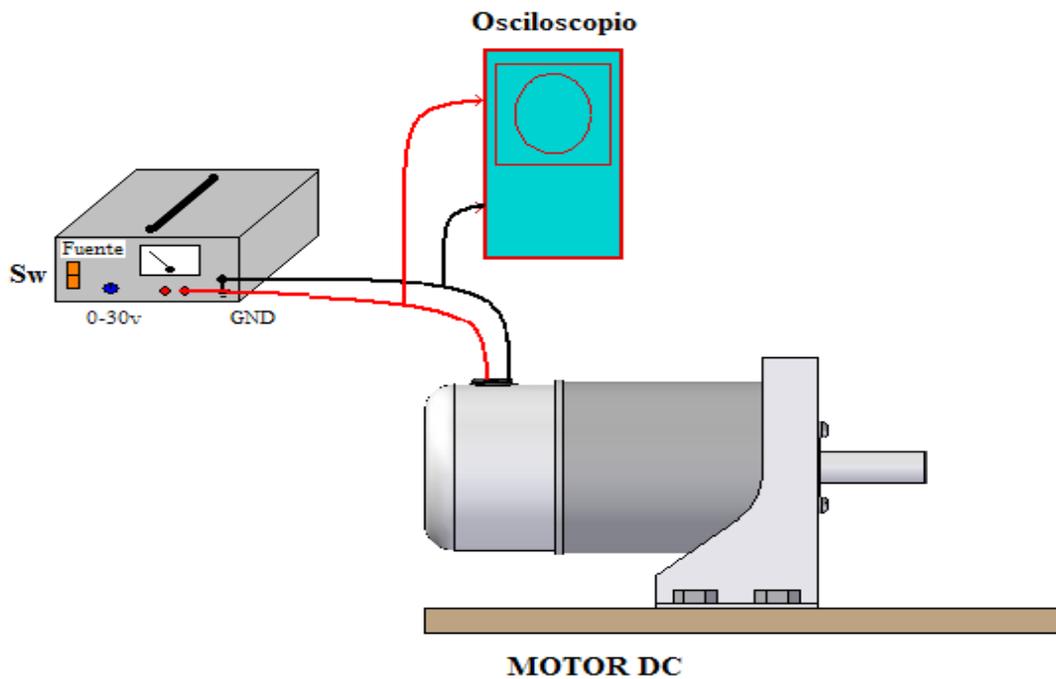
En en caso específico del motor futaba se ajusta el voltaje nominal del motor, es decir, 5 voltios.

Se conecta la sonda del osciloscopio al borne rojo y el cable de tierra al borne negro.

Se efectúan los ajustes requeridos en el osciloscopio para la captura, congelación y exhibición de la respuesta transitoria de voltaje del Motor.

Al aplicar un voltaje tipo escalón a la armadura del Motor, el osciloscopio construirá la característica equivalente de velocidad.

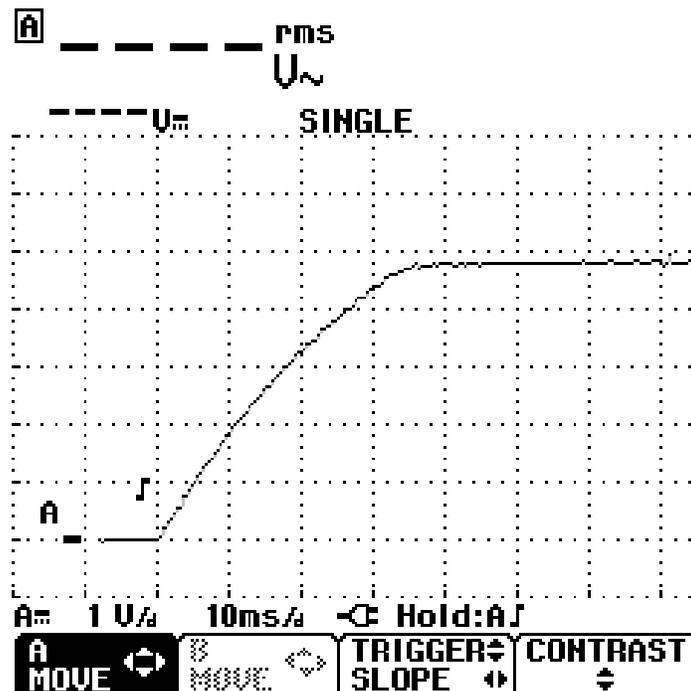
En la gráfica obtenida (Figura 4), se mide el tiempo requerido para que la señal de salida alcance el 63.2% de su valor final, dicho tiempo corresponderá a la constante de tiempo mecánica (t_m).



Fuente: Autores del texto

Figura 3. Determinación de la constante de tiempo mecánica.

En la Figura 4 se muestra la señal medida con el osciloscopio digital correspondiente a la respuesta del sistema a una entrada paso unitario.



Fuente: Autores del texto

Figura 4. Respuesta a entrada escalón utilizando el montaje de la Figura 5.

En la Figura 4 se ubica el valor de voltaje del 63.2% equivalente a (3.16V), y se proyecta la línea que corte la gráfica, en este punto se ubica el tiempo mecánico:

$$t_m(s)=19.5 \text{ mS.}$$

3.1.6 Determinación del momento de inercia (J_m)

Se utiliza un método paramétrico ya que apela al conocimiento de los parámetros ya obtenidos o conocidos experimentalmente tales como: Resistencia de armadura (R_a), constante de torque (K_t), y constante de voltaje (K_e), constante de tiempo mecánica (t_m) así por su relación dimensional existente entre ellas se puede calcular el momento de inercia (J_m) mediante la expresión:

$$t_m (s) = \frac{J_m \times R_a}{K_t \times K_e} = \frac{(Kg - m^2, Ohmios)}{(Nm / A, V / rad - s)} \quad (16)$$

$$J_m = \frac{(tm)(K_t)(K_e)}{R_a} \quad (17)$$

$$J_m = \frac{(19.5ms)(0.0879Nm / A \times 0.0879V / rad - seg)}{(8.3hmios)}$$

$$J_m = 8,077 \times 10^{-8} \text{ Kg-m}^2$$

Es posible calcular momentos de inercia de los cuerpos homogéneos que tengan formas geométricas simples. La técnica del péndulo de torsión, se basa en la característica física de los cuerpos con diferentes formas geométricas y de distribución de masas regulares, esta es una técnica experimental que no se consideró necesaria utilizar en esta prueba.

3.1.7 Obtención del torque de fricción y la corriente de arranque del motor DC

Mediante una fuente DC variable, se incrementa el valor de la tensión gradualmente, observando atentamente el momento en que el eje del motor inicia su movimiento, cuando ello ocurre, se suspende este proceso y se toma la lectura del amperímetro correspondiente. Este será el valor de la corriente de arranque. El torque de fricción es igual a la constante de torque por la corriente de arranque.

T_f= Torque de fricción.

K_t= Constante de torque.

I_{arr} =Corriente arranque.

$$T_f = K_t \times I_{arr} \quad (18)$$

$$T_f = K_t \times I_{arr} = (0.0879 \text{ Nm/A})(94.46 \text{ mA}) = 8.30 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

$$T_f = 8.30 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

La fricción estática es una pérdida originada por una oposición al desarrollo de la dinámica inicial del movimiento o freno inicial que se presentan en las superficies de contacto.

En un motor se manifiesta la corriente de arranque cuando la corriente de armadura inicial es insuficiente para superar el torque causado por dicha fricción, que si al ir incrementándose la corriente en su valor, en un momento dado, se supera el torque de fricción, se iniciará la rotación del eje. Esta corriente mínima se denomina corriente de arranque.

3.1.8 Determinación de la constante de fricción de coulomb (**B**)

La constante **B** se determina cuando el sistema se encuentra en estado estable, es decir, el Motor alcanza una velocidad constante, en este instante se tiene que para una velocidad constante la derivada es la aceleración, para este caso es cero, entonces, aplicando la fórmula para el torque mecánico se obtiene :

ω = Velocidad

$\dot{\omega}$ = Aceleración

T_m = Torque mecánico

B=Constante fricción de coulomb

$$T_m = K_t \times I_a = J \dot{\omega} + B \omega + T_f \quad (20)$$

Para estado estable $\dot{\omega} = 0$

$$T_m = K_t \times I_a = B \omega + T_f \quad (21)$$

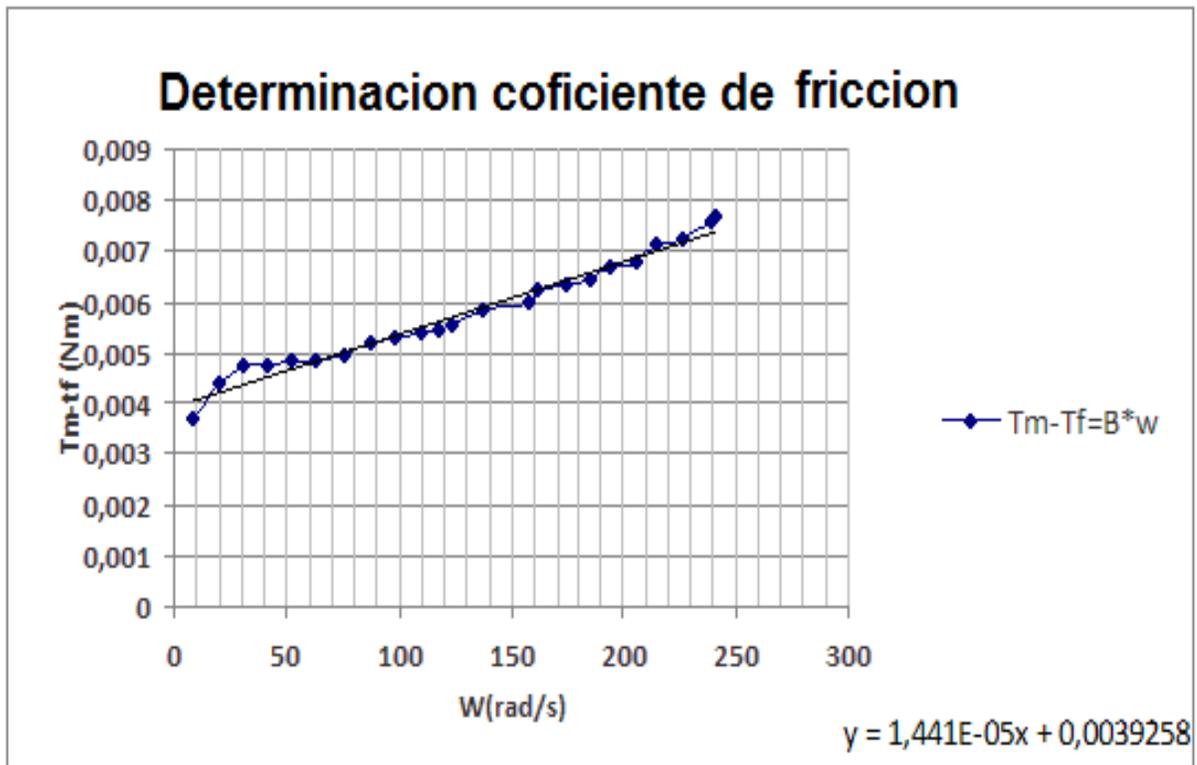
Tabla 2 .Valores experimentales.

Vin(V)	Corriente (I _a)	T _m =K _t ×I _a	T _m -T _f =B* ω	ω (rad/s)
2	0,136	0,0119544	0,0037044	8,55559677
3	0,144	0,0126576	0,0044076	20,1375919
4	0,148	0,0130092	0,0047592	31,3111803
5	0,148	0,0130092	0,0047592	41,783147

Fuente: Autores del texto

La Figura 5. Muestra relación existente entre Torque de fricción (T_f) y el Torque motor (T_m) versus Velocidad (ω).

Se obtiene la gráfica para el torque mecánico contra velocidad, utilizando el método de regresión lineal se determina la ecuación de la recta, la pendiente de esta grafica dará el valor de la constante de fricción B.



Fuente: Autores del texto.

Figura 5. Determinación de la constante fricción coulomb.

De acuerdo a la Figura 5 la pendiente para la gráfica es: 1.441×10^{-5} .

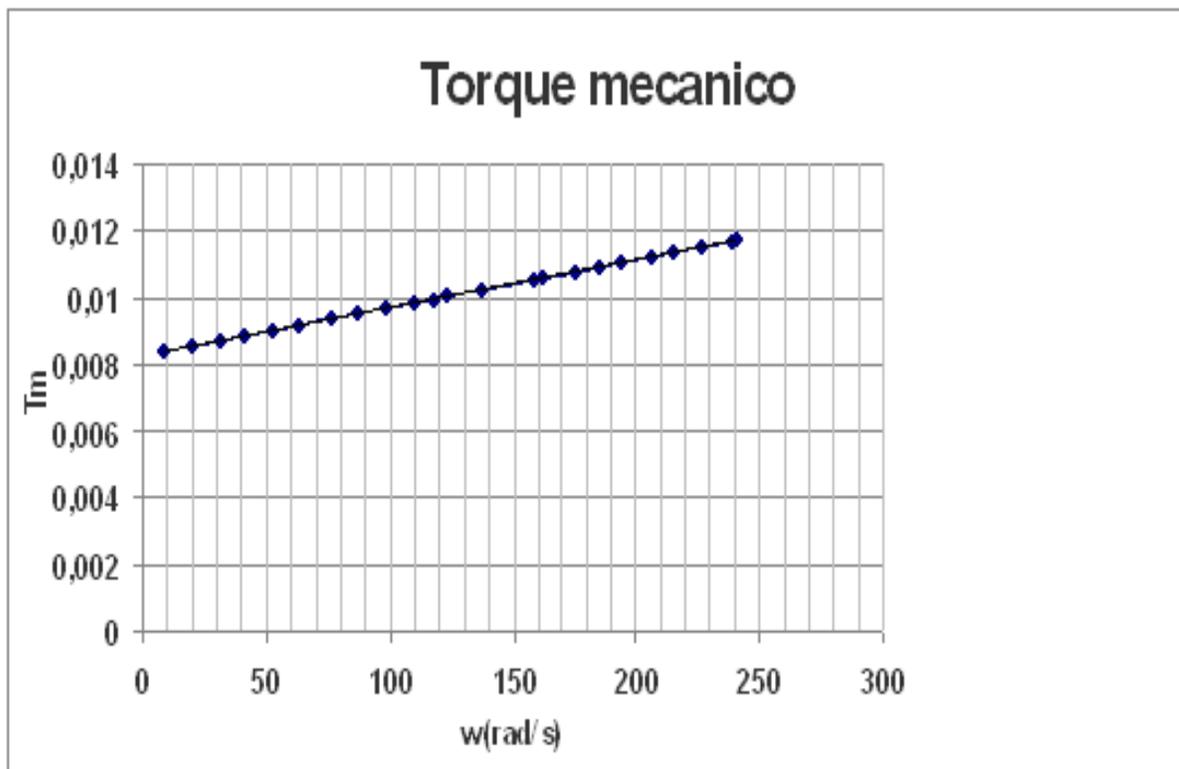
El valor de la constante de fricción de Coulomb es: $B = 1.441 \times 10^{-5} \text{ NmS}$

Tabla 3. Valores experimentales de velocidad y torque motor.

ω (rad/s)	$T_m = B\omega + T_f$
8,5559677	0,00837329
20,1375919	0,00854018
31,3111803	0,00870119
41,783147	0,0088521
52,9881513	0,00901356

Graficando la ecuación general:

$$T_m = K_t \times I_a = B\omega + T_f$$



Fuente: Autores del texto.

Figura 6. Gráfica del torque mecánico.

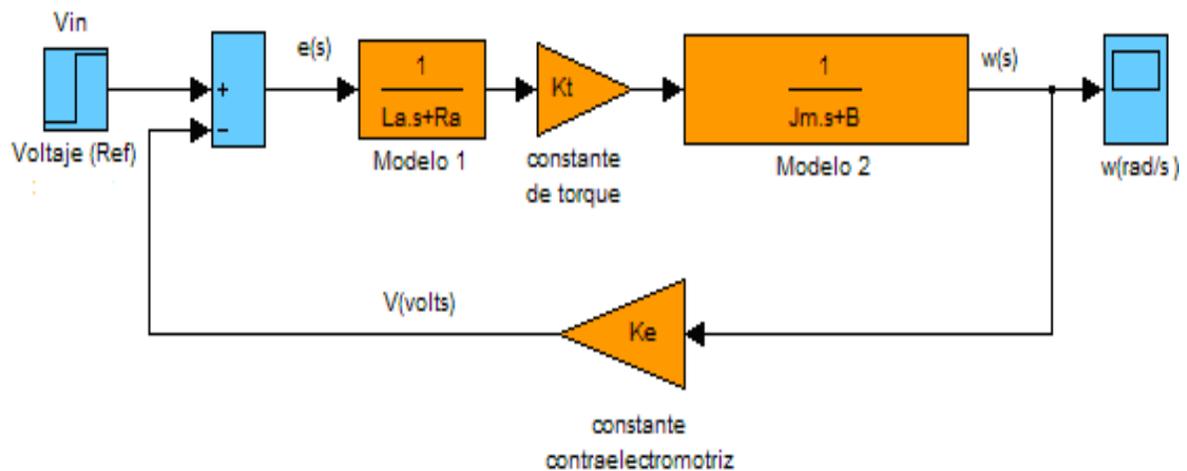
La precisión en la determinación de la fricción de coulomb depende de la exactitud del tacómetro y del amperímetro utilizado.

3.2 OBTENCIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA PARA EL MOTOR DC Y EL LUGAR DE LAS RAÍCES

Habiendo hallado todos los parámetros correspondientes al motor Futaba de referencia: **FP-S3000**, se procede a reemplazar estos parámetros en el diagrama de bloques de la Figura 7.

Lo que se pretende es representar la función de transferencia de segundo orden para el motor DC, al igual que el lugar geométrico de las raíces.

En la Figura 7 se representa el diagrama de bloques para el motor de corriente continua.



Fuente: Autores del texto

Figura 7 Diagrama de bloques del motor DC.

Donde:

ω = Es la velocidad en (rad/s)

V = Voltaje de entrada (Voltios)

K_e = Constante contraelectromotriz

R_a = Resistencia armadura

L_a = Inductancia de armadura

J_m = Momento de inercia

K_t = Constante de torque

B = Constante de fricción

t_m = Constante tiempo mecánica

t_f = Torqué de fricción

En la Tabla 4 se muestran los valores de las constantes experimentales para el motor DC Futaba, referencia **FP-S3000**.

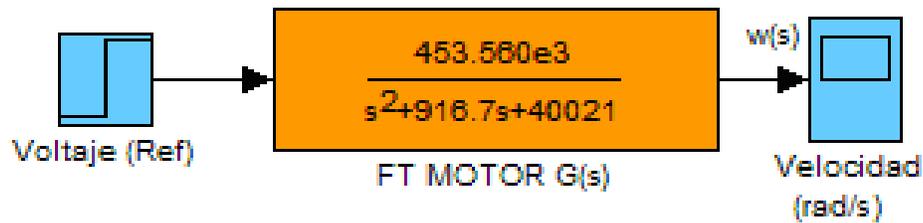
Tabla 4. Constantes obtenidas de forma experimental.

Ke	Ra	La	Jm	Kt	tm	Tf	B
0.0879 (V/rad s)	8.3Ω	1.51mH	8,077e- 5 (Kg- m ²)	0.0879 (Nm/A)	19.5 (mS)	0.0083 (Nm)	1.441e- 5 (Nms)

Simplificando el sistema:

$$\frac{\omega}{V} = \frac{\frac{K_t}{(L_a s + R_a)(J_m s + B)}}{1 + \frac{K_t \cdot K_e}{(L_a s + R_a)(J_m s + B)}} = \frac{\frac{K_t}{(L_a s + R_a)(J_m s + B)}}{\frac{(L_a s + R_a)(J_m s + B) + K_t \cdot K_e}{(L_a s + R_a)(J_m s + B)}}$$

$$\frac{\omega}{V} = \frac{K_t}{(Ls + Ra)(Jms + B) + K_t \cdot K_e} \quad (22)$$



Fuente: Autores del Proyecto

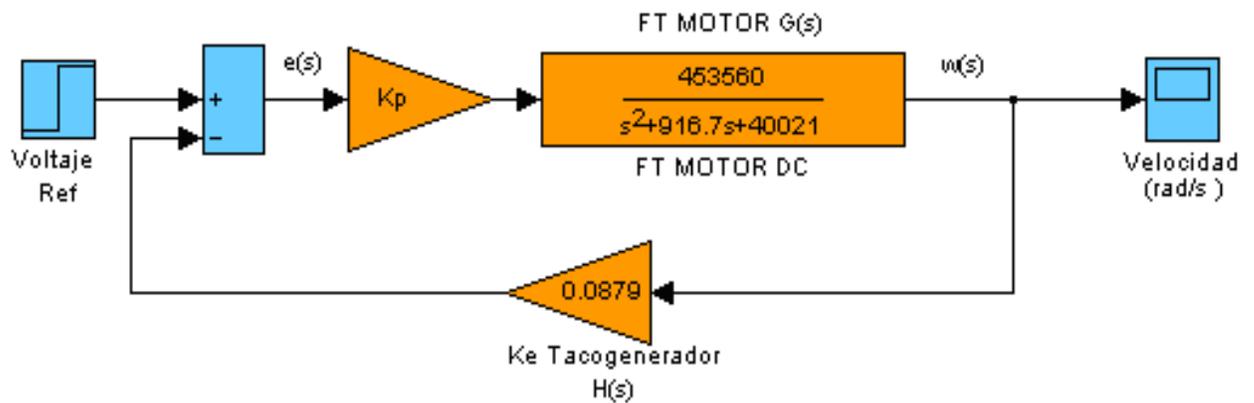
Figura 8. Función de transferencia obtenida.

2. Obtener el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado, especificando la función de transferencia del Motor como $G(s)$ y la ganancia de realimentación del tacogenerador $H(s)$. Utilice la siguiente expresión:

$$V = K_e \left(\frac{V}{rpm} \right) \omega$$

Ganancia del tacómetro:

$H(s) = 0.0879$, es la misma constante contraelectromotriz del motor, ya es el tacogenerador es un motor de las mismas características.

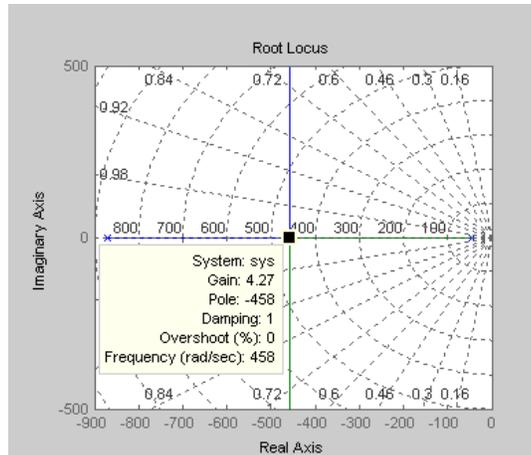


Fuente: Autores del Proyecto

Figura 9. Función de transferencia lazo cerrado.

Tabla 5. Programa en Matlab para determinar el lugar de las raíces.

funcion rlocusreal
H=0.0879%constante tacogenerador
k=1
num=(453.560e3)*k% numerador de la función de transferencia del motor DC
den=[1 916.7 40021]]%denominador ft motor DC
G=tf(num,den)%convierte a tiempo continuo
sys=G*H%G(s)H(s)
figure(1)
rlocus(sys)%dibuja el lugar geométrico de las raíces
Grid



Fuente: Autores del Proyecto

Figura 10. Lugar geométrico de las raíces del sistema.

El polo dominante representa la constante de tiempo mecánica que es la que predomina en el sistema y el polo más alejado del origen representa la constante de tiempo eléctrica.

Los polos del sistema son:

$$S_1 = -46$$

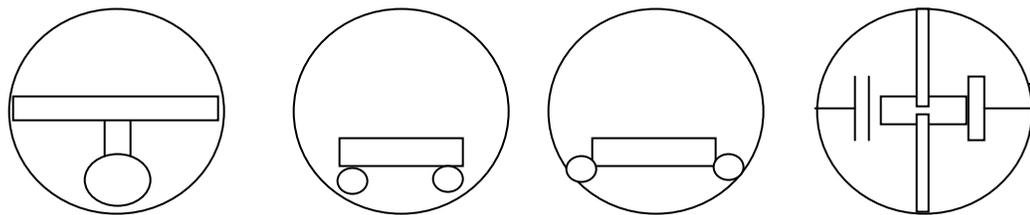
$$S_2 = -871$$

$$t_m = \frac{1}{46} = 21.7ms$$

$$t_e = \frac{1}{871} = 1.14ms$$

4. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE SOBRE VEHÍCULOS ESFÉRICOS

Ha sido amplio el estudio reciente de los sistemas non-holonomic, que fundamentalmente quieren decir que las ecuaciones resultantes de su análisis dinámico no son integrables, estas ecuaciones son basados en la conservación del momento de inercia. Halme [1] hizo una de estas propuestas y son muchos los sistemas de locomoción, dentro de los que se pueden ilustrar a continuación [2]



Péndulo

unidireccional

Omnidireccional

Bhattacharya y Agrawal

Fuente: Autores del texto basados en Bhattacharya y Agrawal [2]

Figura 11: Tipos de Vehículos esféricos

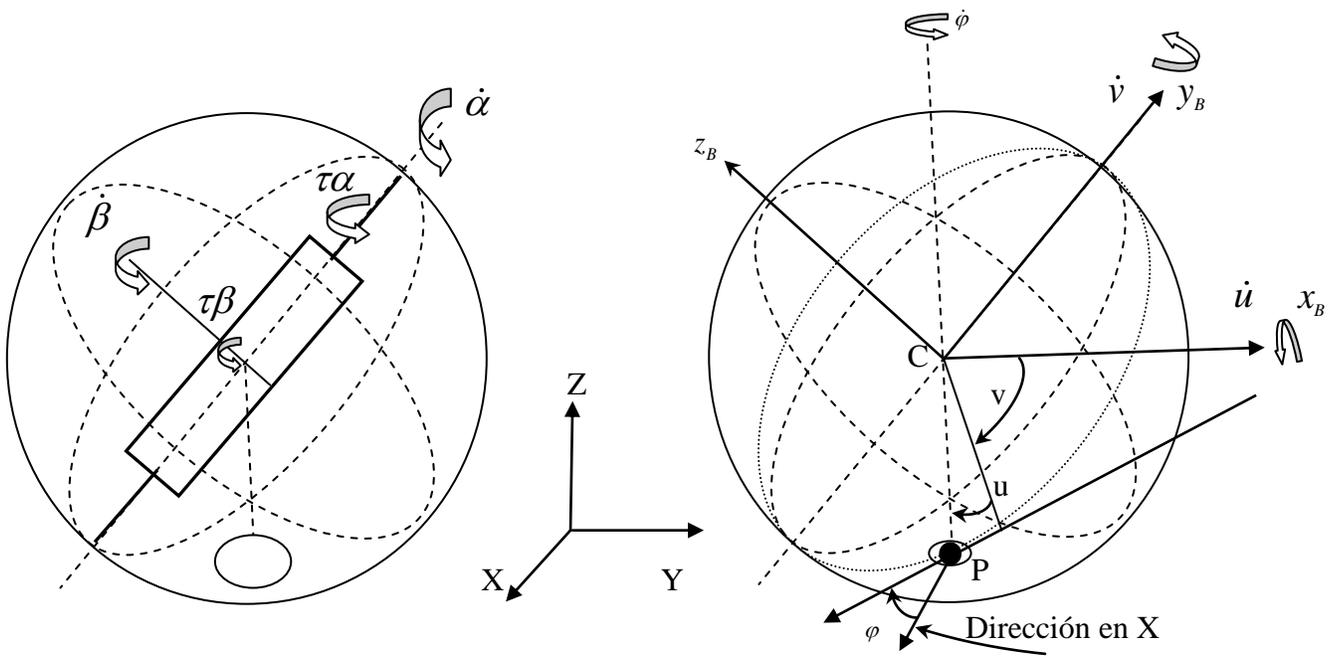
En la Figura 1 se pueden apreciar los vehículos propuestos por diferentes autores, el modelo del péndulo es uno de los más difíciles de controlar debido a su naturaleza física y dinámica la cual originalmente se proponía para un desplazamiento unidireccional, la esfera propiamente unidireccional permitiría un desplazamiento gracias al vehículo que se encuentra dentro, sin embargo, las limitaciones están dadas por en el campo de acción del desplazamiento. Las dos anteriores propuestas serían suplidas por el diseño con un vehículo dentro con desplazamiento omnidireccional lo cual se vería también reflejado en el desplazamiento de la esfera. Brattacharya y Agrawal propusieron un diseño

mucho más estable para el desplazamiento y el control del motor el cual incluyó el modelo dinámico, validación e implementación del prototipo. En el 2000 estos autores aplicaron para la patente del vehículo esférico la cual le fue concedida en Julio del 2002 bajo el número 6414457 aplicando como miembros de la Universidad de Delaware [6].

Un sistema esférico como vehículo propuesto y modelado matemáticamente como alternativa para un desplazamiento omnidireccional fue propuesto por Javadi y Mojabi [3] en el 2002 para lo cual se requería unos sistemas mecánicos internos de propulsión difíciles de implementar.

En el 2006 Seeman [4] presentó la implementación, que no incluyó modelamiento matemático, de un sistema de seguridad basado en un vehículo esférico dentro del cual se encontraban cámaras de vigilancia. Se aprovecha las ventajas que se tienen con este tipo de vehículos para exponerlos a ambiente hostiles para el hombre. Estas cámaras y el desplazamiento del mismo eran controlados remotamente.

En el 2008 Jia [5] publicó un gran número de artículos científicos proponiendo unos modelos matemáticos que regían el comportamiento dinámico del vehículo esférico. Estos artículos publicados fueron el resultado de trabajos desarrollados en la Beijing University of Posts and Telecommunications de China. El trabajo desarrollado fue validado con software de simulación e implementado en un pequeño prototipo de dimensiones similares al desarrollado en el presente trabajo de grado.



Fuente: Autores del texto basado en Jia [5]

Figura 12: Modelo de coordenadas del vehículo esférico

Las siguientes ecuaciones planteadas por Jia [5] describen la cinemática tomando siempre el centro de masa en C como se ilustra en la figura anterior, R el radio de la esfera, P el punto de contacto S seno y C coseno.

$$\dot{X}_C = R(\dot{u}S\varphi + \dot{v}C\varphi Cu)$$

$$\dot{Y}_C = R(\dot{u}C\varphi - \dot{v}S\varphi Cu)$$

$$\dot{Z}_C = 0 \rightarrow Z_C \in R$$

Posteriormente estos mismos autores publicaron artículos referentes al control implementado al prototipo inicial, que les garantizaba un desplazamiento adecuado, ya que los motores necesitarán un control permanente.

Se han mostrado aplicaciones que garantizan el desplazamiento de este tipo de vehículos sobre la nieve con unos desempeños adecuados, lo cual corrobora la versatilidad de este mecanismo.

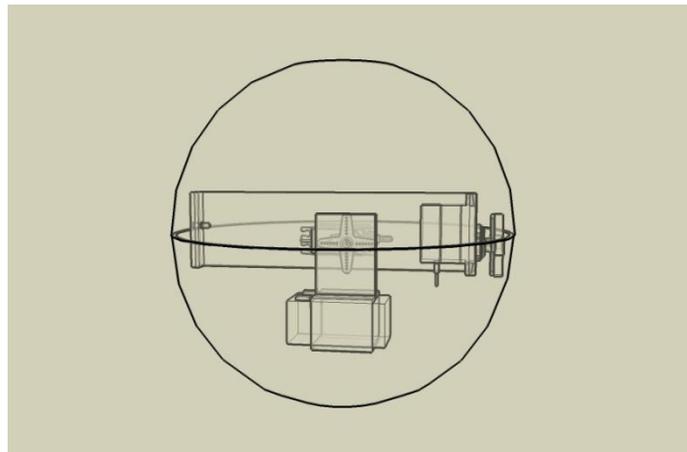
También la Agencia Norteamericana Aeroespacial NASA junto con algunos centros de investigación están apuntando esfuerzos hacia este tipo de vehículos esféricos aprovechando su bajo consumo de energía para su locomoción, sin embargo no tienen en este momento un producto final que muestre resultado palpables de sus esfuerzo, solo los avances que periódicamente publican en sus sitios web como divulgación de sus proyectos.

5. SISTEMA DEL VEHÍCULO ESFÉRICO DESARROLLADO

Para implementar lo planteado en el presente proyecto se desarrolló un prototipo el cual solo pretende mostrar la viabilidad de desarrollo de esta clase de sistemas novedosos en nuestro medio. Este prototipo sirvió para implementar algoritmos de control en los cuales se hacía un arranque suave de motor de tracción ya que según las pruebas mostradas previamente, estos son motores rápidos que necesitan este tipo de control para lograr una movilidad adecuada.

5.1 MODELO FÍSICO DEL VEHÍCULO

Se tomó el modelo del vehículo esférico propuesto inicialmente por Halme [10] como se muestra en la figura 13, el cual fue desarrollado dentro de una esfera de 25 centímetros.

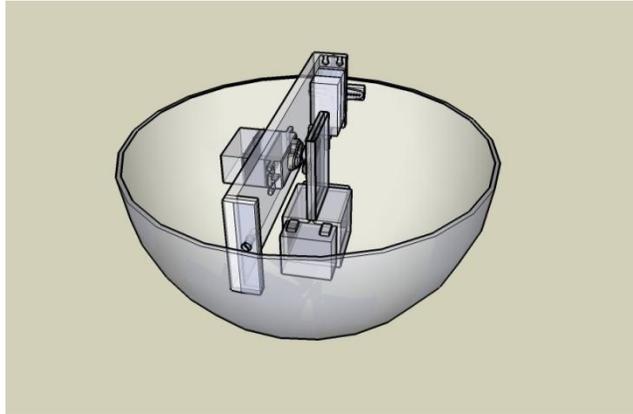


Fuente: Autores del texto

Figura 13. Modelo de Vehículo esférico

Se usó el acrílico como material de desarrollo, para lo cual se inyectaron dos medias esferas tipo domo de las fachadas de los edificios, el diámetro de estas dos medias esferas es de 25 centímetros, se unieron las mismas para formar la

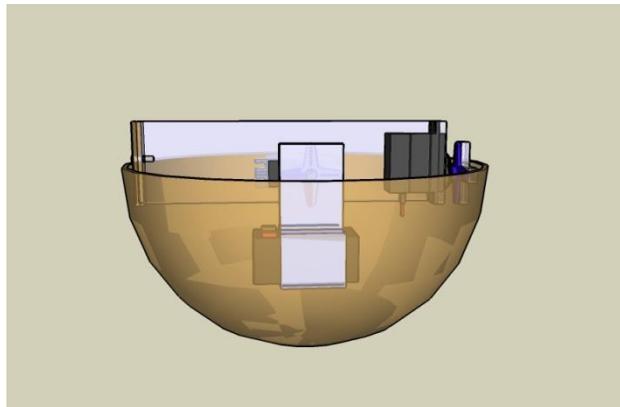
esfera completa, en la figura 14 se muestra una de las medias esferas, la cual corresponde a la media esfera base, es decir en la cual reposará la estructura interna.



Fuente: Autores del texto

Figura 14. Media esfera base

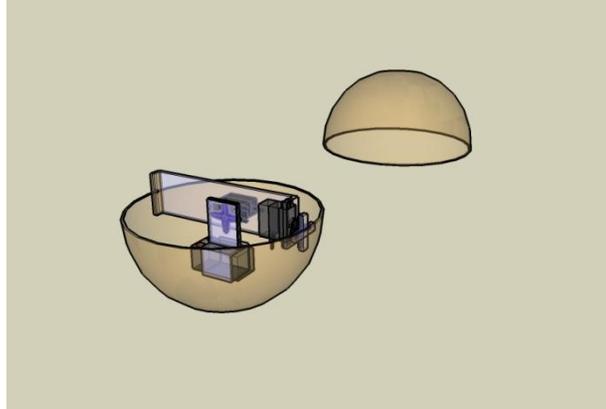
La estructura interna consiste en un soporte o biga principal también en acrílico, que está soportado en un extremo por el eje del motor de tracción y en el otro por un tornillo usado solo como soporte ya que será el pivote sobre el cual girará sin ofrecer ninguna resistencia.



Fuente: Autores del texto

Figura 15: Detalle de la estructura interna.

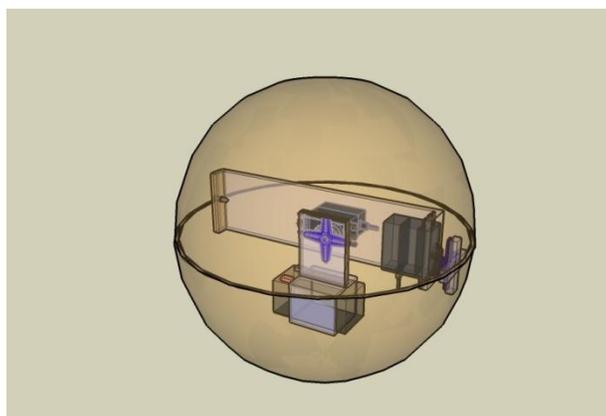
En la Figura 15 se aprecia cómo el soporte o biga principal sirve a su vez para fijar el servomotor que sostendrá desde su eje el péndulo, que corresponde a su vez a la batería de Coéxito Referencia 1.2-12 voltios.



Fuente: Autores del texto

Figura 16: Dos medias esferas.

La media esfera superior se fijó a la media esfera base con tornillos biselados, para que de esta forma no afectaran la superficie de la esfera formada.



Fuente: Autores del texto

Figura 17: Diseño del Prototipo final

Se logró la esfera planteada con medidas que fueron las más adecuadas teniendo en cuenta las dimensiones de los motores y de la batería seleccionada, la cual debía ser de una masa considerable, ya que sería la encargada del anclaje para cuando el centro de masa esté fijo o motivo también para hacer desplazar la estructura, cuando se modifique angularmente el centro de masa.

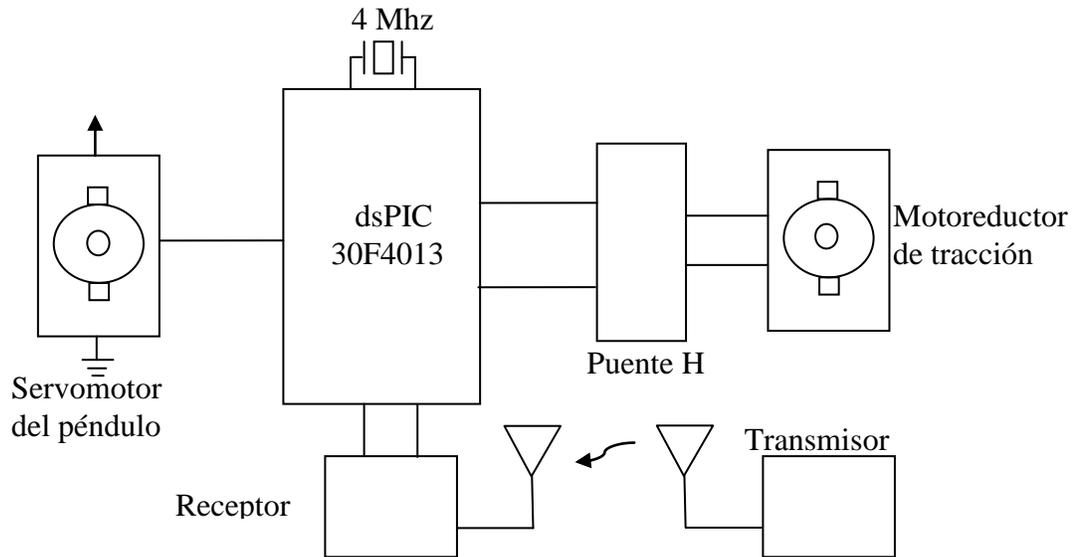


Fuente: Autores del texto

Figura 18. Esfera real

Tal como se describía en las imágenes de diseño se obtuvo una esfera de 25 centímetros de diámetro en acrílico color humo que permite ver la estructura interna de la misma, este prototipo fue la base para el desarrollo de los algoritmos probados y será la base para continuar con esta línea de trabajo ya que es un diseño de fácil traslado con ventajas adicionales que permite cargar la batería sin necesidad de abrirla, o quitar sus tornillos de soporte de la media esfera, ya que se adecuaron unos agujeros para acceder mediante conectores a las borneras de la batería. También se adecuaron unos orificios para acceder al interruptor principal y a un pulsador que puede determinar el tipo de mando que se le pueda dar.

5.2 CIRCUITO ELECTRÓNICO



Fuente: Autores del Texto

Figura 18. Diagrama en bloques del circuito electrónico

La tarjeta de control posee un microcontrolador dsPIC30F4013 el cual ha sido programado usando lenguaje de programación Assembler de Microchip. Esta tarjeta ha sido diseñada en Eagle y tiene unas medidas de 6x5 centímetros. Siendo el cerebro de la tarjeta de control el microcontrolador, éste maneja los dos motores, uno de ellos es un servomotor quien es el encargado de conservar el ángulo del péndulo y el otro motor, el de tracción, es un motorreductor acondicionado de un servomotor es decir, se le ha extraído su tarjeta de control de tal manera que debe ser manejado por un puente H al cual le llega la orden desde el microcontrolador a través de dos líneas para una de tres posibilidades: adelante, atrás o detenido.

La tarjeta tiene la posibilidad de manejo adicional con radio control es decir, usar módulos estándar de los cuales se usan dos de sus canales para el control de sus dos motores.

El manejo del servomotor se hace por el control basado en el ancho de pulso que va desde un Ton de 0.6mSeg. Hasta 2.4mSeg y es estándar para la posición angular de los servomotores y se logra un control de 180 grados sin embargo, para esta aplicación el ángulo total empleado es de máximo 80 grados siendo el valor por defecto de cero grados en la cual se logra el centro de masa para un avance frontal. Los otros ángulos manejados son hasta 40 grados para giros fuertes a la derecha y -40 grados para giros fuertes a la izquierda. Para giros suaves se emplean ángulos menores a estos valores.

5.3 ESTRATEGIA DE CONTROL

Los algoritmos implementados en la tarjeta del móvil permitieron evidenciar inconvenientes iniciales tales como el bajo rozamiento que se lograba con el vehículo sobre superficies muy lisas.

Teniendo en cuenta los parámetros hallados inicialmente para el motor de tracción se decidió implementar un arranque suave del orden de segundos, ya que de esta manera se lograba solucionar dos puntos que se evidenciaron con las pruebas iniciales, cuales eran los bruscos movimientos que el móvil poseía y la poca estabilidad del sistema ante los avances y los giros.

Un arranque suave le permitió al móvil una estabilidad en su despegue y una vez le lograba se llevaba a una velocidad constante haciendo giros suaves tal como se deseaba.

El control empleado para el arranque suave fue por modulación de ancho de pulso desde un valor pequeño hasta uno final que sería el que marcaría la velocidad de cruce del vehículo.

El control del ángulo del péndulo se hizo para variaciones suaves, ya que al hacer variaciones bruscas de giro aceptaba directamente el avance frontal o reversa del sistema.

CONCLUSIONES

Se comprobó que los datos hallados experimentalmente han permitido obtener un modelo del motor bastante preciso ya que la simulación muestra una respuesta del sistema bastante aproximada a la respuesta de la planta.

Una de las aplicaciones importantes del lugar geométrico de las raíces es que permite identificar la dinámica de la planta, ya que el polo más cercano al origen indica el tiempo mecánico, siendo este predominante en el sistema. De otra parte el polo más alejado del origen representa la constante de tiempo eléctrica.

Se realizó un levantamiento del estado del arte de vehículos esféricos basado en artículos científicos que sirvieron de soporte para la propuesta presentada y llevada a un prototipo.

El diseño de la estructura en 3D permitió obtener un prototipo físico con facilidad a la hora de realizarlo en el taller empleado el acrílico como material para el mismo.

Se logró implementar un vehículo esférico con control remoto y automático que aprovecha las ventajas de la estructura que consiste en el empleo de un bajo torque para su movilidad debido al único punto de contacto y que esta inercia es fácil de vencer cambiando la posición angular del centro de su masa.

Se realizaron diferentes pruebas sobre superficies garantizando además avances sobre superficies de diferente pendiente, lo que abre una camino sobre medición de torques de la estructura sometida a ambientes de simulación con la facilidad de validar estas simulaciones en el prototipo.

Este vehículo permitirá probar estrategias de control que garanticen un desplazamiento mucho más suave ya que hasta el momento solo se le ha implementado arranque suave para llegar a velocidad de cruce y presenta dificultades para realizar giros si se desean realizar estos giros a diferentes velocidades.

RECOMENDACIONES

La Tarjeta electrónica implementada no tuvo en cuenta que se lograra modificar el programa usando terminales de comunicación para lo cual se dificultó inicialmente este proceso empleando tiempo valioso para desmontar la estructura y quitar el integrado, ellos se soluciona fácilmente, previendo esto dejando unas borneras de programación accesibles a los usuarios.

Este campo de locomoción con vehículos esféricos podría integrarse para diseñar estructuras mecánicas robustas haciendo proyectos conjuntos con la Facultad de Ingeniería Mecánica.

Este campo de investigación requiere de simulación dinámica de la estructura que permita corroborar el torque empleado por el motor de tracción y su rendimiento, para ellos en el trabajo de grado que se está desarrollando paralelo al presente, se desean desarrollar parte de estas necesidades.

BIBLIOGRAFÍA

[1] GALVEZ SANCHEZ, Ricardo. Guías laboratorio de control obtención y chequeo de los parámetros funcionales de los servomotores.

[2] PÉREZ LÓPEZ, César. MATLAB y sus aplicaciones en la ciencia y la ingeniería. Prentice Hall. 2006.

[3] ANGULO USATEGUI, José María, GARCÍA ZAPIRAIN, Begoña, ANGULO MARTÍNEZ, Ignacio y VICENTE SÁEZ, Javier. Microcontroladores avanzados dsPIC. Thomson Editores Spain. 2006

[4] ASTRÖM, Karl Johan y HÄGGLUND, Tore. PID Controllers: Theory, Design and Tuning, 2nd Edition. Instrument Society of America. 1995

[5] Conceptos Controlador PID. Disponible en internet:

[http://es.wikipedia.org/wiki/](http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo#Proporcional)

Proporcional_integral_derivativo#Proporcional. (Diciembre 10/2008)

[6] Conceptos Maquinas Eléctricas. Disponible en internet: [http://es.wikipedia.org](http://es.wikipedia.org/wiki/Rotor_(m%C3%A1quina_el%C3%A9ctrica))

/wiki/ Rotor_(m%C3%A1quina_el%C3%A9ctrica) (Agosto 02/2008)

[7] Conceptos sobre inductancia. Disponible en internet:

<http://books.google.com>. (Enero 15/09)

[8] Conceptos y métodos momento de inercia. Disponible en internet: file:///F:/

Mo mentos .Monografias_com.htm. (Febrero 03/09)

- [9] Investigación momento de inercia. Disponible en internet: file:///F:/Momento Wikipedia,enciclopedia%20libre.htm (Enero 15/2009)
- [10] A. Halme, T. Schonberg, Y. Wang, "Motion Control of a Spherical Mobile Robot", *Proc. AMC'96*, Japan: Mie University, pp. 259-264, 1996.
- [11] S. Bhattacharya, S. K. Agrawal, "Spherical Rolling Robot: A Design and Motion Planning Studies" *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 16, No. 6, Diciembre de 2000.
- [12] A. H. Javadi, P. Mojabi, "Introducing August: A novel strategy for an omnidirectional spherical Rolling Robot" *Proc, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Washington, DC, Mayo 2002.
- [13] Mattias Seeman, Mathias Broxvall, Alessandro Saffiotti, Peter Wide, "An Autonomous Spherical Robot for Security Tasks", *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Homeland Security and Personal Safety*, Oct. 2006.
- [14] Q. Jia, H. Sun, D. Liu, "analysis of Actuation for spherical Robot", *IEEE, Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Chengdu, Sept. 2008.
- [15] <http://www.patentstorm.us/patents/6414457> Consultada en Marzo 31 de 2009.