

## CAPÍTULO IV

### SISTEMA DE LOCOMOCIÓN

#### 4.1 Introducción

El sistema de locomoción (SL) es el responsable de la traslación del robot en el campo de juego. Como ya se definió, va a ser un sistema “omnidireccional”, lo cual significa que el robot tendrá tres grados de libertad en el plano horizontal: dos grados de libertad lineal (prismática) y uno más de rotación, como lo muestra la figura 4.1.1. Este es el sistema más crítico del robot ya que si este llegara a fallar, el robot queda incapacitado de moverse en el campo de juego. Además, el diseño omnidireccional elimina toda restricción cinemática en el sistema de propulsión. Por ende, el algoritmo generador de la trayectoria a seguir tiene la libertad de acelerar el robot en cualquier dirección con cualquier magnitud (hasta cierto límite) en cualquier momento.

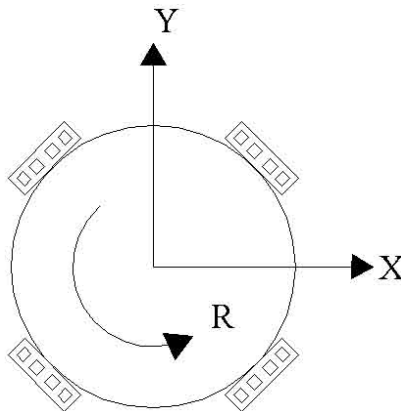


Figura 4.1.1 Grados de Libertad

#### 4.2 Metas Específicas del Sistema

Las metas propuestas se basan en observaciones hechas a equipos destacados que participaron en competencias pasadas. Al igual, se tomó en cuenta el reglamento para fijar las metas, como son las dimensiones del campo de juego.

#### **4.2.1 Aceleración: $9.8 \text{ m/s}^2$**

La aceleración es un arma que se debe usar, tanto en defensa como en ataque. Es clara la supremacía de los equipos que pueden llegar antes a la bola o posicionarse para un pase. La aceleración que se propone y se espera obtener es de  $9.8 \text{ m/s}^2$  (1G). Con dicha aceleración el robot cruzará el campo de juego en menos de medio segundo y llegará de 0 a  $10 \text{ m/s}$  en 1 segundo aproximadamente. Para poder alcanzar esta gran aceleración se tendrá que buscar un centro de masa o gravedad extremadamente bajo, al igual que una buena tracción en las ruedas. Obtener un centro de gravedad con dichas características no es una tarea sencilla ya que entra en conflicto con los demás sistemas del robot, principalmente con los motores de las ruedas y el sistema de pateo, así que se tendrá que tomar en cuenta cuando se diseñen esos sistemas. En el 2003 la aceleración promedio que usaban los robots participantes oscilaba en  $5 \text{ m/s}^2$  y para el 2004 el reglamento cambió, también el campo de juego duplicó su área de juego, así que las aceleraciones de la misma manera aumentaron casi al doble. La aceleración propuesta de 1 G cumple con todos los requerimientos del robot, pero se buscará la mayor aceleración posible sin afectar otros parámetros como la velocidad.

#### **4.2.2 Velocidad: $4 \text{ m/s}$**

Se requiere una alta velocidad simplemente por una razón. Si se tiene una alta aceleración se desea una alta velocidad máxima porque el tiempo que le tome alcanzar dicha velocidad va a ser muy corto, por lo tanto, una alta velocidad máxima es un buen componente de una alta aceleración. En la competencia del 2004 se presentaron velocidades entre 3 y  $3.5 \text{ m/s}$ .

#### **4.3 Metas adicionales**

Estas metas no son tan importantes como las ya mencionadas, sin embargo, pueden ayudar a efectuar las principales.

- Bajo mantenimiento

- Bajo centro de masa
- Robot ligero
- Minimizar el volumen ocupado por el sistema de locomoción

#### **4.4 Idea Inicial**

Analizando el sistema, se obtienen tres puntos focales: propiedades de ruedas, características de motores y características generales del sistema.

Una de las variables que limita a la aceleración es la tracción. Se tiene que buscar la mayor fricción posible entre las llantas y el suelo; para esto se tendrán que investigar las propiedades y coeficientes de distintos hules. Otra variable que afecta la aceleración es el peso del robot. Se busca hacer el robot lo mas ligero posible para que tenga una aceleración rápida, pero contradictoriamente mientras más ligero sea, menor agarre va a crear con el suelo, así que se tiene que buscar un balance entre peso y agarre. [10]

#### **4.5 Geometría del Sistema de Locomoción**

Para poder determinar las especificaciones de los motores, se requiere mayor detalle del diseño; como cuántos motores va a tener el robot, si están paralelos o hay cierto ángulo entre ellos, radio estimado de las ruedas, etc. [3]

El número de ruedas está determinado principalmente por dos variables que son la aceleración y el control. La aceleración se determina por el torque del motor y por la fricción de las ruedas con el suelo.

Se espera que el peso del robot también influya en la aceleración. Desde un punto de vista teórico, las leyes de Newton establecen que la fuerza requerida para acelerar una masa a cierta aceleración es igual a la fuerza normal multiplicada por la aceleración, por lo tanto, se requiere mayor fuerza para acelerar un objeto pesado a cierta aceleración que uno más ligero a

la misma aceleración. Sin embargo, la teoría de fricción estática dice que la fuerza de fricción máxima que se le puede aplicar a un cuerpo estático es proporcional a la fuerza normal. Esta relación se expresa de la siguiente forma:

$$F_{TOTAL\ max} = \mu * N \quad [4.5.1]$$

“ $\mu$ ” es el coeficiente de fricción

“ $N$ ” es la fuerza normal, [N]

Ya que se cuenta con múltiples ruedas, la fuerza de fricción máxima en cada rueda solo es una fracción de la fuerza total ejercida por la masa del robot, la ecuación se puede reescribir así:

$$F_{TOTAL\ max} = k_1 * \mu * m * g \quad [4.5.2]$$

“ $\mu$ ” es el coeficiente de fricción

“ $m$ ” es la masa del robot, [kg]

“ $g$ ” es la fuerza de gravedad, [m/s<sup>2</sup>]

“ $k$ ” es la constante de proporcionalidad

En este caso  $m= 3.0$  y  $g= 9.8$

La constante de proporcionalidad está relacionada con el número de ruedas, su posición en el chasis y la dirección de la aceleración. En la figura 4.5.1 se ilustra el diagrama de cuerpo libre de la rueda con sus respectivas fuerzas.

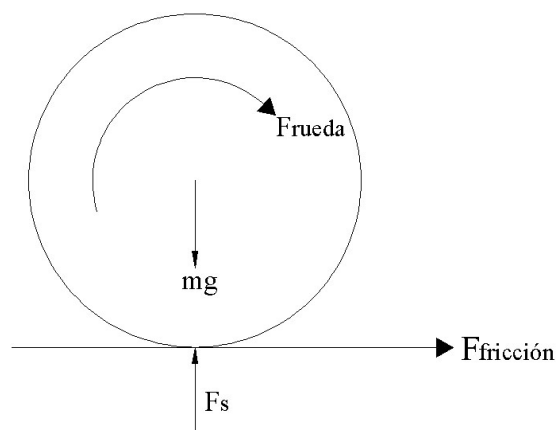


Figura. 4.5.1 Diagrama de Cuerpo Libre de la Rueda

Al igual se puede determinar una fórmula para la fuerza en cualquier rueda para acelerar el robot a una aceleración determinada según las leyes de Newton. Donde “a” es aceleración:

$$F = k_2 * m * a \quad [4.5.3]$$

“a” es la aceleración, [m/s<sup>2</sup>]

En este caso a=9.8

Igualando las ecuaciones [4.5.2] y [4.5.3] se encuentra que la máxima aceleración del robot es proporcional al coeficiente de fricción por la gravedad tomando en cuenta la constante de proporcionalidad “k”. Al igual, se asume para todos estos casos que la rueda es rígida y no se deforma en ningún momento. Si se presentara el caso que la masa fuera igual a cero la fuerza sería cero y por lo tanto también la aceleración, ya que no hay masa que acelerar. Es posible igualar la fuerza máxima de fricción que se presenta en la ecuación [4.5.2] con la fuerza presentada en la ecuación [4.5.3] porque la fricción limita la máxima fuerza que se le puede aplicar a la rueda mediante la aceleración, así que, estas dos fuerzas serán iguales justo antes que la rueda se patine. La ecuación [4.5.4] muestra el resultado de la igualación.

$$a_{\max} = k * \mu * g \quad [4.5.4]$$

Este análisis muestra que el robot tiene un límite respecto a la fricción y que el coeficiente de fricción es prácticamente una constante, por lo tanto, la masa del robot es irrelevante siempre y cuando exista una.

Analizando aspectos del sistema como son la aceleración y la estabilidad, refiriéndose a la probabilidad a volcarse. Se decide que cuatro ruedas son mejor que tres ya que destaca su estabilidad; aunque en un principio se cree que el control de un sistema con cuatro ruedas sería mas complejo, hay pruebas realizadas por equipos participantes que demuestran que no

es más difícil controlarlo e incluso puede ser más fácil controlar un sistema con cuatro ruedas y resulta más preciso [29].

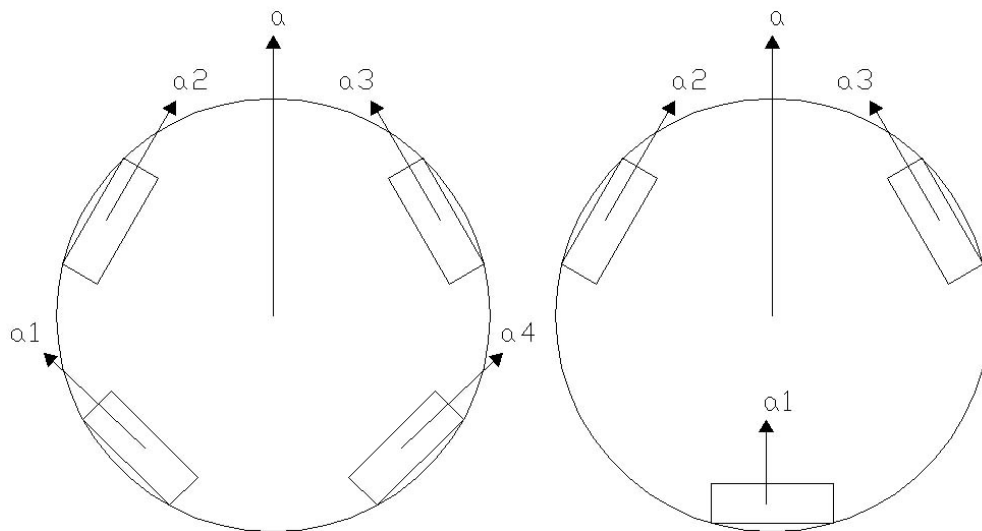


Figura. 4.5.2 Diagrama de aceleración

En la figura 4.5.2 se muestra el acomodo de las ruedas para el sistema de cuatro y tres ruedas. El funcionamiento de los dos sistemas es el mismo. Por ejemplo, para acelerar hacia adelante se aceleran las ruedas por igual, para el sistema de cuatro sería  $a_1=a_4$  y  $a_2=a_3$ , para el de tres solo  $a_2=a_3$ . Esto haría que los vectores horizontales de la aceleración se cancelaran y el robot avanzara hacia adelante en forma recta. En cuestión de cuál acelera mejor, los dos sistemas presentan los mismos problemas de tener “fricción limitada”, indicando que las ruedas se patinan a una fuerza determinada, por esto, la única ventaja que tiene el sistema de cuatro sobre el de tres es que la potencia requerida por cada motor es menor que en el de tres. Por ende, los motores pueden ser más pequeños porque se le exige menos a cada uno. Con esto, se puede inferir que en el sistema de 3 motores, cada motor requiere incrementar su voltaje para igualar el trabajo desarrollado por el de 4 motores, el cual implica un aumento en las baterías requeridas. Con cuatro motores, a parte de reducir el número de baterías necesarias, se

disminuye la posibilidad de quemar los motores porque no se requiere tanta potencia por motor. [29]

Comparando la tracción de los 2 sistemas, analizando el caso que se mueva en línea recta hacia enfrente. En el sistema de 4 ruedas, las 4 ruedas aportan fuerza para el movimiento y en el sistema de 3 ruedas sólo 2 aportan fuerza. Sólo en rotación o una traslación en curva las 3 ruedas aportan fuerza.

Ya que está definido el número de ruedas que va tener el robot, se tiene que especificar la disposición de ellas. La forma en que estén acomodadas afectará la aceleración en distintas formas. La geometría dictará la dirección en que cada rueda puede ejercer fuerza. Por ejemplo, si todas las ruedas apuntan en la misma dirección, el robot sólo podrá acelerar en dos direcciones (incluyendo reversa). Por esta razón, mecánicamente hablando se busca una configuración en la que el robot pueda acelerar en cualquier dirección por igual.

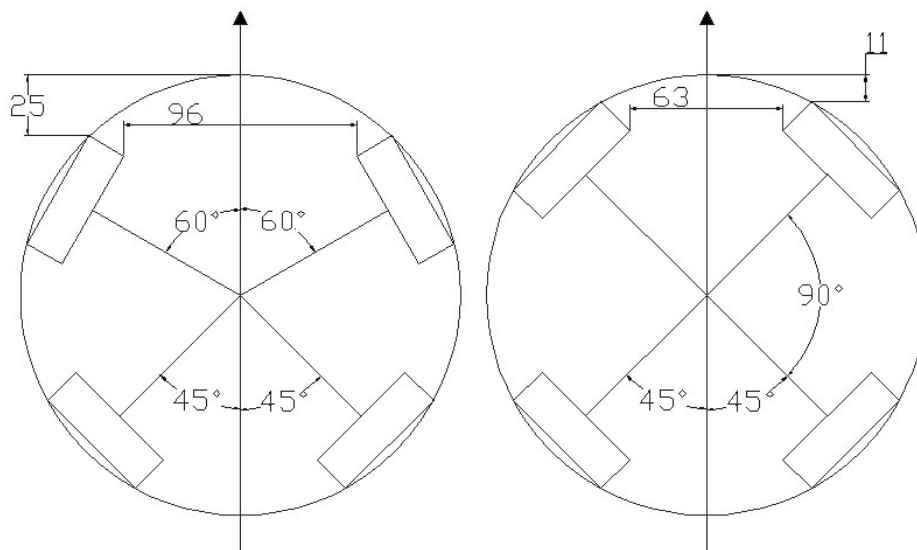


Figura 4.5.3 Ejemplo de Geometría del Sistema Locomotriz

La transferencia de masa o inercia está en relación a la configuración de las ruedas. Se desea estabilidad en todas las direcciones, así que se busca poner las ruedas lo más lejos del centro de gravedad y con el mismo espaciamiento entre ellas. Con dichas consideraciones el efecto

de la inercia se reducirá al mínimo. Con todo esto, se concluye que cuatro ruedas colocadas en la circunferencia del robot con un espaciado equidistante ( $90^\circ$ ) es la configuración ideal. Esta configuración entra en conflicto con el sistema de control de bola, ya que le resta espacio. Para solucionar este problema se van a mover las ruedas frontales un poco hacia afuera y hacia atrás, manteniendo el perímetro. Se estima que la diferencia entre la separación de las ruedas frontales con las traseras será de aproximadamente  $15^\circ$ . Esto se determinará con el tamaño de la barra de driblar y con el diámetro de las ruedas; en la figura 4.5.3 se muestra el acomodo de las ruedas a  $90^\circ$  y después del reacomodo dejando más espacio. Las consecuencias de este cambio, en la geometría de un cuadrado a trapecio, es que se tendrá una mejor aceleración hacia enfrente y deficiente hacia atrás en comparación a las otras. También habrá una mayor inercia al frenar en dirección frontal ya que las ruedas están un poco más atrás. Así que eso se tendrá que tomar en cuenta para la parte de control y programación. [29]

#### **4.6 Selección de Motores**

La selección de un motor que cumpla con los requerimientos del sistema es el paso más importante para cumplir las metas del sistema de locomoción. Se busca un motor que pueda acelerar a  $9.8 \text{ m/s}^2$ , llegando a una velocidad máxima deseada de  $4.0 \text{ m/s}$  en  $0.4$  segundos y lo suficientemente robusto para que no falle en la competencia. El motor debe ser lo más compacto posible para no restarle espacio a los demás componentes y para que sea fácil de ajustar. El criterio para seleccionar los motores está basado en los objetivos de diseño. Primero la aceleración se puede definir en términos de torque requerido del motor. Así mismo, la velocidad se puede determinar en revoluciones del motor, y por último, para asegurar que el motor no se quemara o presente algún fallo se determina la corriente máxima por motor. [3]

Para calcular el torque del motor requerido para acelerar a  $9.8 \text{ m/s}^2$  se asumen ciertos aspectos, como que el centro de masa está lo más alto posible en la estructura del robot a la



hora de la aceleración, pero sin que el robot se voltee; cuando se efectúa la aceleración, el efecto de transferencia de masa (inercia) hace que todo el peso del robot sea soportado por las dos ruedas traseras. Por lo tanto, dos motores deben de poder acelerar al robot a  $9.8 \text{ m/s}^2$ . Por último, se toma un caso representativo, aceleración hacia adelante. En este caso, el peso del robot se distribuye equitativamente entre las dos ruedas traseras las cuales están a  $45^\circ$  respecto a la dirección de la aceleración. Este ejemplo se muestra en la figura 4.6.1 con su vista lateral a la izquierda y vista superior a la derecha.

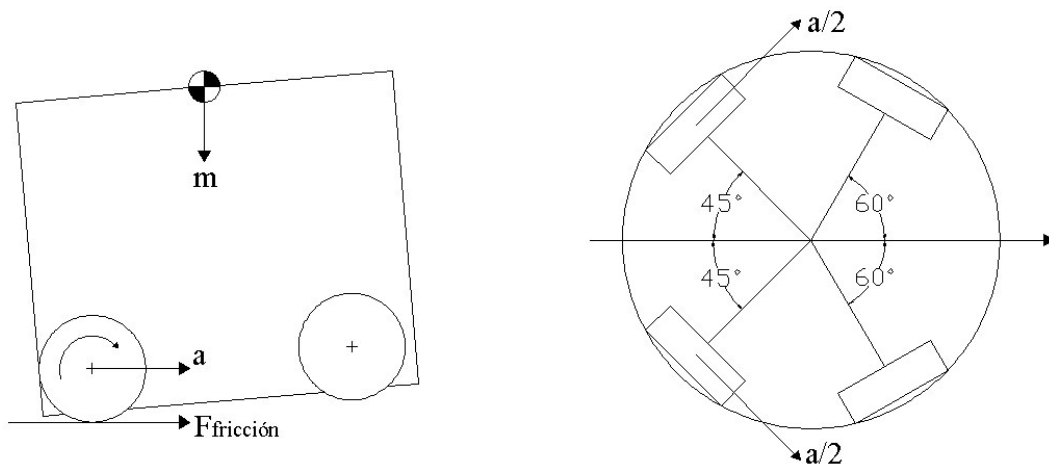


Figura 4.6.1 Diagrama de Cuerpo Libre

Para calcular el torque necesario en cada motor se realiza un balance de fuerzas, determinando la fuerza transmitida de una rueda del robot al suelo. [29]

$$\begin{aligned}\sum F &= ma \\ 2F \cos(45^\circ) &= ma \\ F &= \frac{ma}{2 \cos(45^\circ)} \\ F &= \frac{ma}{\sqrt{2}}\end{aligned}\quad [4.6.1]$$

“ $a$ ” es la aceleración,  $[\text{m/s}^2]$

“ $m$ ” es la masa del robot,  $[\text{kg}]$

En este caso  $a= 9.8 \text{ m/s}^2$  y  $m= 3.0 \text{ kg}$

Ya con la formula [4.6.1] se sustituye “a” y “m” que se estima que sea de 3.0 kg. Ya teniendo la fuerza requerida se multiplica por el radio para sacar el torque del motor. El radio de la rueda se prevé que sea de 25.4 mm, por lo tanto, el torque requerido del motor es de 0.528 N\*m.

Cabe remarcar que el cálculo realizado es para las dos ruedas traseras en las condiciones ya mencionadas y la fuerza y torque arrojados por la operación son aplicados a cada una de las ruedas en su respectiva dirección.

Posteriormente se determina la velocidad máxima en la que el motor debe trabajar para cumplir el objetivo de que el robot se traslade a una velocidad de 4 m/s. Para calcular las revoluciones del motor se usa la siguiente fórmula:

$$\omega = \frac{V}{r} \quad [4.6.2]$$

$$\omega_{rueda} = \frac{V \cos(45^\circ)}{r} \left( \frac{60}{2\pi} \right) \left( \frac{rev}{rad} \right) \left( \frac{seg}{rev} \right)$$

“V” es la velocidad, [m/s]

“r” es el radio de la rueda, [m]

En este caso  $V= 4.0$  m/s y  $r= 0.0254$  m

El resultado que arroja la fórmula es 1063 rpm, el cual es en la rueda. Al momento de seleccionar el motor se debe de explorar la opción de usar un reductor de velocidad.

Por último, asegurarse que los motores no se vayan a sobrecalentar y dañarse permanentemente. Una de las propiedades de los motores de corriente directa (CD), ya sean con escobillas o sin escobillas, es que la cantidad de calor generado es proporcional al torque y a su vez a la corriente. Muchos fabricantes de motores CD proporcionan los límites térmicos de sus motores, al igual que la corriente máxima que puede soportar continuamente a temperatura ambiente antes de quemarse. Cualquier corriente que sea mayor al valor máximo

especificado por el fabricante puede quemar el motor si es aplicado continuamente, sin embargo, el robot no va a estar moviéndose continuamente así que puede exceder el límite de corriente por periodos cortos de tiempo. Teóricamente hablando, al momento de acelerar los dos motores traseros serán sobrecargados para alcanzar la aceleración deseada y al momento de desacelerar los dos motores delanteros tendrán que frenar al robot. En un partido, lo que el robot acelere tiene que desacelerar, así, que en realidad los motores están trabajando la mitad del tiempo. Por lo tanto, el motor puede ser sobrecargado por un periodo corto de tiempo, siempre y cuando no tenga carga y se le dé al menos el mismo tiempo para recuperarse.

#### 4.6.1 Motores Candidatos

Teniendo la información ya presentada se puede llevar a cabo una selección rápida de los motores candidatos. En los catálogos de fabricantes de motores se debe buscar los requerimientos claves. Primero, el motor debe tener la fuerza suficiente para cumplir con el torque requerido. Segundo, el motor debe ser lo suficientemente pequeño para la aplicación, ya que si es demasiado grande no cabrá en el robot. Por último, debe incluir un “encoder” para el control del motor o tener la facilidad de instalarle sensores para tener retroalimentación.

Se revisaron varios catálogos de fabricantes de motores CD y los más destacados que cumplían con los requerimientos fueron dos fabricantes, Maxon y MicroMo. Ya examinados los catálogos, en la tabla 4.6.1.1 se detallan los mejores candidatos de cada fabricante y los puntos clave de cada motor. [20] [23]

Tabla 4.6.1.1 Motores candidatos

Tipo	Maxon		MicroMo			
	EC 45 50W	EC 45 30W	2342 012CR	3564 012B	MD3644 A012V	
	sin escobillas	sin escobillas	con escobilla	sin escobillas	con escobilla	
Tensión nominal	24	12	12	12	12	V
Par de arranque	0,78	0,26	0,8	0,291	0,102	N*m
Velocidad en vacío	6800	4400	8100	11550	5400	RPM
Const. Térmica	11,7	11,6	6,5/490	23/1 175	-	s
Corriente máxima	2,58	2,3	1,4	2,5	0,85	A

El motor MicroMo 2342 es la primera opción, ya que sobrepasa todos los requerimientos mostrados en la tabla 4.6.1.1. Con un torque de 0.8 N\*m se podría conectar directamente a la rueda sin necesidad de un reductor de velocidad para incrementar la fuerza. Otro motor que está a la par del MicroMo 2342 es el Maxon EC45 de 50 Watts con la ventaja de que soporta más corriente y es más corto, pero trabaja con el doble de voltaje. Los tres motores restantes cumplen con los requisitos si son usados con un reductor. [3][37]

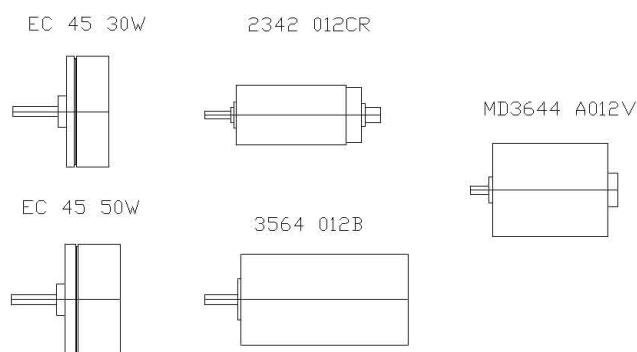


Figura 4.6.1.1 Motores Candidatos

Uno de los aspectos más importantes es el tamaño del motor, ya que el espacio está muy restringido y no se desea restar espacio a los demás sistemas. La estrategia a seguir para comparar las dimensiones de los motores es dibujándolos en AutoCAD® escala 1:1 y acomodarlos en un “layout” simple del robot. En la figura 4.6.1.1 se muestran todos los motores candidatos a la misma escala.

En la figura 4.6.1.2 se indica el “layout” de como quedaría el motor MicroMo 2342 012CR en color verde y el motor Maxon CE 45 30W en azul, el cual está tomando en cuenta un reductor de velocidad estándar del mismo fabricante. En los dos motores no se está contemplado el soporte y la sujeción de la rueda. Se escogieron estos dos motores para ponerlos en el “layout” debido a que son los más representativos, ya sea por el MicroMo, que es el candidato número uno y el Maxon de 30 Watts, por ser el más pequeño ya incluyendo un reductor de velocidad.

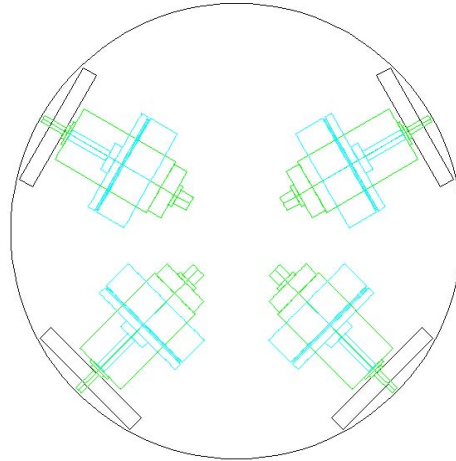


Figura 4.6.1.2 “Layout” de Motores

#### 4.6.2 Selección de reductor de velocidad

Después de analizar a detalle todos los motores candidatos, el motor MicroMo 2342 señala una superioridad en cuestión de fuerza, pero es demasiado grande para el robot. Se tendría que buscar otra forma de posicionarlo como puede ser perpendicular a la rueda, lo cual genera el problema de tener engranes cónicos, entre otras cosas. El motor Maxon EC 45 50W tiene el inconveniente de requerir 24V para trabajar y representa un aumento del 33% en celdas de energía, las cuales ocupan un espacio considerable. Los motores MicroMo 3564 012B, MD3644 A012V y Maxon EC 45 30W requieren de un reductor de velocidad para cumplir los requerimientos del sistema; la ventaja que presenta el Maxon entre los otros dos es que es más compacto. Comparando el Maxon EC 45 30W con el MicroMo 2342, el MicroMo es un motor superior pero muy grande y en relación con el Maxon EC 45 50W son casi del mismo tamaño, en tanto, el 50W tiene la gran desventaja de usar 24V. Así que la primera opción para este robot es el Maxon EC 45 30W.

El fabricante Maxon tiene un reductor de velocidad con una relación de 5:1 y una longitud de 23 mm. Se desea reducir esta longitud lo más posible al igual de buscar una mejor relación. Para calcular el rango donde la relación mantenga la velocidad y la fuerza dentro de los

parámetros deseados se utilizaron las fórmulas 4.6.2.1 y 4.6.2.2. Mientras más grande sea la relación mayor será la fuerza obtenida, sin embargo, la velocidad disminuirá. Al contrario, mientras más se acerque la relación a 1 la velocidad será mayor y la fuerza menor.

$$Relación_{\max} = \left( \frac{M_{rpm}}{R_{rpm}} \right) (ef.) \quad [4.6.2.1]$$

$$Relación_{\min} = \left( \frac{R_{torque}}{M_{torque}} \right) (ef.) \quad [4.6.2.2]$$

“ $M_{rpm}$ ” son las revoluciones por minuto del motor, [rpm]

“ $M_{torque}$ ” es el torque del motor, [Nm]

“ $R_{rpm}$ ” son las revoluciones por minuto de la rueda, [rpm]

“ $R_{torque}$ ” es el torque de la rueda, [Nm]

“ $ef.$ ” es la eficiencia el motor, [%/100]

En este caso  $M_{rpm} = 4400$  rpm,  $M_{torque} = 0.26$  Nm,  $R_{rpm} = 1063$  rpm  
y  $R_{torque} = 0.53$  Nm

La relación máxima que puede tener es de 3.72:1, pasando esta relación ya no se alcanza la velocidad deseada de 4 m/s. La relación mínima es de 2.26:1, minimizando más la relación, el torque en las ruedas no es suficiente para tener una aceleración de 9.8 m/s<sup>2</sup>. Teniendo una relación entre estos dos valores se cumplirá con los requisitos del sistema. Debido al espacio reducido, la relación de engranes tiene que ser de 60:26, lo cual se encuentra en el límite inferior del rango posible. Los engranes son de aluminio marca W. M. BERG®. La flecha del motor es de 4 mm de diámetro, y el engrane de 26 dientes tiene un diámetro interior de 5 mm, por lo tanto, necesita de un acoplador de 0.5 mm ya que la flecha del motor es de 4 mm.

[Apéndice B tabla 4][20][23][29][37]

## 4.7 Ruedas

Las ruedas son un elemento fundamental del robot, ya que son su conexión directa con el suelo. Si se cuenta con unos motores que exceden los requerimientos y un sistema de transmisión de poder bueno, hay que tener cuidado en el diseño o selección de las ruedas para no limitar en alguna forma el sistema. Como podría ser un coeficiente de fricción muy bajo, que provocaría un derrape de la rueda y en lugar de avanzar perdería el control. Si la rueda es muy pesada crearía una inercia significativa y afectaría el rendimiento de la aceleración. Las ruedas omnidireccionales se caracterizan por tener en el perímetro pequeñas ruedas pasivas, con su eje de libertad perpendicular al de la rueda principal, para que la rueda en general tenga dos grados de libertad. Si se diseña la rueda con pocas ruedas pasivas se crean dos problemas. El primero, hay poca área de contacto con el suelo y es más fácil que se patine la rueda, y segundo, hay una diferencia de diámetros de contacto con el suelo respecto al centro de la rueda, y esto da lugar a un rebote de la rueda.

En el mercado de las ruedas hay varios fabricantes de ruedas omnidireccionales, sin embargo, Kornylak Corporation [24] se destaca por el tamaño en el que las fabrica y por los distintos modelos que tienen. En la figura 4.7.1 se muestra lo que es conocido como una rueda omnidireccional tradicional (omnirueda) que tiene tres ruedas pasivas. Se tienen que poner dos ruedas juntas para que pueda rodar 360°.



Figura 4.7.1 Omniwheel

En la figura 4.7.2 se muestra otro tipo de rueda omnidireccional llamada Transwheel® la cual tiene más ruedas pasivas, no requiere que sean dos para poder rotar 360° y es mas compacta.



Figura 4.7.2 Transwheel®

En la figura 4.7.3 se muestra el mismo tipo de rueda solo que doble, la cual tiene mayor agarre y elimina el rebote de la rueda porque siempre hay una rueda pasiva tocando el suelo. Un juego de omniruedas tiene un ancho de 37.08 mm mientras una Transwheel® doble 30.16 mm. Las ruedas pasivas de las Transwheel® cuentan con una variación, que es la Cat-Trak®, las cuales están fabricadas con hule sintético diseñado para un alto agarre, recomendado para robots móviles, para la industria del vidrio o circunstancias similares.



Figura 4.7.3 Transwheel® doble

La Transwheel® es la primera opción de rueda para este robot, independientemente si es doble o sencilla. Se prefiere la doble para un mejor funcionamiento, pero la sencilla debe de cumplir con los requerimientos del sistema. [3][10][24]



#### **4.8 Material**

El sistema locomotriz es el más demandado, se estima que los motores trabajarán la mitad del tiempo; siempre va a estar trabajando un par de éstos. Cada motor generará cierta cantidad de calor, el cual tiene que ser disipado. Por ende, el material del soporte se encargará de hacerlo. Aluminio es la mejor opción porque es un metal ligero, fácil de trabajar y disipa bien el calor. Cualquier aluminio comercial como la serie 6000, sobrepasa los requerimientos mecánicos del sistema, así que, el aluminio 6061-T6 que es accesible, es el material seleccionado para esta aplicación.

La sujeción de los motores se realiza con tres tornillos M3x0.5 con 3.9 mm de largo, como lo marca el fabricante. Los motores estarán montados sobre unas placas de 6 mm de grueso, y al igual cada placa estará fija a la placa principal inferior y superior mediante dos tornillos allen avellanados M3x0.5 de cada lado. [2]

#### **4.9 Energía del Sistema Locomotriz**

El sistema locomotriz es el que requiere mayor energía, ya que cuenta con cuatro motores. Cada robot debe durar por lo menos 10 minutos funcionando (hasta medio tiempo), sin embargo, es más seguro diseñar para un tiempo mínimo de 20 minutos, que es lo que dura un partido completo sin tiempo extra. Los puntos a considerar para la selección de las baterías son los siguientes:

- Consumo máxima de corriente.
- Capacidad de duración.
- Tamaño y peso.
- Número de baterías a usar.

### 4.9.1 Consumo Máxima de Corriente

El consumo máximo de corriente o potencia de un sistema o aparato eléctrico se calcula con la siguiente fórmula.

$$Potencia = V * A \quad [4.9.1.1]$$

“V” es el voltaje, [V]

“A” es el amperaje, [A]

El resultado está en Watts. Por ejemplo, uno de los motores del sistema locomotriz usa 12V y 2.3A, lo cual resulta en 27.6W, en la ficha técnica del motor señala que la potencia nominal asignada del motor es de 30W. De esta manera, se puede dar un número aproximado del consumo del sistema. [29]

En cuestión de corriente, el cálculo es una simple suma. En la tabla 4.9.1.1 se muestra el consumo por dispositivo en el peor de los casos (consumo máximo).

Tabla 4.9.1.1 Consumo de Corriente

Dispositivo	Consumo (A)
Motor SL (x4)	2,3
Motor SB	0,455
TOTAL	9,655

El consumo máximo de todos los motores DC del robot es aproximado a 10A. No se incluyó el solenoide del sistema de pateo en la tabla porque es un dispositivo intermitente y no tiene un consumo constante, sin embargo, se pondrán las celdas de energía requeridas para obtener un sistema que soporte las demandas y no ser decadente al momento que esté en operación este sistema. Tampoco se incluyó el micro servomotor, el cual se especifica en el capítulo 6, porque el fabricante no proporciona más datos que el voltaje de 4.8 V, el cual no es mayor al de los demás dispositivos. Los sensores de cada sistema utilizan 4.5 V y el amperaje no está especificado, el cual se asume que se encuentra entre los miliamperes o menos. Cada

dispositivo eléctrico, estará conectado al cerebro del robot (sistema electrónico), no directamente a las baterías. Esto es para ser controlados y protegerlos de las descargas hechas por otros dispositivos.

#### 4.9.2 Capacidad de Duración

Estimar cuánto tiempo va a durar una batería es casi imposible, ningún fabricante publica datos de este tipo. Por lo general, esto se realiza experimentalmente. Equipos participantes en el año 2004 realizaron experimentos con sus baterías. El experimento consistió en conectar 12 celdas de polímero de litio (lithium polymer), 4 en serie y 3 en paralelo. Se programó al robot para que siempre acelerara y los sistemas de pateo y de control de bola funcionaran constantemente. El resultado fue que después de una hora el voltaje inicial de 16.65 en el paquete de baterías había bajado aproximadamente 1.5V. Esto muestra que las baterías tienen alta capacidad de duración. En la figura 4.9.2.1 se muestra una gráfica de descarga una batería de polímero de litio. [27]

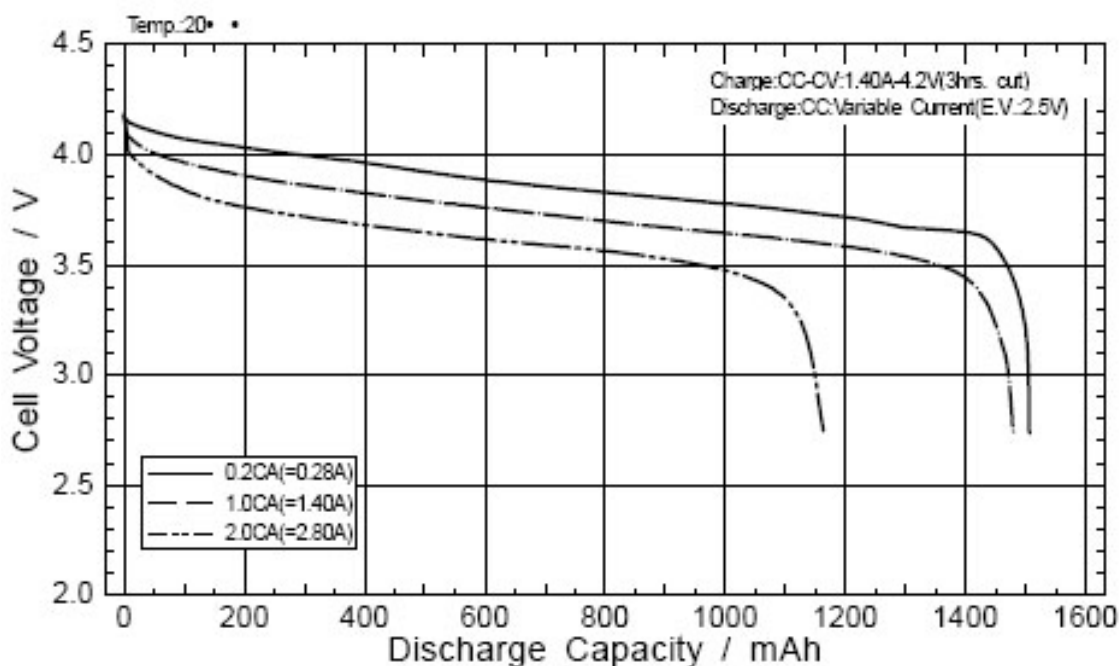


Figura 4.9.2.1 Gráfica de Descarga

### 4.9.3 Tamaño y Peso

El tamaño y peso de las pilas es un punto muy importante ya que se tiene espacio muy limitado y el peso contribuye a mayor gasto de energía. En la tabla 4.9.3.1 se muestran los distintos tipos de baterías y sus características, sus dimensiones no se pueden especificar ya que varían según el amperaje.

Tabla 4.9.3.1 Tipos de Baterías

Tipo	Voltaje (V)	Amperaje (mA)	Peso (g)
Nickel Metal-Hydride	1,2	500-8000	12-160
Lithium Polymer	3,7	300-8000	3,3-40
Nickel Cadmium	1,2	500-1100	30
Lithium Ion	2-4	180-5000	6-45

Como se puede apreciar, las baterías de polímero de litio y litio-ion tienen la mejor combinación entre energía y peso. Las de polímero tienden a ser un poco más pequeñas que las de litio-ion, pero el precio aumenta considerablemente. Sin embargo, dependiendo del fabricante, la comparación de los diferentes tipos va variando. Se seleccionó la batería SANYO® UR18650F como primera opción, principalmente por su relación tamaño-energía.

[Apéndice A tabla 11] [16][25][26][27][32]

### 4.9.4 Número de Baterías a Usar

El voltaje más alto que se requiere para los motores, según especificaciones, es de 12 V. Con 3 baterías en serie se obtiene 11.1 V y con 4 baterías se sobrepasa el valor. Sin embargo, la demanda de los motores puede ser mayor. Por lo tanto, se desea tener la mayor energía posible siempre tomando en cuenta el peso y el centro de masa. Analizando el diseño final de las piezas y del robot en general, se pondrán 16 baterías ya que fue el máximo cupo en el robot afectando lo menos posible al centro de masa.

#### 4.10 Control del Sistema Locomotriz

El control de los motores sin escobillas se divide en dos pasos; primero, la lectura de las señales enviadas por los sensores internos del motor al cerebro del robot; y segundo, el establecimiento del estado del motor. Cada motor cuenta con tres sensores “Hall”, con los cuales se definen seis estados válidos. Conociendo el estado actual y la dirección deseada se puede generar un comando de seis bits para manejar el motor. Mediante el “encoder” de cada motor se obtiene una retroalimentación del estado del motor con la que se puede determinar la velocidad real de cada uno. Sin embargo, es recomendable colocar un giroscopio y acelerómetro para saber la velocidad y dirección real del robot, ésta clase de sensores son usados frecuentemente en aeromodelismo. Si se le da al robot la instrucción de ir del punto “A” al “B” en línea recta y una de sus ruedas se patina mediante estos sensores se puede rectificar su camino en tiempo real. No se requiere de un sensor infrarrojo para detectar las líneas en el suelo ya que se cuenta con reconocimiento por visión, generalmente de una o dos cámaras con la capacidad de grabar 60 cuadros por segundo a una resolución de 640x860 píxeles, el cual conforma un sistema de visión global que está montado 4 metros por encima del campo de juego y proporciona una vista general del campo para todos los jugadores. En sí, el sistema sensorial y de control del robot no requieren de varios elementos, pero si de un uso y aprovechamiento apropiado de ellos. [10][29]

#### 4.11 Resumen

El sistema locomotriz cumplirá las metas de una aceleración de  $9.8 \text{ m/s}^2$  y una velocidad de 4 m/s, sin embargo, se debe tener cuidado de no hacer un mal uso de los dispositivos ya que es relativamente fácil quemarlos o romperlos en alguna colisión a alta velocidad. Los componentes que conforman el sistema locomotriz son los siguientes:

Componentes a comprar

- 4 motores Maxon® EC45 de 30W. (apéndice A, tabla 1)
- 4 engranes de 26 y 60 dientes marca W. M. BERG® con calza de 0.5 mm. (apéndice A, tabla 4)
- 4 rodamientos marca W. M. BERG®(apéndice A, tabla 5)
- 4 ruedas Transwheel® 2” Cat-Trak® sencillas. (apéndice A, tabla 8)
- 64 tornillos M3X0.5 de 10mm. (apéndice A, tabla 9)

#### Componentes a manufacturar

- 2 soportes derechos de aluminio 6061-T6. (apéndice C, RC-02-03-00)
- 2 soportes izquierdos de aluminio 6061-T6. (apéndice C, RC-02-02-00)
- 4 flechas para rueda de aluminio 6061.T6. (apéndice C, RC-02-01-00)