



PROYECTO FINAL DE CARRERA

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor



Escuela
Universitaria
Ingeniería
Técnica
Industrial
ZARAGOZA

Autor: Álvaro Alcalde Grau

Coordinador: Ing. Vasco Santos
Directora: Esther Sainz

Especialidad: Electrónica

Convocatoria: Marzo 2011

MEMORIA

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 2. ANTECEDENTES | 8 |
| 2.1. Historia | 8 |
| 2.2. Tipos | 10 |
| 3. REQUISITOS DE DISEÑO | 13 |
| 4. CÁLCULOS MECÁNICOS | 14 |
| 4.1. Cálculo de las masas del vehículo | 14 |
| 4.2. Fuerzas actuantes | 15 |
| 4.3. Par necesario para el movimiento | 18 |
| 4.4. Revoluciones y potencia necesarias | 21 |
| 5. ANÁLISIS DE SOLUCIONES | 23 |
| 5.1. Motor | 23 |
| 5.1.1. Motor de inducción | 23 |
| 5.1.2. Motor CC sin escobas o Brushless (BLDC) | 26 |
| 5.1.3. Motor CC con escobillas | 34 |
| 5.1.4. Motor Directdrive o HUBwheels | 40 |
| 5.2. Conversores | 42 |
| 5.2.1. Conversores CC-CC | 43 |
| 5.2.2. Conversores CC-AC | 46 |
| 5.3. Control de motores | 50 |
| 5.3.1. Control del motor de inducción | 51 |
| 5.3.1.1. Arranque | 51 |
| 5.3.1.2. Control de la velocidad | 52 |
| 5.3.2. Control del motor C.C. | 56 |
| 5.3.2.1. Arranque | 56 |
| 5.3.2.2. Control de la velocidad | 57 |
| 5.3.3. Control del motor Brushless | 59 |
| 5.3.3.1. Control por troceador | 59 |
| 5.3.3.2. Control por corriente | 60 |
| 5.3.3.3. Tipos de conmutación | 60 |
| 5.4. Microcontrolador | 63 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.1. Control en bucle abierto | 63 |
| 5.4.2. Control en bucle cerrado | 65 |
| 6. SELECCIÓN DEL MOTOR..... | 67 |
| 6.1. Configuración y tipo de motor elegidos..... | 67 |
| 6.2. Motor seleccionado | 71 |
| 7. PARÁMETROS A DIMENSIONAR | 74 |
| 8. OTRAS CARACTERÍSTICAS PROPIAS DEL CORTACÉSPED..... | 79 |
| 9. ALIMENTACIÓN..... | 80 |
| 9.1. Baterías | 80 |
| 9.2. Cableado | 84 |
| 9.3. Protecciones..... | 85 |
| 9.4. Cargador | 86 |
| 9.5. Autonomía | 87 |
| 9.7. Tiempo de carga y consumo | 89 |
| 11. INTERCONEXIONADO..... | 102 |
| 12. RENDIMIENTO..... | 103 |
| 13. PRESUPUESTO | 105 |
| 14. PLANIFICACIÓN | 106 |
| 15. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES | 107 |
| 16. NORMAS Y LEYES | 110 |
| 17. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS | 111 |

1. INTRODUCCIÓN

El cortacésped de tipo tractor o autoportante (“riding mower”) es un máquina que utiliza unas cuchillas o algún otro tipo de accesorio para cortar, generalmente césped o hierba de grosor fino y de no mucha altura. Es decir, se utiliza en el mantenimiento de superficies o espacios con hierba que cumplan los requisitos de uso del aparato. Su ámbito de aplicación, son las superficies deportivas y los jardines de extensión media (más de 3000 m²).

Desde la crisis del petróleo de 1973 se han estado buscando fuentes alternativas al petróleo, al ser este fósil fuente de grandes especulaciones tanto económicas como políticas y utilizado por muchos países como medida de presión. Por ello desde la década de los 80 se han realizado numerosos experimentos y prototipos de vehículos con motor eléctrico.

En esta última década debido a la gran inversión realizada por algunos estados y empresas, se han obtenido avances significativos en el campo de la propulsión eléctrica. Su principal inconveniente, la autonomía de los sistemas de almacenaje de electricidad, ya no es tan grande como en décadas pasadas y ahora ya se pueden realizar vehículos con autonomía suficiente para que sean competitivos en el mercado.

A partir de 1997 debido a las restricciones de emisiones de CO₂, impuestas por algunos estados debido mayoritariamente a la firma del Protocolo de Kioto, los esfuerzos para sustituir motores de combustión de derivados del petróleo por motores eléctricos o por motores que usan bioetanol o biodiesel, han hecho que adquiera un nuevo interés por parte de las empresas en fabricar nuevos sistemas de propulsión sobre todo eléctricos.

Numerosos colectivos tanto privados como públicos, especialmente universidades, han estado realizando numerosas conversiones experimentales de vehículos con motor de explosión, a los que se les cambia íntegramente el motor por uno eléctrico así como sus sistemas de almacenamiento de energía.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

También hay que destacar las nuevas normas sobre la llamada contaminación acústica. Este aspecto aunque pasa casi desapercibido también es una de las causas por las que se va a realizar el cambio de motor de combustión a motor eléctrico, ya que la cantidad de ruido generada durante el tiempo de trabajo del cortacésped es bastante elevada y puede llegar a ser perjudicial para el operador, si este no toma alguna medida de precaución. Por ello, la disminución de ruido es una consecuencia del cambio del motor del cortacésped bastante interesante.

El Instituto Superior Politécnico de Viseu ya ha realizado estudios sobre vehículos comerciales tales como automóviles y cuatrimotores (ATV y Quad). La más exitosa ha sido la conversión de un automóvil de la marca Volvo de motor de gasolina a motor eléctrico y sus respectivas modificaciones para el buen funcionamiento del sistema en su conjunto.

Ahora tenemos que realizar un estudio y la conversión de una máquina herramienta de pequeño tamaño para ver su viabilidad a corto-medio plazo. Por ello se ha seleccionado una máquina cortacésped de tipo tractor debido a su reducido peso y poca velocidad de crucero.

En este proyecto se asumirá una fase preliminar de estudio en donde se tendrán en cuenta los objetivos a cumplir, así como el grado de consecución de los mismos. Con todo ello, se afrontará la creación del proyecto llegando hasta el nivel anterior a la conversión y adaptación del motor y su controlador. De igual modo, se adjuntarán los correspondientes documentos necesarios para la ejecución del proyecto.

2. ANTECEDENTES

2.1. Historia

La primera máquina manual cortacésped fue inventada por Edwin Budding (1795-1846) en 1827 en la ciudad inglesa de Gloucestershire. Su oficio de carpintero le ayudo a idear un ingenio basado en el mecanismo rotativo de los telares para cortar lana. Su idea fue la de sustituir la guadaña para el mantenimiento de jardines y campos deportivos por otro sistema que fuera mas sencillo y requiriera menos tiempo y esfuerzo por parte del propietario. Téngase en cuenta que en Inglaterra se practicaba por aquel entonces un rugby rudimentario en colegios y en los festivales de los pueblos y se requerían superficies mas o menos grandes para el desarrollo del juego.

En 1830 la patente fue adquirida por otro inglés, John Farrabee, llegando a un acuerdo con Budding sobre el desarrollo y venta de licencias a otros fabricantes. En 1859 aparecía el primer cortacésped con transmisión por cadena.

Poco a poco, el auge del ferrocarril posibilitó una mejor comunicación entre ciudades y fomento las competiciones deportivas, sobre todo rugby, entre ciudades. Por ello la aparición de superficies deportivas, requirió un mantenimiento de la hierba del terreno de juego en donde el cortacésped adquirió una ventaja sobre el uso de la tradicional guadaña. Ya en 1860 la fabricación de cortacésped adquirió un mayor volumen.

En 1870, Elwood McGuire of Richmond, desarrolló un cortacésped sencillo, ligero y lo más importante, para su funcionamiento solo era necesario que el operador lo moviera por la superficie a cortar. Tuvo mucho éxito de ventas. Todos estos cortacéspedes tenían el sistema de corte de tipo cilíndrico y en 1899 John Burr patentó un sistema de cuchillas rotatorias. Otro aspecto importante que sufrió una importante mejora tiene que ver con que todos estos sistemas eran de tracción humana o animal, y no fue hasta 1893 cuando James Summer, hijo de un propietario de una tienda de útiles de ingeniería, patentó el primer cortacésped con motor de vapor. El motor usaba petróleo o queroseno como combustible.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

En los cortacéspedes rotatorios, no fue posible aplicar un motor de combustión hasta que estos no fueron lo suficientemente pequeños y potentes para mover las cuchillas a altas velocidades. Se hicieron numerosas pruebas durante la década de los 20 y los 30 pero no fue hasta 1952 cuando la empresa Victa desarrolló un nuevo cortacésped mucho más ligero y fácil de utilizar que los cortacéspedes anteriores.

El cortacésped usado para la transformación es un cortacésped tractor. Los primeros prototipos de tractores aparecieron a principios del siglo XX, pero el primer tractor que tuvo algo de éxito fue en los Estados Unidos en 1911. En Inglaterra también fue desarrollado en 1902 y después en 1908 un tractor de 4 ruedas.

El primer tractor en producirse en masa fue el Fordson, que fue diseñado y construido por la marca de Henry Ford en 1917. Este tractor acaparó el 77% del mercado de tractores en los Estados Unidos. A partir de 1920 los tractores más comercializados fueron los de motor de combustión interna.

Los tractores de jardín o cortacésped tractor se caracterizan por ser vehículos de pequeño tamaño, ligeros y simples. Están concebidos para cortar hierba sobre todo en medias y grandes superficies (campos de fútbol, campos de golf, grandes jardines,...). Están equipados con cobertura de corte rotativo horizontal. Poseen un motor vertical con una transmisión por correa de tipo diferencial. Suelen tener varias posiciones de la altura de las cuchillas y unas 5-6 marchas.

Los primeros modelos eran tractores de tipo agrícola con un corte frontal o trasero que ejercían la labor de mantenimiento de campos deportivos y grandes extensiones de jardín. A finales de los años 30, debido a la sustitución de los antiguos tractores agrícolas por otros mucho más novedosos, numerosos motores y otras piezas fueron puestas a la venta cosa que aprovecharon algunos fabricantes y así aparecieron algunos modelos más reducidos de tractores que fueron concebidos para su uso exclusivo en jardines, obteniendo pequeños éxitos de venta sobre todo en los Estados Unidos.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

En los años 70, muchas marcas también se lanzaron a comercializar cada vez más cortacéspedes para uso en instalaciones deportivas amateurs y para jardines reduciendo el peso y el consumo de los mismos.

Los prototipos eléctricos han sufrido grandes avances en el siglo XXI, sobre todo debido a la mejora de los sistemas de almacenaje de electricidad. Esta tecnología proviene enteramente del ámbito de la investigación del automóvil eléctrico y de la mejora de sus baterías.

2.2. Tipos

Hay que diferenciar varios tipos de cortacésped, fundamentalmente según el tipo de rotación de las cuchillas de corte y según su la energía empleada.

Según el tipo de rotación de las cuchillas podemos encontrar:

- CILÍNDRICOS:

Su sistema de corte se basa en el movimiento de unas cuchillas casi horizontales que están inclinadas para un mejor corte que con el de tipo rotativo. Los primeros modelos tenían este tipo de corte. Son comunes con motor eléctrico pero son bastante más caros que los rotatorios.

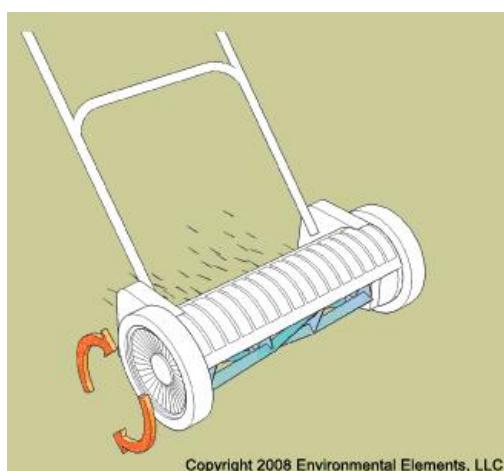


Imagen 1 – Cortacésped cilíndrico.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- ROTATIVOS:

Mucho mas baratos que los cilíndricos y menos complejos mecánicamente. Son de los que mas abundan en el mercado debido a su bajo precio y sencillez de uso y mantenimiento. Los hay mayoritariamente de tipo eléctrico y de gasolina.

Su funcionamiento se basa el giro horizontal de una cuchilla rectangular estrechada en cada extremo y afilada. Su mayor inconveniente es que la cuchilla debe girar a un mínimo de velocidad para que el corte de la hierba sea eficiente. Por ello al arrancar uno de estos aparatos hay que dejar que coja la suficiente velocidad y la cuchilla que gire libre durante un breve periodo de tiempo.

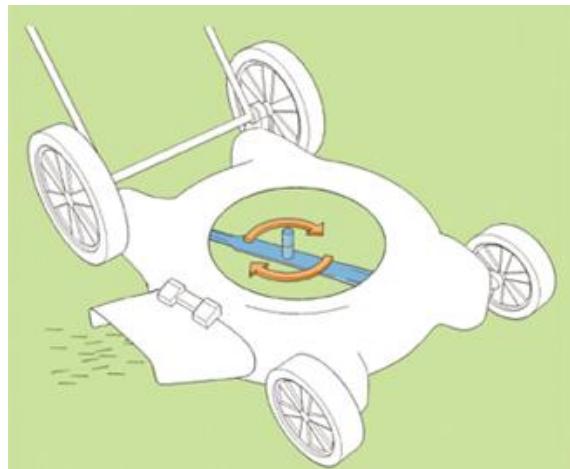


Imagen 2 – Corta relva rotativo

También consideramos rotativos a los cortacéspedes de tipo “hover”. Estos cortacéspedes tienen el mismo sistema de corte aunque la cuchilla es mucho menos pesada ya que la lámina es de acero fino o de plástico. Poseen un faldón en forma cuadrangular que rodea las cuchillas y su zona de giro. La rotación de las cuchillas genera un movimiento vertical de aire, el cual se escapa por debajo de los faldones lo que provoca que el cortacésped se eleve unos centímetros por encima del suelo. A su vez ese movimiento también corta la hierba.

Y según el tipo de energía que consumen pueden ser:

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- CON MOTOR DE GASOLINA:

Usado por la mayoría de los cortacéspedes rotativos que utilizan un motor de combustión interna de gasolina. Los motores pueden ser de dos tiempos o de cuatro. Poseen un cilindro y tienen una potencia comprendida entre los 1,6 y 6,5 kW. Los de tipo tractor pueden desarrollar mucha mas potencia, los medianos suelen ser de 20HP y los de gama mucho mayor alcanzan hasta los 60HP. La mayoría utilizan carburador y tienen que ser arrancados de manera manual.

- ELÉCTRICOS

Son mucho más silenciosos que los de gasolina, generan menos de 75 decibelios frente a los 95 o más decibelios que pueden llegar a generar uno de gasolina. Pueden ser alimentados mediante un cable a la red o con baterías.

- Con cable: tienen menos alcance, ya que los cables suelen tener una extensión máxima de unos 75 metros y son bastante peligrosos para el usuario ya que trabajan con voltaje de 230v (red doméstica). En cambio tienen varias ventajas prácticas, ya que son muy baratos, tienen mayor fiabilidad y son poco contaminantes.

- Sin cables: la energía es generalmente dada por unas baterías (de 1 a 4) de 12v y recargables. Poseen la misma maniobrabilidad que sus homólogos de gasolina, son menos contaminantes y mucho más caros que los cortacéspedes eléctricos con cable.

- BIODIESEL

En la última década han aparecido conversiones caseras de motores de cortacéspedes con este tipo de combustible aunque su aceptación no ha sido muy grande y su comercialización bastante escasa. Poseen un mejor rendimiento energético y menos contaminación pero su precio muchas veces es el triple que uno eléctrico o de gasolina.

3. REQUISITOS DE DISEÑO

La propuesta consiste en:

- Crear un cortacésped sin emisiones de CO₂ u otro tipo de gas nocivo para el ser humano y el medio ambiente.
- Que se reduzcan de manera significativa el ruido producido ya que estos aparatos trabajan bastante cerca de los despachos y aulas de la Universidad
- Que sea un sistema suficientemente autónomo, es decir que funcione sin ningún enlace directo con la red eléctrica.
- Que sea recargable para toma de 230V/50Hz.
- Se usaran 4 baterías, de 12 V cada una, que sean compatibles con los cargadores de la universidad.
- Uso del cortacésped en recinto acotado al aire libre y en condiciones diurnas.
- Que monte un motor o dos.
- Que utilice un microcontrolador o dos.
- **CARACTERISTICAS FISICAS:**
 - El peso del cortacésped resultante no sobrepase en exceso al cortacésped original.
 - El chasis debe conservar su estructura y forma original.
 - Mantener el máximo de componentes originales.
 - Que pueda trabajar con pendientes máximas del 20%.
 - Peso medio del operador 80kg.
- **CARACTERISTICAS AMBIENTALES DE FUNCIONAMIENTO:**
 - Rango de Temperaturas entre -10° C y 40° C
 - Rango de Humedad relativa entre 5% y 90%

4. CÁLCULOS MECÁNICOS

En este apartado se realizaran los cálculos mecánicos necesarios para dimensionar las necesidades técnicas que tendrá que afrontar el motor.

4.1. Cálculo de las masas del vehículo

Haremos una estimativa del peso que podrá tener en condiciones máximas el cortacésped. Algunos parámetros son en condiciones máximas de funcionamiento y otros son estimaciones de peso, que podrán ser menores, pero que nunca podrán ser sobrepasadas en ningún momento.

Antes de hacer ningún cálculo el cortacésped fue desmontado de los elementos que eran innecesarios para el funcionamiento con electricidad. También fue pesado en el departamento de Mecánica, dentro de la “Escola Superior de Tecnología e Gestão de Viseu”, con básculas.

Para el caso del operador, es una simple media de peso entre la población portuguesa. Podrá ser rebasada ya que se han puesto márgenes de error y el motor estará sobredimensionado, pero no se recomienda que exceda mucho el peso recomendado. Por tanto las masas en condiciones normales de funcionamiento del cortacésped son:

- Estructura del cortacésped: **113.8 Kg.** La estructura del cortacésped esta desprovista del motor de combustión, del cableado interno, de una cubierta de plástico protectora del motor y de la polea de transmisión.
- Baterías: 4 baterías de 11.16 Kg cada una, en total **44.64 Kg.**
- Motor: **11 Kg.**
- Micropresesador: será de tipo medio de la marca Sigma, entonces **4.1 Kg.** (Peso marcado en el “datasheet” de esa compañía, el por qué de su elección en el apartado 7.9.).
- Cables: aproximadamente unos 5 metros, **3 Kg.**
- Otros componentes eléctricos: aproximadamente unos **3kg.**

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Recoge-hierba cuando está lleno de hierba: **10 Kg.**
- Peso normal de un operador: **80 Kg.**

La masa en condiciones de trabajo aproximadamente será de **270 Kg.**

La masa del cortacésped es de aproximadamente **190 Kg.**

4.2. Fuerzas actuantes

Aquí analizaremos todas las fuerzas que suponen un esfuerzo para el motor. En el caso de la velocidad media del aire en la ciudad portuguesa de Viseu, es una media, es decir que la velocidad podrá ser mayor o menor, pero aunque exceda la velocidad media, el motor no correrá peligro y el rendimiento de la máquina no se resentirá en exceso ya que hay un margen de seguridad y el motor estará sobredimensionado.

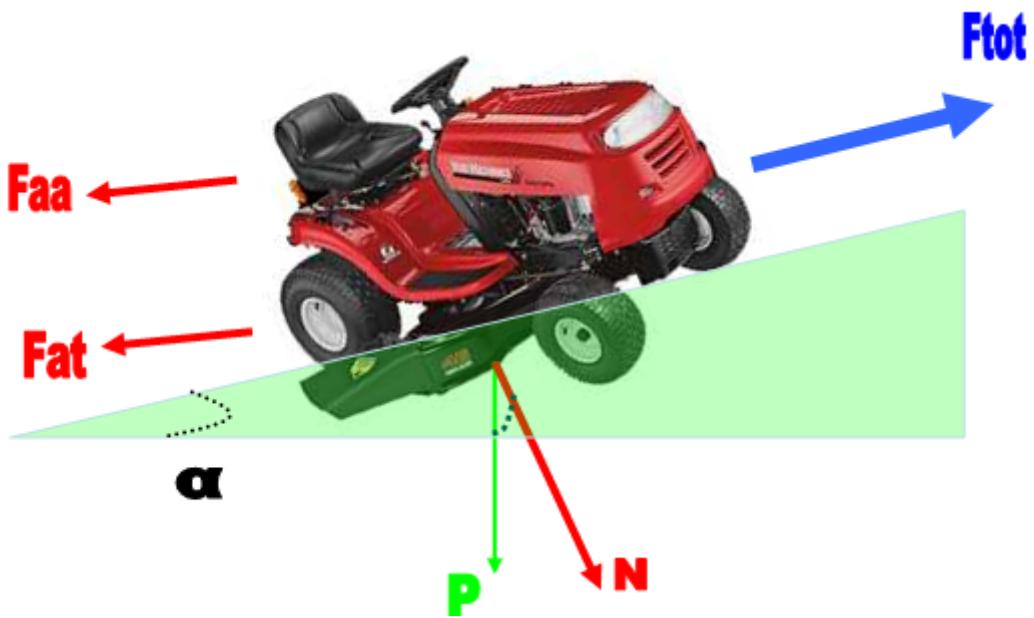


Imagen 3 – Fuerzas en el corta césped.

Fuerza de arrastre aerodinámico (Faa)

Faa – Fuerza de arrastre aerodinámica.

A – Área frontal del vehículo.

Cd – Coeficiente de arrastre.

ρ – Densidad del aire.

V – Velocidad.

$$F_{aa} = \frac{1}{2} \times A \times Cd \times \rho \times V^2$$

- El área frontal de nuestro cortacésped es de 0.4 m².
- El Cd es 0.6.
- La densidad del aire es 1.29.
- Velocidad = Velocidad de crucero del cortacésped + Velocidad media del aire en Viseu=10km/h (2.77m/s) + 10km/h (2.77m/s).

$$F_{aa} = \frac{1}{2} \times 0.4 \times 0.6 \times 1.29 \times (2.77 + 2.77)^2 = 4.75 \text{ Nm}$$

Fuerza en pendiente máxima estimada

La pendiente máxima de trabajo está especificada en los requisitos de diseño (apartado 6). La pendiente máxima es la pendiente mayor que se puede encontrar en los campos de alrededor de la “Escola Superior de Tecnología e Gestão de Viseu”. Dado que el concepto del proyecto, es que este cortacésped trabaje en dichas instalaciones.

Fx o F_1 - Fuerza paralela al plano. g – Fuerza de la gravedad (9,8m/s²).

Fy o F_2 – Fuerza perpendicular al plano.

α – Ángulo de inclinación.

m – Masa.

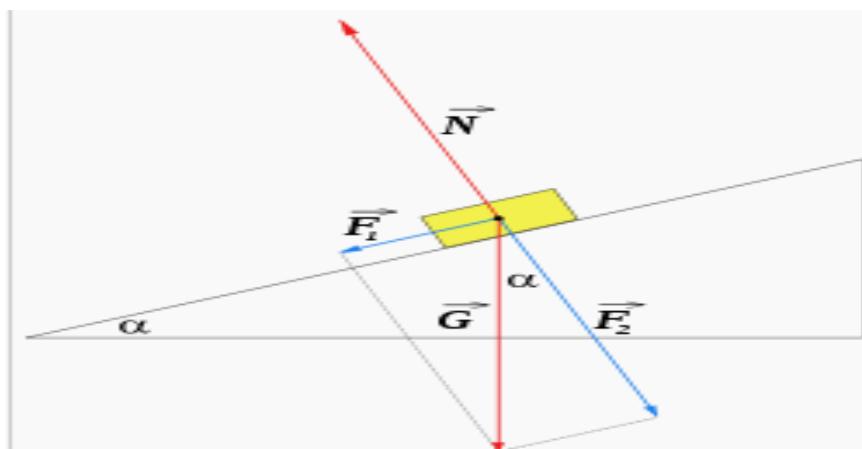


Imagen 4 – Fuerzas en pendiente.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

$$F_1 = \bar{G} \times \sin \alpha$$

$$F_2 = \bar{G} \times \cos \alpha$$

Con:

$$\bar{G} = m \times g$$

$$F_R = \mu \times F_2$$

Entonces, con un coeficiente de fricción de 0.3:

$$F_t = F_1 + F_R = m \times g \times \sin \alpha + m \times g \times \cos \alpha \times \mu = 270 \text{kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \sin 20^\circ + \\ 270 \text{kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \cos 20^\circ \times 0.3 = 1650.91 \text{N}$$

Fuerza de Fricción Rotacional

La fuerza de fricción rotacional se presenta cuando un cuerpo rueda sobre una superficie, deformándose una de ellas. Es una fuerza resistiva que hay que tener en cuenta.

F_{at} – Fuerza de fricción rotacional.

C_{rr} – coeficiente de fricción rotacional (0.055 para superficies de hierba y arena).

m – Masa.

g – Fuerza de la gravedad (9.8m/s^2).

α – Ángulo de inclinación.

$$F_{at} = C_{rr} \times N = m \times g \times \cos \alpha \times C_{rr} = 270 \text{kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \cos 20^\circ \times 0.055 = 136.75 \text{N}$$

Fuerza total requerida por la rueda

Es la suma de todas las fuerzas calculadas, entonces:

$$F_{total} = F_{aa} + F_t + F_{at} = 4.75N + 1650.91N + 136.75N = 1792.41N$$

4.3. Par necesario para el movimiento

Aquí calcularemos el par que necesita el cortacésped para funcionar con esas condiciones máximas en las ruedas motoras. Dichas ruedas fueron medidas experimentalmente en el taller y cotejadas en los planos tal como el resto de medidas.

Nota: en Portugal el Par es conocido como “Binário” y su letra no es la M, como es España, sino que es la T. Mantengo esa nomenclatura, ya que no puede dar lugar a equívocos puesto que además en todas las cuentas las unidades son las del Par, Nm.

Par necesario de la rueda

T_{rueda} – Par necesario por la rueda.

F_{total} – Fuerza requerida por la rueda.

r – Radio de la rueda.

$$T_{rueda} = F_{total} \times r = 1792.41N \times 0.21m = 376.4Nm$$

Par necesario por el motor

T_{motor} – Par necesario por el motor.

T_{rueda} - Par necesario por la rueda.

R – Relación entre las poleas.

$T_{motor} = T_{rueda} \times R = 376.4N \times R$, tenemos que calcular la relación final entre las poleas y el motor R. (Ver apartado 7.6)

A) Relación entre la caja de velocidades y la rueda

Esta parte ha sido realizada de manera empírica en el taller de vehículos eléctricos de la “Escola Superior de Tecnología e Gestão de Viseu” forzando dichas poleas a realizar vueltas. Esto es debido a que el desmontaje de todas y cada una de las poleas y su posterior montaje podría acarrear problemas para el posterior buen funcionamiento, además de resultar un método innecesario dadas las alternativas. Las medidas fueron cotejadas con los planos encontrados del antiguo modelo de cortacésped, el MTD JE-130, y el resultado es que 1 vuelta de rueda son 24 vueltas de la polea de la caja de velocidades, entonces la relación es:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \text{ donde } n_1 \text{ e } n_2 \text{ son respectivamente las r.p.m. de las poleas motora y movida, y}$$

D_1 y D_2 son respectivamente los diámetros de las poleas motora e movida.

$$\text{La relación es } R = \frac{D_2}{D_1} = \frac{24}{1} = 24$$

B) Relación entre la polea intermedia y la caja de velocidades

La polea intermedia está unida con otra por un eje, es una polea compuesta.

$$R = \frac{D_2}{D_1} = \frac{186}{28}$$

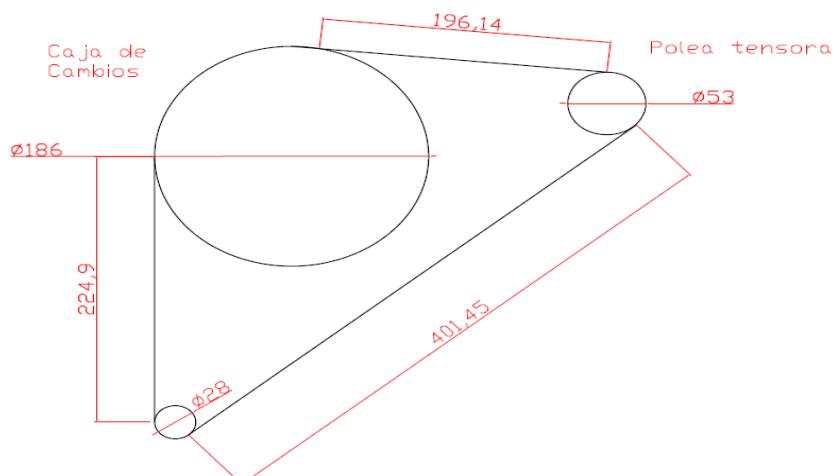


Imagen 5 – Polea intermedia y caja de cambios-velocidades.



Imagen 6 – Poleas y caja de velocidades.

C) Relación entre la polea del motor y la polea intermedia

$$R = \frac{D_2}{D_1} = \frac{94}{122}$$

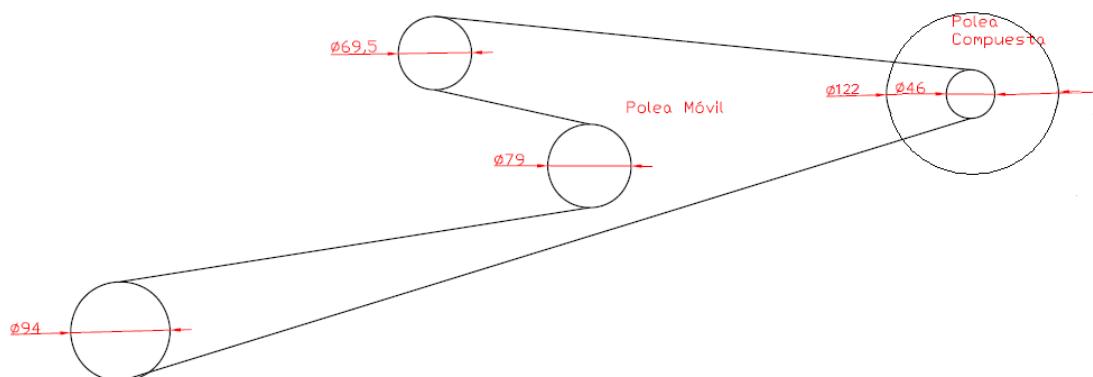


Imagen 7 – Polea del motor y polea intermedia.

D) Relación entre la transmisión del motor y la polea del motor

Tiene que ser una relación para que se cumplan los parámetros de Par del motor. Pero como esta relación era con el motor de combustión, ahora tenemos que rehacerla para el motor eléctrico. Ya que según sea el tamaño de esta polea, la relación R variará. Por ello debemos establecer todos los parámetros y finalmente elegir el tamaño o relación R que satisfaga nuestras exigencias finales. Eso se muestra en el apartado 7.6.

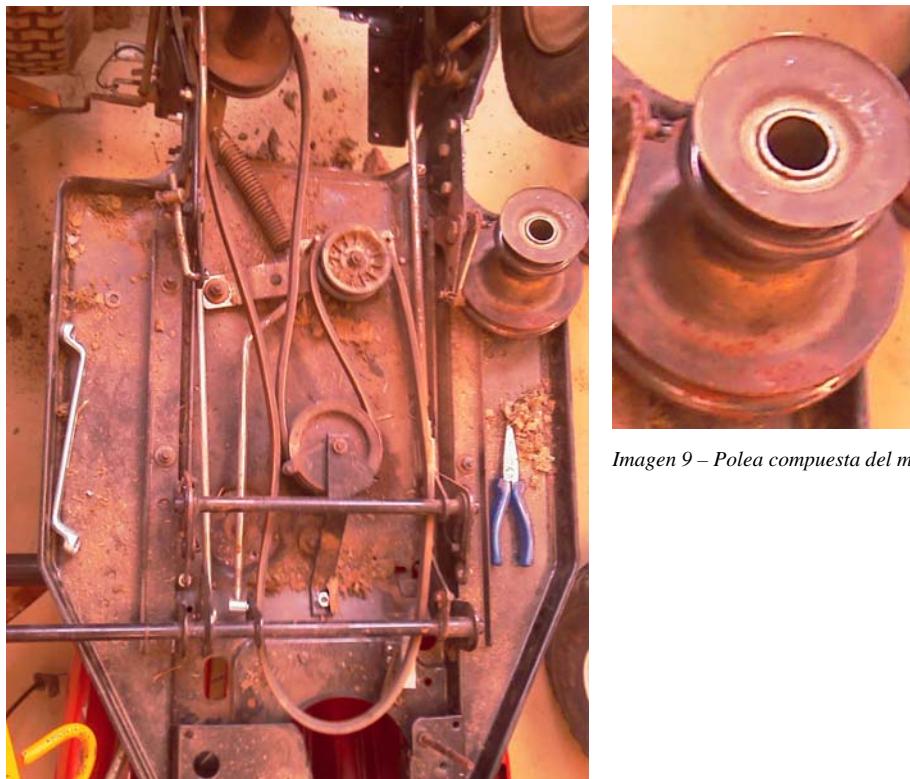


Imagen 9 – Polea compuesta del motor.

Imagen 8 – Poleas intermedias, polea móvil (la más pequeña) y polea compuesta del motor (a la derecha).

4.4. Revoluciones y potencia necesarias

Originalmente el motor del cortacésped era un Briggs & Stratton “Power Built” de 13 H.p. (MOTOR B&S 13.0HP I/C DL12) con una velocidad máxima de rotación 3600 r.p.m. y en régimen nominal de 2700 r.p.m.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Así que nuestro cortacésped deberá poseer las mismas características o superiores de velocidad de rotación para que se mantenga en principio un correcto funcionamiento del mismo. Los caballos de vapor necesarios (potencia) serán calculados y dimensionados y puede que sean necesarios menos que cuando estaba el motor de combustión, ya que el rendimiento del motor eléctrico será siempre superior, sin embargo a la hora de buscar motores debemos guiarnos por la potencia del viejo motor, y por tanto es la que se calcula a continuación.

En condiciones de máxima velocidad las r.p.m. necesarias son:

V – Velocidad máxima del cortacésped en m/s.

d – diámetro da rueda en m.

n – rotaciones por minuto.

$$V = \frac{2 \times \pi \times d \times n}{60}$$

Tenemos que pasar primero de km/h a m/s, entonces:

$$km/h \rightarrow \frac{1000 \text{metros}}{3600 \text{seg}} \times \text{velocidad} \rightarrow 10 \times \frac{1000}{3600} = 2.77 \text{m/s}$$

$$V = \frac{2 \times \pi \times d \times n}{60} \leftrightarrow 2.77 = \frac{2 \times \pi \times 0.42 \times n}{60} \leftrightarrow n = 63.15 \text{rpm}$$

A partir de ahí dimensionamos las sucesivas transformaciones hasta llegar a la velocidad motor, en el apartado 7.6.

La potencia del motor deberá ser por lo menos, la correspondiente al motor de combustión:

$$P = 13 \times 735,5 = 9561.15 \text{W}$$

5. ANÁLISIS DE SOLUCIONES

En este apartado se trataron las diferentes soluciones que se pueden adoptar en la conversión e instalación del motor y controlador para que el cortacésped funcione íntegramente con energía eléctrica.

5.1. Motor

Un motor eléctrico es un mecanismo que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de fenómenos de electromagnéticos, y existen numerosos tipos tanto por su construcción como por su funcionamiento o alimentación. Estudiamos los diferentes tipos, su funcionamiento, así como sus principales ventajas e inconvenientes, para una correcta elección.

5.1.1. Motor de inducción

A diferencia del resto de maquinas eléctricas rotativas, en los motores de inducción o asíncronos no existe corriente conducida por el arrollamiento del rotor, sino que ésta, se debe a la fuerza electromotriz inducida en el devanado rotórico por el flujo generado en el devanado estatórico.

Este motor puede funcionar como generador y como motor. Como generador lo podemos encontrar en las minicentrales hidroeléctricas y en algunas eólicas. En cambio su funcionamiento como motor es muy amplio y es el más usado en la industria.

Ha desbancado a la máquina de corriente continua en los procesos industriales debido al gran avance de la electrónica de potencia en el desarrollo de dispositivos capaces de controlar a la máquina asíncrona con la precisión requerida para los procesos. Sin embargo, algunos procesos permanecen fuera del alcance de la máquina asíncrona debido a la inexistencia de un control capaz de dar las prestaciones exigidas. Estos procesos son los que trabajan con grandes potencias y el de los controles de velocidad de alta precisión. Cuando la carga mecánica sobre el motor es muy grande y se reduce la velocidad, puede quedar fuera de fase con la frecuencia de la corriente y pararse.

A la hora de elegir una solución óptima debemos tener en cuenta los tipos de máquinas asincrónas que nos podemos encontrar. Por ello, según sea la alimentación tenemos:

- Monofásicas: son las utilizadas en instalaciones monofásicas tales como lavadoras, ventiladores domésticos, pequeñas bombas de agua, etc.
- Trifásicas: alimentadas mediante un sistema trifásico de tensiones que son generalmente las usadas en los procesos industriales. En este caso las descartamos automáticamente.

Según el tipo de devanado rotórico encontramos:

- Rotor de jaula de ardilla: esta formado por conductores de cobre a de aluminio cortocircuitados por ambos lados mediante los anillos de cortocircuito. Este tipo de construcción es el más robusto, tiene un peso bajo y además es el más simple. Por ello es el más barato y es el más utilizado en accionamientos de velocidad constante.

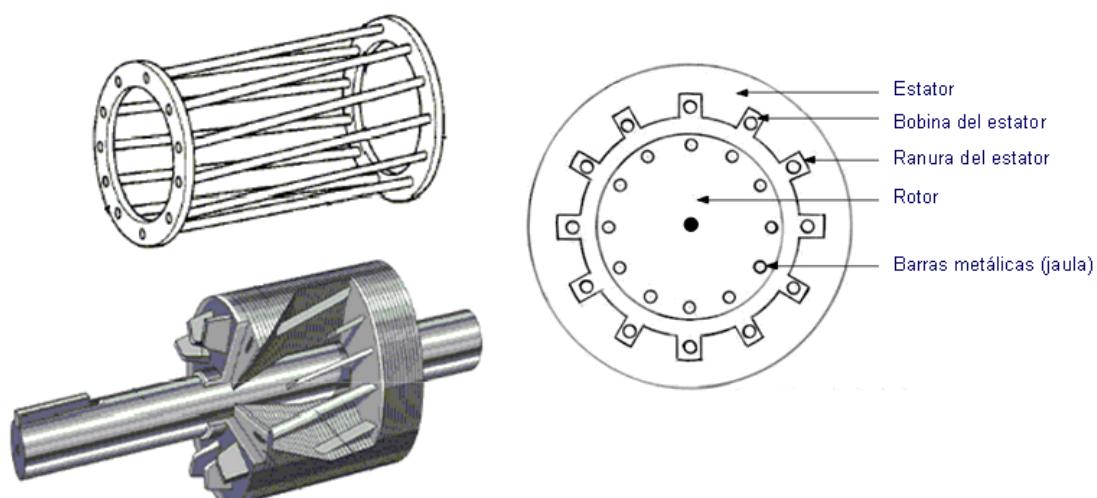


Imagen 10 – Rotor de Jaula de Ardilla y conductores en cortocircuito.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Rotor bobinado: esta formado por un devanado trifásico similar al existente en el estator y siempre con el mismo número de polos. Las tres fases están siempre conectadas en configuración tipo estrella en un extremo, permaneciendo el otro extremo conectado a unos anillos rozantes, situados sobre el eje y que giran solidariamente con él. Estos anillos son accesibles desde el exterior mediante tres escobillas que permiten la conexión de resistencias externas para limitar las corrientes en el arranque y controlar las características de par y velocidad. En igualdad de clase protección y de potencia, es más costoso, menos robusto y sobre todo exige un mayor mantenimiento que los de jaula de ardilla. Sin embargo, también poseen algunas ventajas. La característica del circuito eléctrico del rotor puede ser modificada desde el exterior en cada instante que se desee. También la tensión e intensidad por el rotor son directamente accesibles al control o medida de tipo eléctrico.

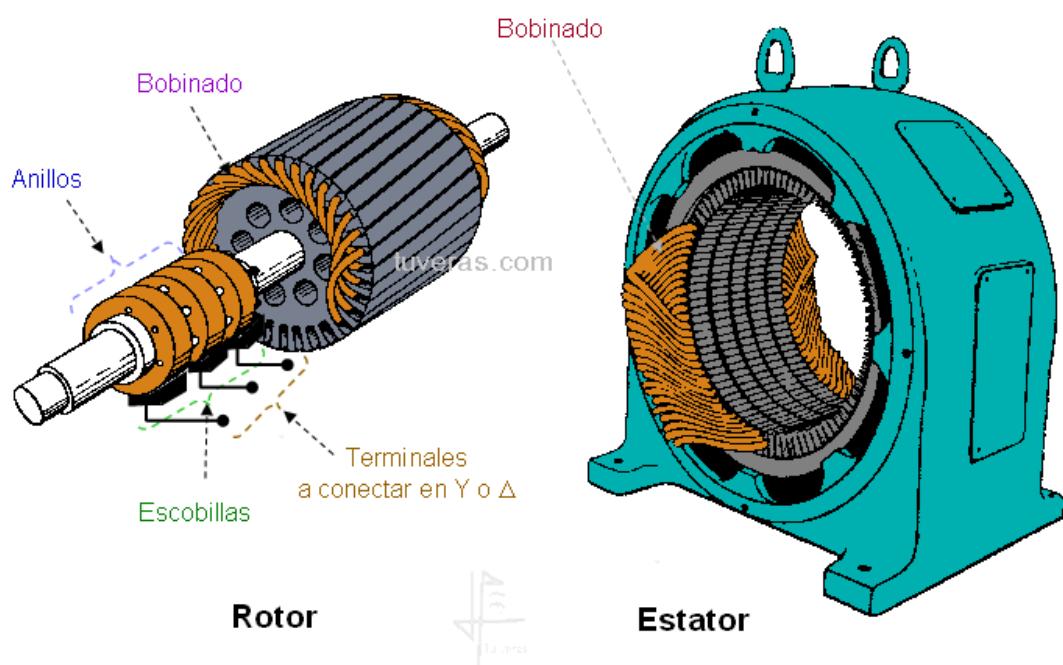


Imagen 11 –Rotor bobinado y anillos rozantes

Las ventajas principales de los motores de inducción son:

- Sobre todo su simplicidad, que se traduce en un bajo coste y fácil mantenimiento.
- Unas buenas prestaciones con el uso de variadores electrónicos de velocidad mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.
- Mejor rendimiento general que con los motores de corriente continua, ya que los motores asíncronos carecen de escobillas.
- Mas económicos a nivel de comercialización que los de corriente continua.

En cambio sus desventajas principales son:

- Los variadores necesarios para su control son muy caros.
- Las baterías proveen energía continua y estos motores necesitan energía alterna para su correcto funcionamiento. Por lo que habrá que usar un convertidor electrónico de potencia o un inversor que transforme esa electricidad de continua a alterna, lo cual supondrá un mayor coste en el producto final.

De lo cual se deduce que para nuestro caso el inconveniente de los variadores electrónicos, y los inversores, debido a la alimentación que será usada, representa un grave inconveniente al elevar el precio y complejidad del diseño del producto. No obstante comentaremos los diferentes controles antes de desechar por completo dicha opción, ya que si hubiera posibilidad de un control sencillo y no demasiado costoso podríamos finalmente decantarnos por dicha opción.

5.1.2. Motor CC sin escobas o Brushless (BLDC)

Son motores que han ganado rápidamente mucha fama. El motor BLDC es un tipo de motor síncrono, esto significa que, el campo magnético generado por el estator y el campo magnético del rotor gira a la misma frecuencia. Al no tener escobillas ni colector, este motor es muy utilizado en aplicaciones donde el desgaste de las escobillas

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

resulta muy elevado. Las corrientes son conmutadas electrónicamente en el estator creando un campo magnético que es responsable del movimiento del rotor.

Según la disposición de los elementos en el motor, los BLDC pueden ser divididos en dos categorías. Aquellos en los que el flujo magnético circula en la dirección radial, utilizados por ejemplo en bombas de sangre, y aquellos en los que el flujo magnético circula en dirección axial, utilizados sobre todo en las unidades de disco de los ordenadores.

Vamos a comentar de los primeros que son los más interesantes para nuestro proyecto y que pueden ser a su vez de dos tipos en relación al rotor:

- Motor de imanes superficiales o polos lisos donde las inductancias de eje y cuadratura son prácticamente iguales y constantes. El motor con imanes superficiales presenta una limitada capacidad para operar en velocidades por encima de la nominal, a potencia constante, debido a la baja inductancia resultante del gran entrehierro.
- Motor de imanes internos o polos salientes con los imanes montados internamente en el rotor. En estos últimos debido a los salientes del rotor, tienden a producir inductancias L_d y L_q diferentes. Esta circunstancia produce par de reluctancia que, sumado al par electromagnético debido a los imanes, produce un par resultante mayor. Además de eso, los motores de imán interno son capaces de operar en un gran rango de velocidades por encima de la velocidad nominal, a potencia constante. Otra ventaja del motor con imán interno sobre es de imanes superficiales es que están insertados en el interior del rotor, lo que permite que el imán quede protegido contra la fuerza centrífuga.

Respecto al estator hay también dos tipos: trapezoidal y sinusoidal. Esta diferenciación tiene como base la interconexión de las espiras en los bobinados del estator para dar los diferentes tipos de fuerza contraelectromotriz. Como sus nombres indican, el motor

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

trapezoidal genera una F.C.E.M trapezoidal y el motor sinusoidal genera una F.C.E.M. sinusoidal. Además de este tipo de F.C.E.M. que genera el motor también las corrientes de fase sufren variaciones trapezoidales o sinusoidales según el tipo de carga con la que estemos operando.

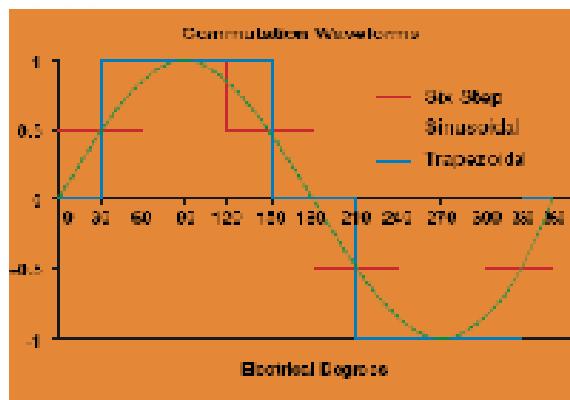


Imagen 12 –Curva característica del motor BLCD tipo trapezoidal

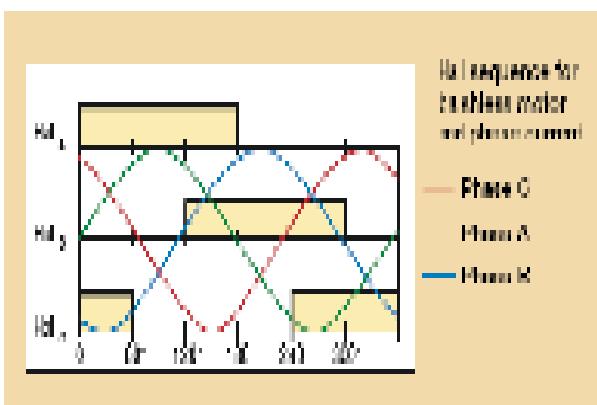


Imagen 13 –Curva característica del motor BLCD tipo senoidal

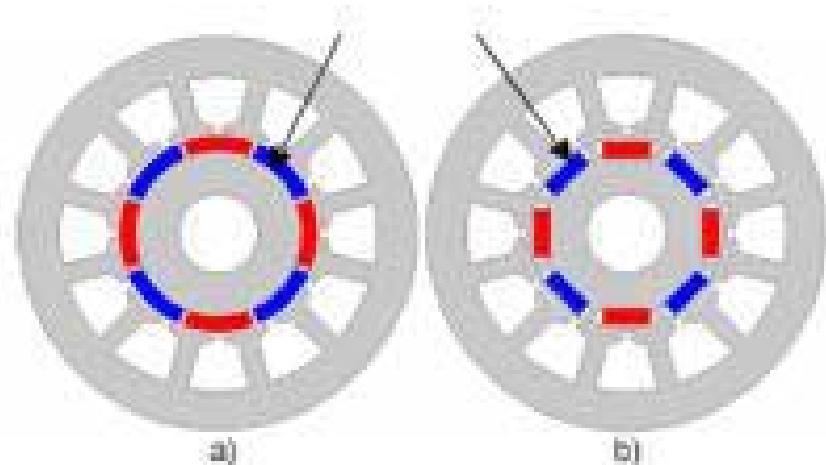


Imagen 14: Las figuras muestran los dos tipos de motor sin escobillas según tipo de rotor (polos lisos o salientes)

El funcionamiento de un motor BLDC es muy parecido al de un motor de paso, es decir, por medio de la conmutación estratégica de las bobinas del estator es posible alterar la orientación del campo electromagnético producido y, gracias a eso, controlar el movimiento del rotor.

Para entender la base del funcionamiento del motor, fijémonos en el principio de funcionamiento del motor CC con escoba, ya que el primero representa la solución intrínseca al problema del último. Así que si a un motor CC básico con escoba le colocamos las espiras en los polos del estator, y los imanes permanentes en el rotor, y además un dispositivo responsable de la conmutación de la corriente (precisamente la función de las escobillas), entonces ya podemos decir que tenemos prácticamente un BLDC.

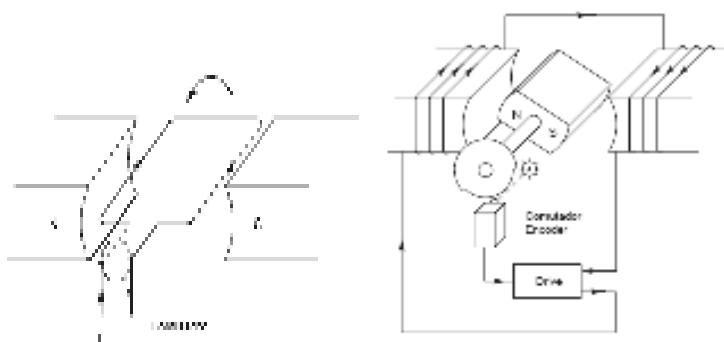


Imagen 15: Muestra el principio de funcionamiento del motor CC y a continuación la posible solución

El control del motor BLDC se efectúa mediante la conmutación estratégica de las bobinas del estator. Por medio de este tipo de control podemos además decidir la dirección de la rotación del motor alterando la orientación del campo magnético. El funcionamiento, es análogo al de un motor de corriente continua pero al que se le han colocado espiras en los polos del estator e imanes permanentes en el rotor asociándolos

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

a un dispositivo de control. Si aumentáramos el número de polos podríamos mejorar su rendimiento.

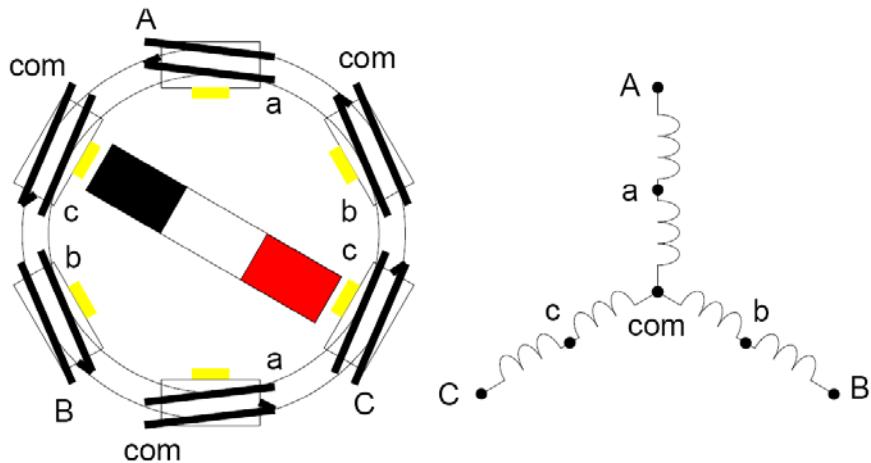


Imagen 16 – Esquema de funcionamiento del motor BLCD para 3 fases y 2 polos

Cuando una de las tres fases está conduciendo, un imán es atraído y se coloca en su respectiva posición en relación a donde está colocada la bobina que está conduciendo. Para el control necesitaremos de componentes o dispositivos electrónicos típicos que permitan la conmutación de cada una de las fases tales como MOSFETs, IGBTs, transistores bipolares simples, microcontroladores, etc.

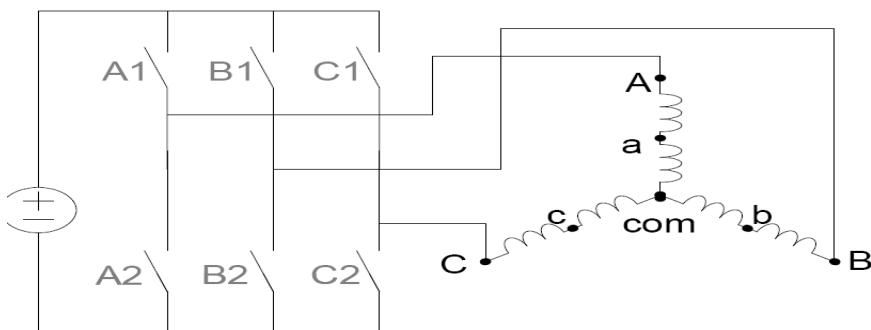


Ilustración 17 – La figura muestra de un modo muy esquemático como sería el control de dicho motor

Para un control más preciso podemos utilizar sensores de efecto Hall y un sensor de posición de alta resolución para mantener la sincronización precisa de la forma de onda de la corriente con la posición angular del rotor en cada instante de tiempo. El sensor de posición puede ser un “encoder” óptico. El funcionamiento es simple, cada 60° el sensor Hall cambia de estado. Todo el proceso tarda 6 pasos hasta completar un periodo

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

eléctrico (360°). Aunque un periodo eléctrico no tiene por qué corresponder con una revolución o giro completo mecánico del rotor.

Cada vez que un motor BLDC gira, cada bobina genera un voltaje conocido como F.C.E.M., la cual se opone al voltaje principal suministrado a las bobinas de acuerdo con la ley de Lenz. La polaridad del voltaje de esta fuerza es opuesta a la de la tensión. Esto se debe a tres factores que son:

- La velocidad angular del motor.
- Campo magnético generado por los imanes del rotor.
- El numero de vueltas de las espiras en el estator.

Por tanto, una vez el motor haya sido diseñado y construido, sólo la F.C.E.M. hará variar la velocidad angular, ya que es directamente proporcional a la velocidad del rotor, y además el aspecto de su curva característica, senoidal o trapezoidal, depende de la geometría del estator.

En la elección del motor que se deberá escoger tendremos que llegar a un compromiso de par necesario y el costo. Esto es debido a que cuanto mayor sea el número de polos más estable será el par a bajas velocidades, pero mayor será el costo económico. Como el número óptimo de polos magnéticos está en función de la geometría y de las propiedades del material de manera muy compleja, en muchos proyectos la necesidad de reducción de costo hace que se de preferencia a un rotor con un número menor de polos magnéticos. También habrá que tener en cuenta los picos máximos de par que podrán alcanzarse, el par nominal y el rango de velocidad al que actuará, ya que el par es directamente proporcional al ancho del rotor y al cuadrado del diámetro de este.

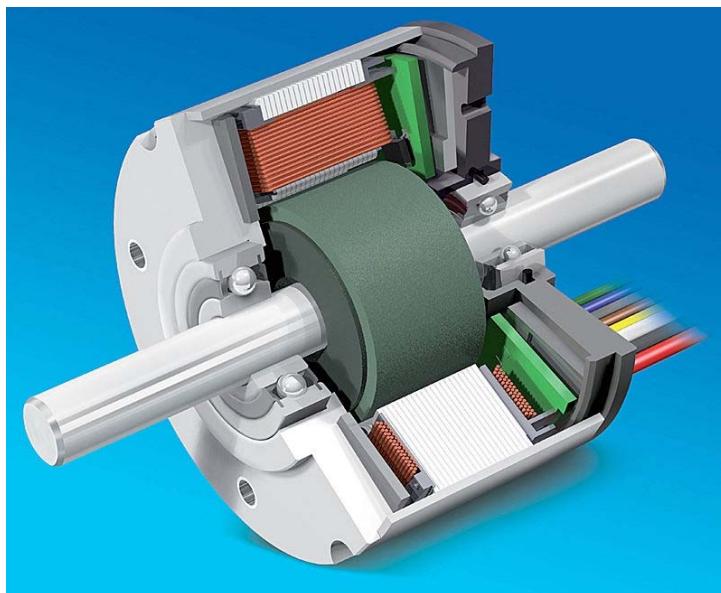


Imagen 18 – corte de un motor BLDC.

Las ventajas principales de este tipo de motor son numerosas:

- Menor necesidad de mantenimiento debido a la ausencia de escobillas.
- Larga vida útil.
- Mejor eficiencia debido a la ausencia de pérdidas en la conmutación.
- Mejor respuesta dinámica ya que la inercia del rotor es baja.
- No necesita circuitos de arranque como los motores de inducción.
- Mejor dissipación del calor ya que solo tiene espiras en el estator.
- Menores interferencias electromagnéticas y menor ruido debido a la ausencia de escobillas.
- Mayor rango de velocidades que puede alcanzar ya que carece de escobillas/conmutador.

Las desventajas de este tipo de motor son:

- La complejidad de su control y la necesidad de estar controlando el motor todo el tiempo.
- Elevado precio, debido a los imanes permanentes y a su fabricación.

En principio es un motor muy interesante para nuestro proyecto ya que cuenta con casi todas las ventajas que pretendemos, tales como eficiencia energética para una buena autonomía y evitar en lo posible la contaminación acústica. Además la menor necesidad de mantenimiento que en otros motores facilitaría la vida en el futuro al personal de mantenimiento del ISPV. Sin embargo la necesidad de usar una alimentación continua mediante baterías implica la necesaria transformación de energía que aumentaría costos y complejidad del proyecto.

5.1.3. Motor CC con escobillas

Es un motor rotativo de corriente continua que puede funcionar como generador y como motor. El uso como generador es muy reducido y solo aplicable en instalaciones de energía eólica o solar y en dispositivos para cargar baterías. El uso más extendido de la máquina de CC como generador es el de dinamo tacométrica. Es un tipo de sensor que recoge tensión, la cual es directamente proporcional a la velocidad de giro, y es usada en controles de velocidad. Aparte de eso, el motor CC ya no es muy empleado en la industria debido al uso cada vez mayor de máquinas asíncronas, como ya comentamos anteriormente.

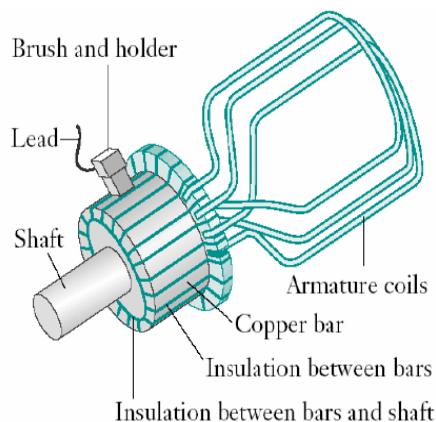


Imagen 19 – Nomenclatura de las diferentes partes del colector de delgas (en inglés)

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

El colector de delgas esta situado en el eje del rotor y gira solidario con éste. Lo forman un conjunto de láminas de cobre llamadas delgas que se encuentran aisladas entre sí y están alojadas sobre el llamado cubo del colector del que se aíslan mediante láminas de mica. Las delgas están soldadas a las bobinas, por tanto el número de delgas es igual al de bobinas. El portaescobillas se encuentra directamente sobre el colector de delgas pero permanece fijo. Aquí se alojan las escobillas que son unas piezas que permanecen en contacto con las delgas a medida que éstas giran de forma que permiten que la corriente eléctrica salga o entre por ellas cada vez que se ponen en contacto con las escobillas. Esta estructura genera varios problemas que hacen que el motor de corriente continua haya ido perdiendo peso en los últimos años.

La estructura básica consiste en un estátor inductor y un rotor inducido, los cuales están formados por devanados por los que circula la corriente responsable del movimiento. Dicho movimiento es producido debido a la Ley de Lentz la cual afirma que un conductor recorrido por una corriente en un campo magnético sufre una fuerza contrapuesta.

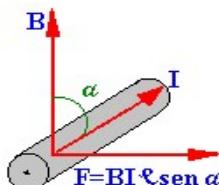


Imagen 20 – Diagrama vectorial de fuerzas sobre un conductor de longitud l recorrido por una corriente I sometido a un campo B

De este modo el rotor consiste en un gran número de conductores, o devanado inducido, donde se inducirá la fuerza para producir el movimiento. El estator es el inductor del campo, el cual se puede crear mediante un devanado recorrido por una corriente, o unos imanes. Esto da pie a diferentes estructuras, la más clásica la de estator con devanado inductor con un par de polos.

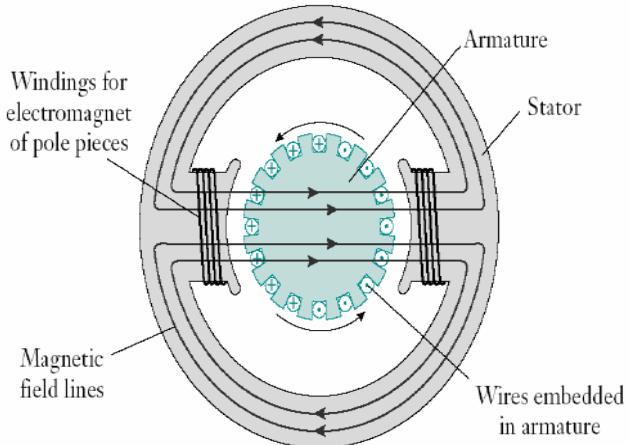


Imagen 21 – Detalle de los devanados del estator y del rotor con sentido de campo magnético y rotación

Dentro de esta estructura, según como se disponga el devanado de excitación o inductor, da pie a 3 configuraciones con diferentes comportamientos en cuanto a par y velocidad.

Los tipos de motores de corriente continua con escobilla son:

- De excitación independiente: son aquellos en los que el devanado de excitación se conecta a una fuente de alimentación independiente (de ahí su nombre) del devanado de inducido. El par es prácticamente constante al no depender de la carga del motor. Las variaciones de velocidad al aumentar la carga se deberán sólo a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor. Si en algún momento el motor estuviera funcionando en vacío (sin carga) y se quedara sin excitación, la velocidad aumentaría hasta alcanzar velocidades peligrosas para la integridad del motor. Este sistema no es casi usado debido a que hay que utilizar una fuente exterior de corriente.

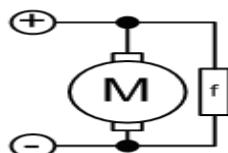


Imagen 22 – Configuración shunt

- De excitación en serie: son motores en los que el devanado de excitación se conecta en serie con el devanado de inducido, de manera que la intensidad que circula es la misma para ambos devanados. En estos motores en el momento del arranque la intensidad es máxima. A partir del punto de arranque la intensidad disminuye rápidamente y aumenta la velocidad. En este tipo de motores existe dependencia entre el par y la velocidad. Son motores en los que, al aumentar la corriente de excitación, se hace disminuir la velocidad, con un aumento del par.

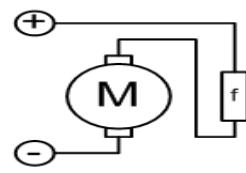


Imagen 22 – Configuración serie

- De excitación compuesta: También llamados “*compound*”, en este caso el devanado de excitación tiene una parte de él en serie con el inducido y otra parte en paralelo. El devanado en serie con el inducido está constituido por pocas espiras de gran sección, mientras que el otro está formado por un gran número de espiras de pequeña sección. Obtenemos un motor con las ventajas del motor serie, pero sin sus inconvenientes. Sus curvas características son intermedias entre las de excitación serie y excitación en derivación.

Existen dos tipos de excitación compuesta. En la llamada compuesta adicional, el sentido de la corriente que recorre los arrollamientos serie y paralelo es el mismo, por lo que sus efectos se suman, a diferencia de la compuesta diferencial, donde el sentido de la corriente que recorre los arrollamientos tiene sentido contrario y por lo tanto los efectos de ambos devanados se restan.

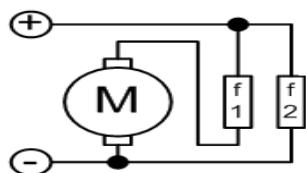


Imagen 23 – Configuración compound

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Otra opción consiste en el uso de imanes permanentes, y núcleo de hierro en el rotor para conducir el campo magnético

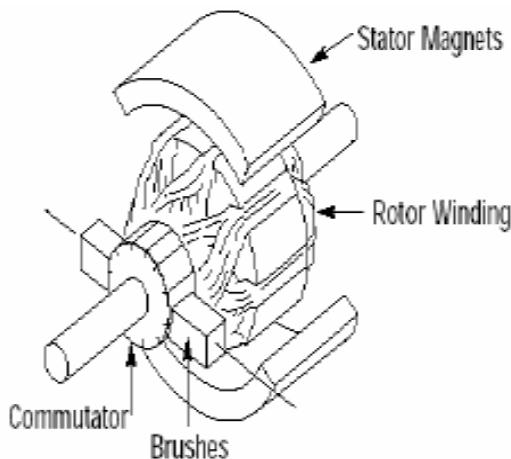


Imagen 24 – Estructura de un motor DC de imanes permanentes

Aunque tradicionalmente esta opción no era demasiado viable por la dificultad de que los imanes mantuvieran la fuerza del campo magnético con el tiempo, el descubrimiento de nuevos materiales ha posibilitado dicha opción, aumentando además con ello las prestaciones de los motores CC.

Uno de los problemas derivados de este tipo de motores es la conmutación de las delgas, que es la manera de introducir o extraer corriente del bobinado rotórico a través de las escobillas. Cuando una escobilla pasa de contactar una delga a hacerlo con la siguiente, se produce un cambio de sentido en la circulación de la corriente en la bobina unida a la delga. Esto suele producir la aparición de chispas entre las delgas y las escobillas, es decir, una mala conmutación. Otro gran problema es el rozamiento que sufren las escobillas al sufrir el movimiento de las delgas, lo cual supone la necesidad de un mantenimiento periódico.

Otro es la distorsión magnética que se produce al atravesar las líneas de campo magnético a través del rotor en movimiento, ya que no todas atraviesan el rotor de la forma adecuada. Esto reduce la eficiencia del motor como se puede suponer.

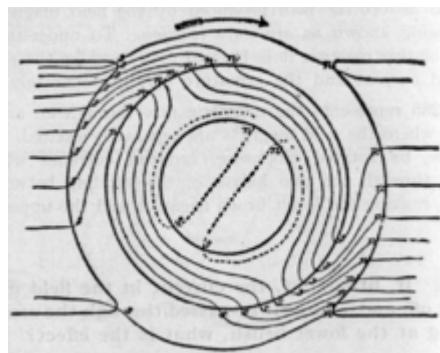


Imagen 25 – Muestra como algunas líneas del campo magnético creado por el estator no pasan a través del rotor

Las ventajas del Motor CC con escobillas son:

- Buena respuesta del motor ante requerimientos elevados de Par en un amplio rango de velocidades por parte de la carga. Es decir, gran flexibilidad Par-velocidad.
- Control simple y gran exactitud a la hora de trabajar con una determinada velocidad.
- Rendimiento alto para un amplio rango de velocidades.
- Facilidad de inversión de marcha de los grandes motores con cargas de una gran inercia.

Las desventajas son:

- Las escobillas requieren de un cierto mantenimiento y no permiten un régimen de trabajo a elevadas velocidades.
- Se producen pérdidas debido a la mala conmutación y otros fenómenos relacionados con el cambio de sentido de la corriente entre las delgas y las escobillas.

A pesar de estar cada día más en desuso, para nuestro caso parece una opción bastante viable por las características de par y control. A pesar de la necesidad de alta eficiencia energética, hay motores CC con escobillas también muy eficientes en la actualidad.

Además el hecho de que la alimentación sea forzosamente continua hace que este tipo de motor sea el más sencillo de implementar.

5.1.4. Motor Directdrive o HUBwheels

Este tipo de motores se han hecho muy populares en conversiones o adaptaciones de motores eléctricos en pequeños vehículos. Dentro de esta categoría están incluidos motores basados en tecnologías y funcionamiento muy diferentes tales como motores DC de imanes permanentes, motores de reluctancia variable y motores AC de imanes permanentes conmutados electrónicamente. Estos motores son colocados directamente sobre la rueda y el freno del vehículo a convertir.

Esta configuración puede ser encontrada en bicicletas y scooters eléctricas existiendo numerosas empresas que se dedican a comercializar paquetes de conversión de bicicletas y motos de motor de combustión a motor eléctrico. También son usados en la industria en las cadenas de montaje o cintas transportadoras. En el campo del automóvil se han hecho muchos esfuerzos para la integración de estos motores en las ruedas de los vehículos. Son instalados 4 motores, uno para cada rueda aprovechando el espacio dejado por el motor para la instalación de más sistemas de almacenaje de electricidad y como carecen de sistemas de transmisión también se aligera el peso del vehículo por esa parte, y por tanto, permite la instalación de un número adecuado de baterías que nos den la suficiente autonomía. Sin embargo es en los vehículos de 2 ruedas tales como las motos Scooter y parecidos donde mejores resultados se han conseguido, al ser vehículos ligeros que no requieren excesiva potencia.

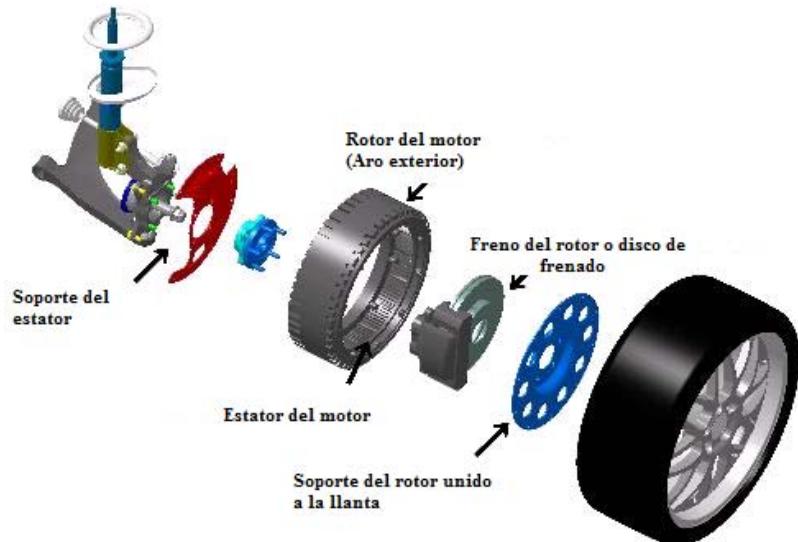


Imagen 23 – Partes del montaje de un motor HUBwheel.

Las ventajas de este motor son:

- Un gran rendimiento ya que se reducen o incluso desaparecen las pérdidas debidas a la fricción al desaparecer la transmisión y una menor contaminación acústica.
- Puede ser acoplado directamente a la carga.
- Necesita menor mantenimiento mecánico.
- Capacidad para un control inteligente de cada una de las cuatro (o dos) ruedas para una mayor estabilidad y agarre ya que cada motor acoplado a la rueda forma un sistema independiente tanto de tracción como de frenado.
- Ahorra espacio debido a sus reducidas dimensiones.

Los inconvenientes en cambio:

- Sobre todo un elevado precio y reducida gama de modelos lo que dificulta su difusión.
- La instalación en vehículos, originalmente con motor de combustión, de cuatro motores en las cuatro ruedas ocasiona un aumento del peso en zonas delicadas

donde no se ha previsto y puede llevar a un comportamiento poco estable y perdidas de adherencia a altas velocidades. También conlleva una reducción de peso en la zona donde antes estaba alojado el motor aunque ese espacio puede ser aprovechado para la instalación de baterías.

En nuestro caso no se trataba sólo de dar movimiento a las ruedas sino que también tenemos las cuchillas de corte que necesitan un buen par. Quizás la instalación de 4 motores fuera la solución, pero aparte del precio que pudiera conllevar, representaría un problema de acople en cada una de las partes ya que como se indica anteriormente pocos vehículos han sido diseñados pensando en esta posibilidad, mucho menos en nuestro caso, un cortacésped muy antiguo, donde además las necesidades de un control preciso de suspensión, aceleración o giro, mediante el control de cada una de las 2 o incluso 4 ruedas, resultan poco trascendentes.

5.2. Conversores

La conversión dentro del ámbito de la ingeniería eléctrica es la conversión de un tipo de energía eléctrica de una forma a otra. Los sistemas de conversión de potencia incorporan la regulación del voltaje para controlarlo dentro de unos ciertos límites.

También los accionamientos electromecánicos de velocidad variable son realizados con elementos de electrónica de potencia en conjunto con máquinas eléctricas y conversores de energía eléctrica.

El tipo de conversor eléctrico que se debería utilizar en un accionamiento electromecánico dependerá de la máquina eléctrica que se va a utilizar, del tipo de fuente disponible y de las prestaciones que especifique el usuario.

Las principales áreas dentro de los convertidores son presentadas a continuación con una pequeña explicación de cada uno de los tipos:

- Conversores CC-CC: son los llamado “troceadores” o “choppers” que utilizan técnicas de modulación lineales o técnicas de modulación del ancho de pulso (PWM) y los convertidores que utilizan enlaces de alta frecuencia entre la entrada y la salida.
- Conversores CA-CC: el uso de diodos o de tiristores como conmutadores está ampliamente extendido. No solo en el control de motores de corriente continua con o sin escobillas, sino en el desarrollo de los convertidores de frecuencia.
- Conversores CC-CA: es una de las más importantes, puesto que tanto los convertidores de frecuencia con fuente de tensión o con fuente de corriente entran dentro de este campo.
- Conversores CA-CA: aquí podemos encontrar tanto los desarrollos más antiguos como los ciclo convertidores hasta los más novedosos como pueden ser las matrices convertidoras, convertidores con enlace resonante o convertidores con enlace directo de tensión o corriente.

En nuestro caso, los que nos interesan son los conversores CC-CA y CC-CC.

5.2.1. Conversores CC-CC

Los conversores CC-CC son utilizados para alimentar máquinas de corriente continua a partir de fuentes de energía de tensión continua. Se puede encontrar un símil en alterna con los transformadores.

Conversores lineales

Los más simples son los conversores lineales, que es simplemente un divisor de tensión. La alimentación es la tensión inicial (V_{in}) y la tensión debido al divisor de tensión es la salida (V_{out}).

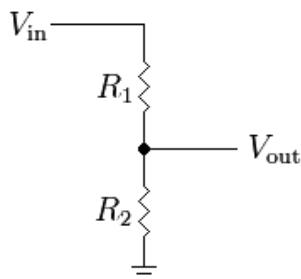


Imagen 24 – Divisor de tensión simple.

Pero este tipo de conversión posee bastantes desventajas tales como:

- Necesitamos conocer la magnitud de la carga para dimensionar las dos resistencias.
- Imposibilidad de generar tensiones mas elevadas que las de la fuente de alimentación.
- Imposibilidad de generar tensiones negativas, excepto si el punto de tierra estuviera definido en un nodo de la red resistiva.

Conversores estáticos

Son convertidores electrónicos de tensión, también se les llama troceadores o “choppers”. Los conversores conmutados en alta frecuencia (normalmente de 100 kHz a 5 MHz) son circuitos de potencia donde los semiconductores, o llaves de potencia, conmutan a una frecuencia mucho mayor que la de variación de las formas de onda de entrada y salida del convertidor. Esto permite emplear filtros pasa-bajo para eliminar los componentes armónicos no deseados. No podemos usar la inversión de la forma de onda de entrada para bloquear los semiconductores, como se hace con los conmutados por la red. Los interruptores deberán entonces controlarse al conducir y bloquear. Los conversores DC-DC forman parte de este grupo de convertidores, controlan el flujo de energía entre dos sistemas de continua. Este método de conversión es más eficiente (generalmente del 80% al 95%) que la de los conversores lineales. Su principal desventaja es la del ruido que generan al trabajar a altas frecuencias lo que hará que ese

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

ruido pueda interferir con otros dispositivos electrónicos si no es filtrado convenientemente.

Así podemos encontrar diferentes configuraciones, primero las no aisladas:

- Buck:

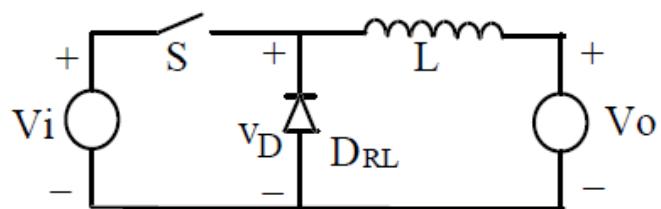


Imagen 25 – Conversor Buck, circuito simplificado.

En este conversor siempre se cumple que la tensión de entrada V_o es menor que la tensión de salida V_o . Por ello también es llamado reductor. El interruptor S conmuta a una frecuencia $f = 1 / T$. Tiene dos modos de operación T, el modo de conducción continua (MCC) y el modo de conducción discontinua (MCD). La ganancia estática para continua de este tipo de topología es $D=V_o/V_i$

- Tipo Boost:

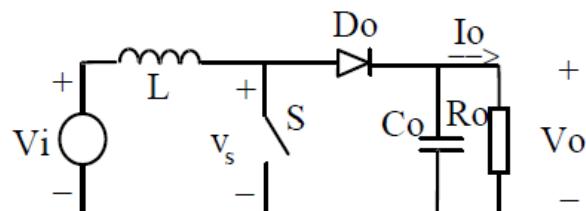


Imagen 26 – Conversor Boost, o elevador.

En este conversor siempre se cumple que la tensión de entrada V_o es mayor que la tensión de salida V_o . Por ello también es llamado elevador. El interruptor S conmuta a una frecuencia $f = 1 / T$. Al igual que en el Buck, tiene dos modos de operación, el modo de conducción continua (MCC) y el modo de conducción discontinua (MCD).

- Topologías derivadas:

Son el resultado de la asociación de las dos primeras topologías, la Buck y la Boost. Podemos encontrar la Buck-Boost, Cuk, ZETA y SEPIC.

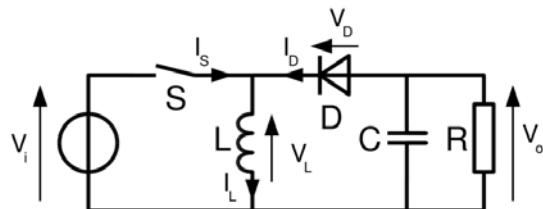


Imagen 27 – Conversor Buck-Boost.

Existen también las configuraciones aisladas, con el uso de un transformador para alta frecuencia, son la “Forward”, “Flyback”, medio puente, puente completo y “Push-Pull”.

5.2.2. Conversores CC-AC

Son utilizados sobre todo para la conversión CA-CA pero con enlace por corriente continua, es decir, hay dos etapas, la conversión AC-CC y la conversión CC-AC. La energía pasa a través de dos convertidores estáticos. En el primero rectificamos y filtramos y en el segundo ondulamos a frecuencia variable. A nosotros nos interesaba este segundo.

Los dispositivos semiconductores utilizados en los circuitos pueden ser todos aquellos en los que se controla el paso de “Off” a “On” y viceversa, tales como MOSFETs, IGBTs, GTOs o incluso tiristores (aunque se necesitan circuitos especiales para el bloqueo).

Las aplicaciones más comunes para este tipo de conversores son:

- Actuadores para motores en alterna, ya que permiten variar la frecuencia y la tensión de estos motores.
- Para la generación de una tensión senoidal, a imitación de la tensión de red, cuando se ha producido un corte en el suministro eléctrico.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Instalaciones fotovoltaicas. Genera una tensión senoidal a 50 Hz a partir de la tensión continua que generan las placas fotovoltaicas.

Pueden ser clasificados como VSI (“Voltage Source Inverter”) en el que controlamos la tensión de salida, o CSI (“Current Source Inverter”) en el que controlamos la corriente de salida. Vamos a ver los diferentes circuitos:

- Puente inversor monofásico tipo VSI: son circuitos utilizados cuando necesitamos una frecuencia de salida variable. Pueden ser de dos tipos, en media onda y en onda completa.

En el caso del de media onda conmutamos alternativamente TR1 y TR2 generando una onda cuadrada de valor positivo-negativo alternativamente en la carga.

En el caso del puente completo los transistores o interruptores TR1 y TR2 son conmutados a on y a off alternativamente durante periodos de 180° , alimentando la base del transistor. Los transistores TR3 y TR4 también son conmutados alternativamente a off y a on. Cuando TR1 pasa a estado on, TR4 pasa a estado on también y después de 180° ambos transistores pasan a su estado opuesto off. Cuando TR1 pasa a off, TR2 pasa a on y lo mismo ocurre con TR4 y TR3. TR3 pasa a on cuando TR4 pasa a off. Entonces coinciden en el mismo estado las parejas TR1-TR4 y TR2-TR3. Esto hace que la suma de ambas tensiones $V_d/2$ de TR1 y TR4 formen en la carga una tensión positiva V_d y los transistores TR3 y TR2 hagan lo mismo pero con diferente signo, es decir que sumen en la carga $-V_d$.

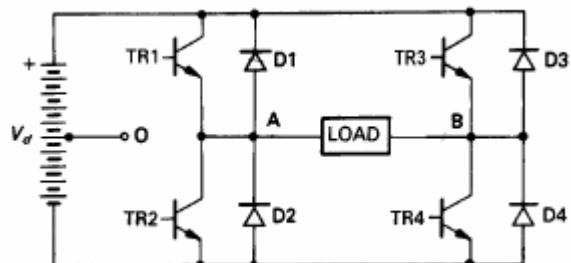


Imagen 28 – Puente monofásico en onda completa con diodos de protección.

- Puente inversor trifásico tipo VSI: el sistema de funcionamiento es análogo al anterior pero con seis transistores o interruptores (genérico).

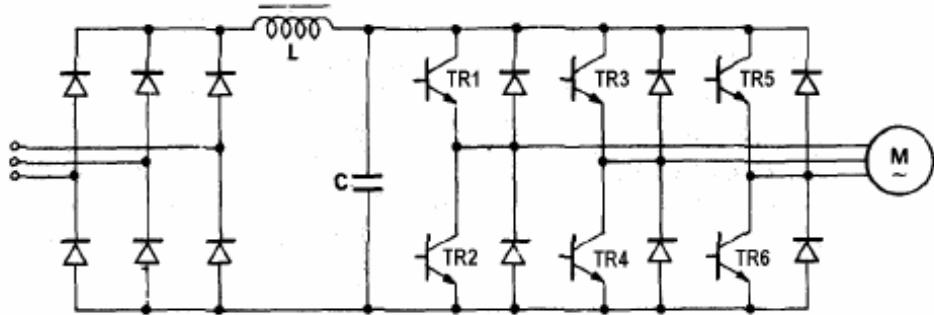


Imagen 29 – Puente inversor trifásico con diodos de protección..

Funcionan por parejas, TR1 y TR2, TR3 y TR6, TR2 y TR5, que funcionan alternándose cada 180° . Al tener 6 transistores cada 60° uno de ellos será puesto en on y otro en off. Consideremos que $t=0$ es cuando TR4 es llevado a off y su complementario TR1 es llevado a on, conduciendo a partir de ese instante TR5, TR6 y TR1. Después de 60° TR2 pasa a on quedando TR5 en off. Después de otros 60° corresponde a TR3 pasar a estado on y TR6 a off y cuando completamos el semiciclo TR1 pasa a off y TR4 a on.

Los transistores TR1, TR3 y TR5 cada vez que pasan a on corresponden con el polo positivo del bus, es decir que su tensión será de $\frac{1}{2} V_d$ y los transistores TR2, TR4 y TR6 cada vez que pase uno de ellos a on corresponderá al polo negativo de bus, es decir, su tensión será de $-1/2V_d$.

Debemos ser capaces de un control de la tensión de salida (PAM). Esto se consigue si mantenemos constante el flujo de entrehierro en el motor en todo rango de velocidades.

- Puente inversor monofásico PWM: el puente inversor monofásico nos da a la salida una onda casi cuadrada de amplitud V_d y esto es así porque conmutábamos alternativamente dos a dos los dispositivos semiconductores de diferentes ramas y cada 180° los de la misma rama. El esquema básico es el mismo, alternamos la conmutación de los dispositivos dos a dos, pero ahora se

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

provoca un desplazamiento, un desfase, entre la comutación de los dispositivos de las ramas.

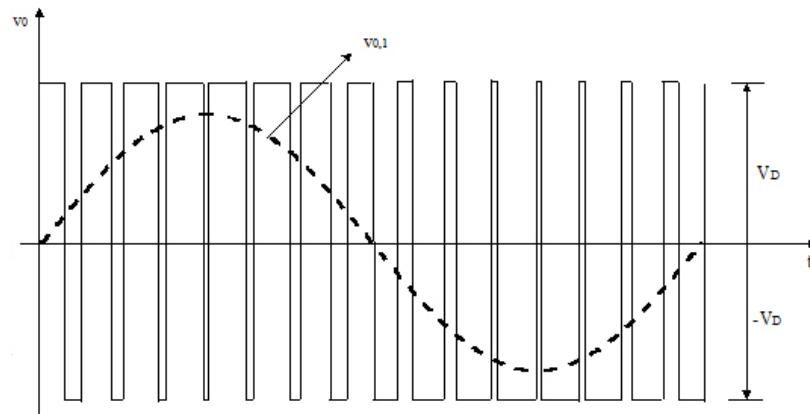


Imagen 30 – Forma de onda de la tensión controlada resultante del control PWM monofásico

La importancia de la tecnología PWM es que el valor eficaz del armónico fundamental de la onda de tensión a la salida puede ser variado desde un máximo a cero por avance o retraso de las comutaciones desde 0° a 180° . Los armónicos suponen un elemento a tener en cuenta en este tipo de topología ya que la técnica PWM modifica el contenido de armónicos de la onda de tensión de salida y puede ser utilizado para minimizar los efectos de los armónicos en la carga.

Una mejora de la técnica PWM es la SPWM donde comparamos una onda triangular de alta frecuencia con una onda senoidal o de referencia de la frecuencia deseada y los puntos en que se cortan ambas son los instantes en que conmutamos el inversor. Esta técnica elimina los armónicos de orden inferior.

- Puente inversor trifásico PWM: El control PWM es idéntico pero complicamos de manera muy importante la secuencia de disparo de los dispositivos semiconductores. El control de la tensión es conseguido por modulación del ancho del pulso de la tensión de salida.

- Puente inversor CSI: si el inversor es alimentado desde una fuente de corriente, la amplitud de la corriente a la salida del inversor es esencialmente independiente de la carga. La tensión de salida de los CSI está determinada por la respuesta de la carga a la corriente aplicada a ella. Se emplean tiristores y son usados principalmente en circuitos inversores de alta potencia. Estos puentes tienen circuitos de conmutación forzada con condensadores que almacenan la energía necesaria para la conmutación forzada de los tiristores. El comportamiento del circuito durante los intervalos de conmutación depende de la carga.

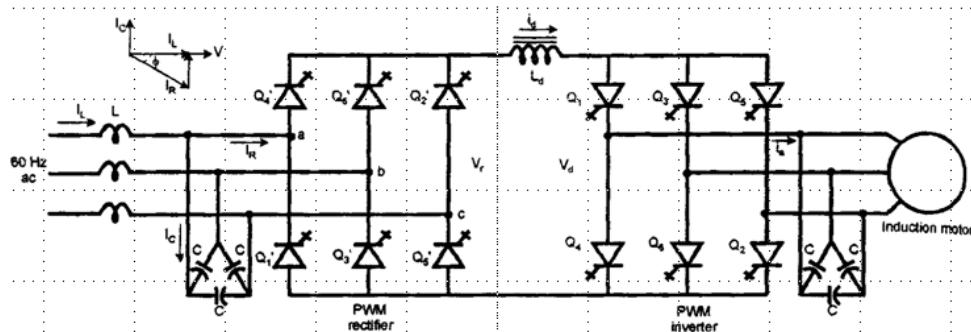


Imagen 31 – Control del deslizamiento a través de un CSI.

Los CSI pueden trabajar en los cuatro cuadrantes. La corriente del inversor está controlada mediante un bucle cerrado lo cual elimina las sobrecorrientes. Su tamaño y coste es bastante elevado, sobre todo por el valor elevado de los condensadores. Existen puentes CSI monofásicos y trifásicos. No es un sistema recomendado para trabajar con pares bajos ya que pueden aparecer problemas.

5.3. Control de motores

En el control de motores, no se puede pensar ya en un sistema solo motor, sino que tendremos un grupo convertidor-máquina con sistemas digitales como microcontroladores que se encarguen de accionar dispositivos electrónicos tales como transistores y circuitos complejos.

Hasta hace muy poco tiempo la regulación de velocidad estaba basada casi exclusivamente en el motor de corriente continua por sus ventajosas características.

Pero debido al gran avance de la tecnología de los semiconductores se ha ido introduciendo paulatinamente en el control de motores de inducción. Por ello a la hora de elegir deberemos tener en cuenta y conocer el funcionamiento de cada uno de ellos.

Hacemos un resumen de la mayoría de los controles de los motores que nos interesan para el cortacésped.

5.3.1. Control del motor de inducción

Se han utilizado motores asíncronos o de inducción de rotor de “Jaula de ardilla” debido sobre todo a que poseen un rotor no bobinado, que no tienen colector de delgas, su sencilla fabricación y su robustez. El control del motor de inducción es más barato que su homólogo del motor de continua hasta ciertos niveles potencias (unos centenares de KW). Aun así se siguen utilizando accionamientos de corriente continua para altas y muy altas potencias.

5.3.1.1. Arranque

Existen diversos tipos de arranque tales como el arranque directo, arranque mediante resistencias estatóricas, arranque por autotransformador, arranque estrella-triángulo y arranque mediante dispositivos electrónicos. Dados los requisitos del diseño, vamos a centrarnos en este último.

Utilizaremos arrancadores electrónicos que se basan en el uso de los graduadores. Un graduador está formado por dos tiristores montados en antiparalelo. El tiristor que se encuentra en directa respecto de la fuente de tensión permite el paso de corriente en los semiciclos positivos y el otro tiristor, que se encuentra en inversa, permite el paso de la corriente en los semiciclos negativos. Controlando el ángulo de disparo de los dos tiristores controlamos la tensión de alimentación de la carga. Las únicas pérdidas que obtenemos con este sistema son las pérdidas en los tiristores.

Como el par motor es proporcional al cuadrado de la tensión, al controlar la tensión se controla el par. También al controlar la diferencia del par motor y el par resistente

controlamos la aceleración. Es decir, si controlamos la tensión suministrada al motor controlamos la aceleración y el par. También con los graduadores se puede delimitar la intensidad máxima evitando que se puedan alcanzar intensidades peligrosas.

5.3.1.2. Control de la velocidad

Hay varios métodos para regular y variar la velocidad de los motores asincrónicos. La velocidad viene dada por la expresión $n = \frac{60 \times f_1}{p} (1 - s)$. La magnitud s expresa la velocidad con la que el rotor se mueve o desliza respecto al campo magnético y giratorio. De la expresión anterior se deduce hay varios métodos para variar la velocidad.

- Modificación del número de polos de la máquina.
- Por variación del deslizamiento:
 - A) Variando la tensión estática.

A frecuencia constante, el par desarrollado por un motor asincrónico, para un determinado deslizamiento, es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada. El punto de funcionamiento se alcanza cuando el par motor se equilibra con el de la carga. Cuando el par de motor sobrepasa al de la carga se inicia el movimiento. El deslizamiento del rotor está determinado por el par de carga y la tensión de alimentación; podemos obtener un control de la velocidad del motor regulando la tensión.

La variación de la tensión se puede conseguir mediante varios métodos:

1. Intercalando resistencia en serie con el estator.
2. Utilizando un autotransformador para la alimentación.
3. Cambiando el conexiónado estrella-triángulo.
4. Mediante dispositivos electrónicos.

Estos dispositivos aplican a cada fase del motor mayores o menores tramos de senoide de la tensión de red en función del ángulo de disparo de los tiristores,

variando así el valor de la tensión eficaz en bornes del rotor. El problema que podemos tener es que la tensión en bornes del motor no es senoidal y aparecen los inevitables armónicos de la intensidad circulante. Los armónicos repercuten negativamente sobre la red y sobre la máquina.

El sistema permite el funcionamiento de la máquina en régimen de freno electromagnético así como la inversión de giro por modificación electrónica de dos fases (ya que estamos en un sistema trifásico), mediante la modificación de la secuencia de los disparos. Este sistema se puede utilizar tanto en máquinas asíncronas con rotor de jaula de ardilla como en máquinas de rotor bobinado.

Los graduadores, como se ha explicado en el punto anterior, están formados por dos tiristores en antiparalelo cuando tratamos de graduadores monofásicos y tres graduadores monofásicos forman uno trifásico. Es decir, un graduador monofásico en cada fase forma un graduador trifásico.

El conjunto regulador-motor constituye un variador de velocidad en bucle cerrado. La velocidad es medida por una dinamo tacometrómica y se compara con la de referencia. Si el error que surge es positivo, el regulador de corriente alterna aumenta la tensión aplicada al estator, en caso de que sea negativo el regulador la disminuye.

También podemos regular la máquina asíncrona con un arrancador estático o “soft starter”. Un arrancador estático es un convertidor CA-CA, cuya aplicación principal es el arranque progresivo de máquinas asíncronas mediante el aumento de la tensión de alimentación de tal forma que limitamos la corriente estatórica y el par de arranque. Los arrancadores trabajan mediante el control de la corriente por fase de tal forma que siempre circule la corriente mínima para evitar malfuncionamiento del motor y que sea más estable todo el conjunto. Están formados por una etapa de control basada en un microprocesador y una etapa de potencia equivalente a la de los graduadores como elementos básicos. Su uso es indicado para controlar los picos

de corriente en el arranque, para proteger la carga limitando el par de arranque y para prolongar la vida de los motores que trabajan con un elevado número de arranques.

○ **B) Variación de la resistencia rotórica:**

Este método solo es aplicable a motores de rotor bobinado o anillos rozantes consiguiéndose una regulación continua con estrecho margen. La característica par-velocidad varía en función de la resistencia conectada al rotor. El método no es muy satisfactorio y en la realidad solo se utiliza para el arranque de motores de gran potencia. Esto es debido a la brusquedad del cambio de velocidad cuando variamos las resistencias exteriores para modificar la velocidad. Su uso es frecuente en la industria en sistemas de elevación y transporte.

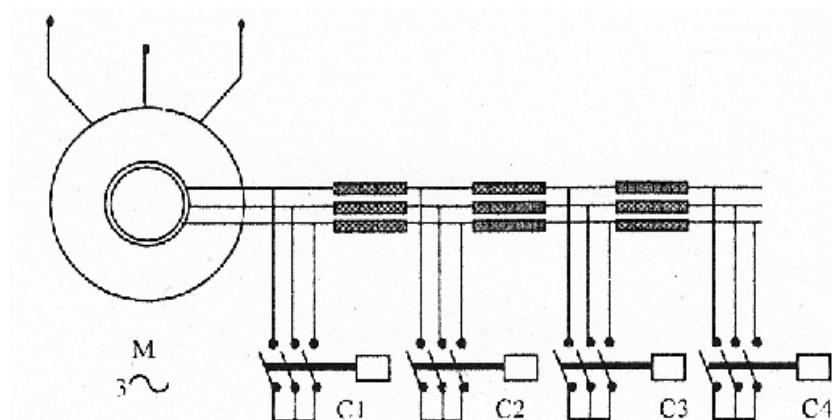


Imagen 32 – Control de velocidad por variación de la resistencia rotórica.

○ **C) Mediante la cascada subsíncrona(o hiposíncrona):**

La idea de la regulación de la velocidad de un motor asíncrono de anillos rozantes es bastante simple, consiste en un control de velocidad por variación del deslizamiento en el que la potencia de deslizamiento no se disipa térmicamente en ninguna resistencia, sino que se devuelve a la red.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

En el pasado se realizaba este tipo de regulación utilizando conversores rotativos, ello conducía a máquinas de coste y mantenimiento elevado pero debido al gran avance en materia de control, se ha sustituido el conversor rotativo por un convertidor estático.

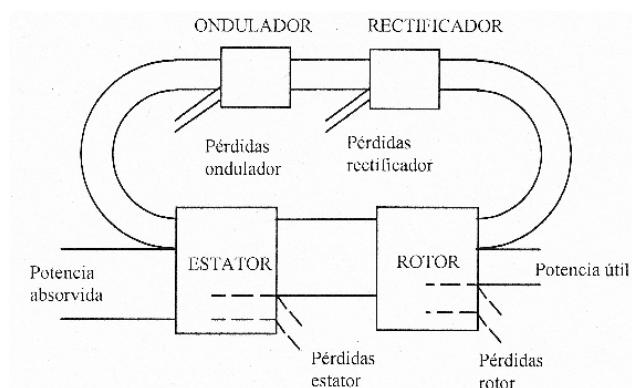


Imagen 33 - Balance energético mediante cascada hiposíncrona.

El control de la velocidad se lleva a cabo de la siguiente manera, el inversor proporciona, en función del ángulo de disparo de sus tiristores, una tensión determinada cuya componente continua es la existente en el rectificador. Para obtener esa tensión a la salida del rectificador se requiere un valor determinado de la tensión trifásica a su entrada o tensión inducida en el rotor. Esto implica que los devanados del rotor deberán cortar con una cierta velocidad el campo magnético que se alimenta a frecuencia constante, para que en ellos se genere esa tensión. Así pues, variando el ángulo de disparo de los tiristores se modifica de forma automática de velocidad del motor.

$$U_o = 1.35 \frac{n_1 - n_{\min}}{n_1} U_{2o}$$

Debemos dimensionar el convertidor electrónico.

Cuanto más elevada sea la velocidad mínima prefijada menor será el margen de regulación de velocidad. Este sistema resulta interesante cuando la velocidad mínima se sitúe por encima del 70% de la velocidad de sincronismo.

Con este sistema el flujo de potencia solo puede circular en el sentido rectificador-inversor. No es posible el funcionamiento de la máquina como generador y solo puede controlarse la velocidad del sistema por debajo de la síncrona.

La principal ventaja es el rendimiento del sistema motor-cascada hiposíncrona, además de que se necesita un convertidor de pequeña potencia.

Su principal defecto es el bajo factor de potencia que presenta y el gran contenido en armónicos en el lado de continua, los cuales son variables en función de la velocidad. Además con esta configuración solo podemos obtener valores inferiores a la de sincronismo.

5.3.2. Control del motor C.C.

Habrá que tener en cuenta la intensidad consumida por el motor que dependerá de la F.C.E.M. inducida y de las resistencias del circuito. A medida que aumenta la velocidad aumenta la F.C.E.M. disminuyendo la intensidad consumida. El principal problema es que la intensidad en el arranque está únicamente limitada por la resistencia del devanado de inducido y puede alcanzar valores 20 veces de la intensidad nominal.

Estos valores de intensidad plantean diversos problemas, sobre todo en el arranque de la máquina. Provocan calentamientos excesivos, ya que el par de arranque es muy alto, y problemas de caídas de tensión en la red.

5.3.2.1. Arranque

Este aspecto suele ser bastante crítico dada la necesidad de corriente necesaria para el arranque, para que se alcance el par de arranque. Por tanto para que el arranque sea óptimo hay que cumplir con dos condiciones fundamentales que determinan el valor máximo y mínimo de la intensidad, por un lado la limitación derivada de la legislación, y por otro la necesidad propia del funcionamiento deseado:

- La intensidad tiene que ser menor o igual que la marcada por el reglamento Diretiva de Baixa Tensão 2006/95/CE.
- La intensidad debe ser lo suficientemente elevada como para asegurar un par de arranque mínimo para conseguir la puesta en marcha del motor en el tiempo necesario.

Para cumplir con estos requisitos el control del arranque se basa en el control de la tensión en los bornes del motor. Existen varias técnicas:

- Reostatos de arranque.
- Configuraciones electrónicas de potencia.

Solo nos interesa el último, el primer control consiste en conectar una resistencia variable (reostato) en serie con el inducido e ir disminuyendo paulatinamente el valor de la resistencia hasta que la velocidad alcance el régimen permanente.

Las configuraciones electrónicas de potencia utilizan dispositivos semiconductores total o parcialmente controlados que permiten una variación perfectamente lineal y controlada de la tensión en bornes del motor. Así también se controla la intensidad y se controla el par de arranque y la aceleración.

5.3.2.2. Control de la velocidad

- Configuración de excitación independiente: la velocidad se puede modificar si modificamos alguno de los siguientes parámetros: resistencia del inducido, tensión en bornes y flujo de excitación.

El primer método consiste en disminuir la velocidad del motor a base de incrementar la resistencia del inducido, colocando un reostato variable en serie con el inducido.

Los dos siguientes se hacen mediante grupos motor-generador, que no nos interesan para el cortacésped por ser caro, ruidoso y tener un rendimiento pobre, y por medio de configuraciones electrónicas de potencia.

- El control por medio de configuraciones electrónicas de potencia se basa en dispositivos semiconductores total o parcialmente controlados que permiten una variación de la tensión en bornes del motor completamente lineal. El control será lineal y se tendrá una gran precisión de la velocidad.

Un equipo de regulación consta de varios elementos tales como un generador de rampas, comparador de velocidad, regulador de velocidad, comparadores de intensidad, regulador de intensidad, circuito de disparo, una etapa de potencia, una dimaño tacometrífica y un sensor shunt de intensidad. Con dos ramas en bucle cerrado con realimentación.

- El control por variación del flujo de excitación se consigue reduciendo el valor del flujo de excitación aumentando la velocidad del motor a cambio de reducir el par entregado a la carga. Este método es conocido por regulación por debilitamiento de campo y su control se realiza mediante dispositivos electrónicos de potencia similar a los reguladores de tensión usados en el control de la velocidad por variación de tensión.
- Configuración de excitación derivación: tiene las mismas posibilidades de control que el motor de excitación independiente. Su control resulta mas complejo al tener el devanado de excitación en paralelo con el inducido y una variación de la tensión en bornes afecta a ambos (inducido y excitación).
- Configuración de excitación serie: hay dos métodos, por la modificación de la conexión de un grupo de motores y la regulación mediante dispositivos electrónicos (troceadotes).

En el primer método hay que utilizar cambios manuales de las conexiones, lo que en nuestro caso no nos interesa. Por ello nos centramos en el control de la velocidad por troceadores. Estos son los llamados troceadores o “choppers” que son unos dispositivos formados por semiconductores totalmente controlados que se encargan de regular la corriente consumida por el motor y de esta forma se regula la velocidad de giro del mismo. Los semiconductores son transistores, GTOs, etc. que actúan como interruptores.

Ajustando los tiempos de paso o interrupción de la corriente se modifica el valor medio de ésta y por tanto la velocidad media que presenta el giro del eje del motor.

5.3.3. Control del motor Brushless

El motor Brushless está formado por el conjunto:

- Motor de corriente alterna (máquina síncrona).
- Inversor de estado sólido.
- Sensor de posición.

5.3.3.1. Control por troceador

El conjunto obtenido es un conjunto cuya característica Par-Velocidad es lineal como en una máquina de corriente continua. Por ello, el motor Brushless puede utilizar técnicas clásicas de corriente continua para el control de velocidad y del par. La tensión media puede controlarse con un troceador o con un variador del tipo PWM. De esta forma, controlando la tensión se controla la velocidad del motor. Para controlar el par, controlamos la corriente mediante un bucle de realimentación y trabajamos sobre el bus de corriente continua o sobre el PWM. En la actualidad hay integrados (electrónicos) para pequeños motores de corriente continua sin conmutador que realizan esta función de control que resultan muy baratos y de gran aplicación.

5.3.3.2. Control por corriente

Las técnicas utilizadas en un servo controlador para un motor brushless son muy similares a las aplicadas en los servos tipo PWM implementados con transistores para motores de continua. El control de la velocidad se realiza mediante un doble bucle de realimentación, uno de alta ganancia para la velocidad y otro interno de corriente. El valor y la polaridad de la señal de referencia de entrada al primer sumador determinan la velocidad y el sentido de giro del motor.

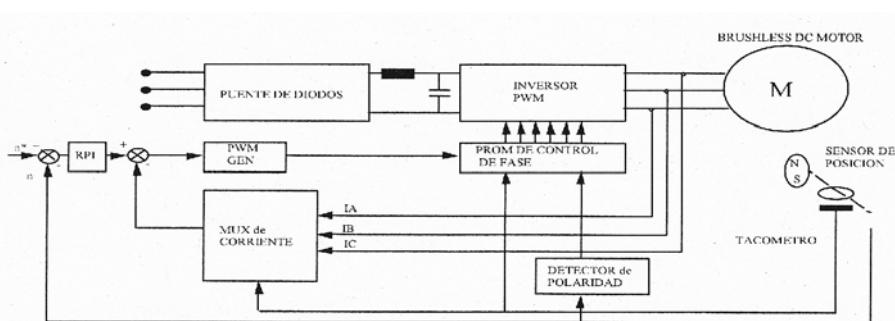


Imagen 34 – Diagrama de bloque de un servoaccionamiento de un brushless.

El sistema de control permite trabajar en 4 cuadrantes, cuando se requiera una reducción rápida de velocidad, el error negativo de velocidad provoca un gran frenado y una deceleración rápida del motor y la energía se regenera a través del bus de corriente continua. Normalmente esta energía recuperada se disipa en un frenado dinámico a través de una resistencia.

5.3.3.3. Tipos de conmutación

Hay tres tipos de control. Esta el basado en conmutación senoidal, el basado en conmutación trapezoidal y el basado en conmutación vectorial.

- Conmutación trapezoidal: se controla la corriente que circula por los terminales del motor, excitando un par simultáneamente y manteniendo el tercer terminal desconectado. Sucesivamente se va alternando el par de terminales a excitar, hasta completar las seis combinaciones posibles.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

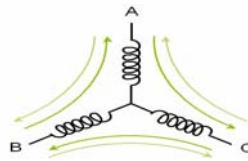


Imagen 35 – La imagen muestra el camino posible de las corrientes y por tanto las combinaciones posibles para dicho control

- Commutación senoidal: la conmutación sinusoidal es vista como un control más avanzado y exacto que el trapezoidal, ya que intenta controlar la posición del rotor continuamente. Esta continuidad se consigue aplicando simultáneamente tres corrientes sinusoidales desfasadas 120° a los tres bobinados del motor. La fase de estas corrientes se escoge de forma que el vector de corrientes resultante siempre esté en cuadratura con la orientación del rotor y tenga un valor constante. Como consecuencia de este procedimiento se obtiene un par más preciso y sin el rizado típico de la conmutación trapezoidal. No obstante, para poder generar dicha modulación sinusoidal, es necesaria una medida precisa de la posición del rotor. El problema principal que presenta la conmutación sinusoidal es que intenta controlar directamente las corrientes que circulan por el motor, las cuales son intrínsecamente variantes en el tiempo. Al aumentar la velocidad del motor, y por tanto la frecuencia de las corrientes, mayor error y por tanto mayor desalineación entre el vector de corrientes y la dirección de cuadratura del rotor. Este hecho provoca una progresiva disminución del par motor como muestra la siguiente gráfica.

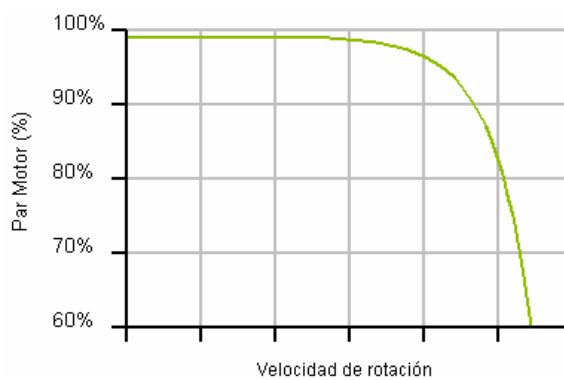


Imagen 36 – La gráfica muestra el Par Motor en función de la velocidad de rotación

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Comutación vectorial: el control vectorial es el más complejo y el que requiere mayor potencia de cálculo de las tres técnicas. A su vez también es el que mejor control proporciona. El control vectorial o *Field Oriented Control* (FOC) soluciona el problema del anterior, controlando el vector de corrientes directamente en un espacio de referencia ortogonal y rotacional, llamado espacio D-Q (*Direct-Quadrature*).

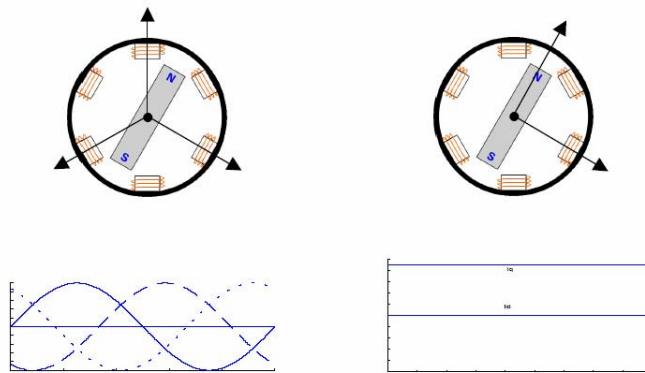


Imagen 37: Comparativa entre el espacio estático de la bobinas y el espacio rotacional D-Q

Las principales características son:

- La utilización de “vectores espaciales”, cuyas proyecciones son las variables trifásicas.
- Transformación del sistema trifásico variable en el tiempo y en la velocidad en un sistema difásico invariable.
- Desacoplamiento entre los 2 parámetros esenciales de la máquina asincrónica: flujo y par electromagnético.

En resumen, la comutación trapezoidal proporciona una primera aproximación al control de motores “brushless”. Gracias a su sencilla implementación y a los pocos recursos utilizados, es ampliamente usada en aplicaciones de muy bajo coste. No obstante debido a su alto rizado de par en todo el espectro frecuencial la hace desaconsejable para cualquier aplicación que demande una mínima precisión o eficiencia.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

La conmutación sinusoidal soluciona el problema del rizado del par a cambio de aumentar la complejidad del control y de incorporar un sensor de mayor precisión. Sin embargo, debido a que trabaja en el espacio variante del tiempo, presenta una limitación de control a altas velocidades. El control vectorial soluciona los problemas de ambos controles consiguiendo una alta eficiencia y control del par tanto a bajas como a altas velocidades.

5.4. Microcontrolador

La mayoría de los motores disponen de alguna configuración para que se puedan controlar mediante un microcontrolador. En nuestro caso, las cuatro clases de motores pueden ser controladas, con mayor o menor complejidad, mediante un microcontrolador que controla principalmente las señales digitales a los semiconductores para que estos actúen como interruptores abiertos o cerrados. En algún caso, como en el motor Brushless también pueden recoger y procesar señales provenientes de algún sensor. Con el control de los procesos con microcontrolador se deberá tener en cuenta la configuración de los elementos para un mejor control y que el error sea mínimo.

5.4.1. Control en bucle abierto

Un controlador “Open Loop” también conocido como controlador sin “feed-back” (realimentación), es un controlador en el cual se introduce en el sistema un estado que depende del modelo del sistema.

La característica principal de este controlador es que no usa la realimentación para determinar si la entrada ha alcanzado el propósito deseado. Los elementos de control no tienen en cuenta el estado del sistema o los valores de la salida. Un sistema en bucle abierto no puede corregir los errores que surjan durante el proceso, tampoco puede compensar los ruidos que se introduzcan dentro del proceso.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

En el sistema en bucle abierto se intenta realizar un control de la salida en función de la entrada pero si existen perturbaciones, la salida tomará un valor no deseado, sin que el controlador pueda evitarlo, ya que no tiene conocimiento de esas perturbaciones.

Es necesario un conocimiento muy preciso del sistema para poder así saber las acciones a realizar sobre las entradas o salida del sistema, para que la salida se comporte de la manera deseada. Por ello, el modelo matemático del sistema debe ser lo más exacto posible.

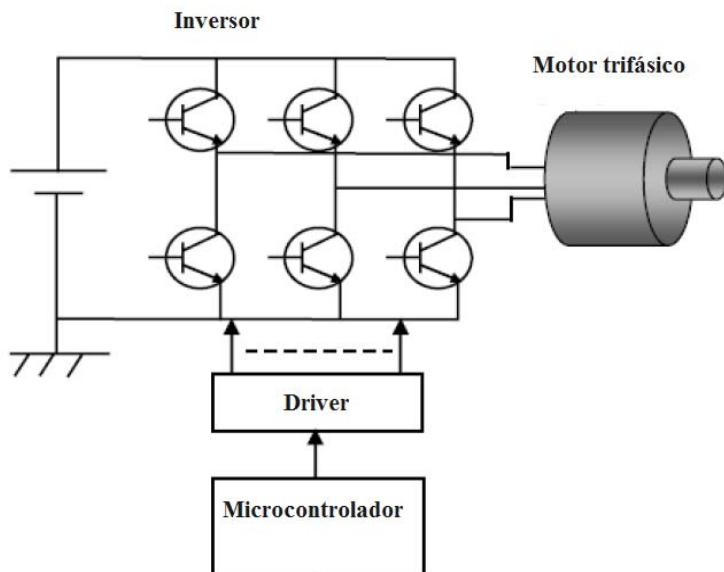


Imagen 38 – Control de un sistema en bucle abierto.

Un control en bucle abierto generalmente es usado en el control de procesos simples por causa de su simplicidad de implementación y por que son más baratos, especialmente en sistemas donde la necesidad de realimentación es baja.

En el caso del control de velocidad de un cortacésped, no es necesaria una elevada precisión de la rotación del motor y podemos considerar que el uso de inversores con esta topología sería una hipótesis viable ya que tienen un costo reducido y es un sistema menos complejo, siendo más fácil de implementar.

Las ventajas son:

- Bajo coste.
- Es muy estable.

Y sus desventajas:

- No tiene en cuenta las perturbaciones.
- Es necesaria una alta precisión a la hora de establecer el modelo matemático.

5.4.2. Control en bucle cerrado

Los problemas que tienen los sistemas en bucle abierto se corrigen adoptando la estructura bucle cerrado. La acción que desarrollan los elementos de control sobre las entradas o entradas del sistema, es función de la entrada de referencia o de mando y del valor de la salida que es llevado a los elementos de control mediante la realimentación.

En caso de que actúe una perturbación sobre el sistema el valor de la salida cambiará. Se detectará un error entre la entrada y la salida del sistema, y se creará una acción sobre el sistema de manera que corrija este error.

Los sensores son los que se encargan de procesar la señal de salida y enviar una pequeña señal por la realimentación para que el microcontrolador ejecute las operaciones necesarias y devuelva la corrección.

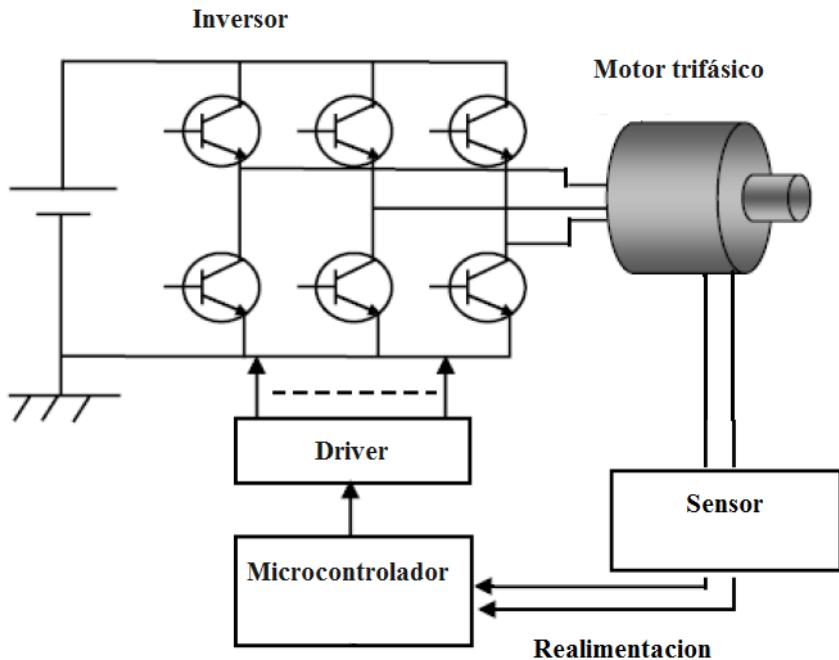


Imagen 39 – Control de un sistema en bucle cerrado.

En un vehículo eléctrico, los sensores pueden ser tacómetros, “encoders” o sensores de efecto Hall acoplados en el eje, con finalidad de medir velocidad y/o posición.

Las ventajas son:

- Tienen en cuenta las perturbaciones que aparecen en el sistema.
- Disminuyen las no linealidades.

Y sus inconvenientes:

- Puede hacer inestables los sistemas estables.
- Tiene un coste alto.

Para la aplicación de este modelo en un cortacésped, son necesarios más sensores adicionales, haciendo que el sistema se vuelva más caro y complejo de implementar.

6. SELECCIÓN DEL MOTOR

Ya calculamos todos los parámetros mecánicos calculados para saber las necesidades el motor eléctrico para operar de forma óptima:

- Potencia: Tiene que ser cercana a 9561W.
- Velocidad de rotación del motor: 2700 r.p.m (3600 r.p.m. en condiciones máximas).
- Tensión: 48 V (ver especificaciones, apartado 3).
- Par: falta este cálculo por dimensionar ya que dependerá de la polea de radio R que fijemos para transmitir el movimiento del motor al sistema. Habrá que llegar a un compromiso velocidad-par.

6.1. Configuración y tipo de motor elegidos

Dentro de los 4 tipos de motores hemos de ver sus ventajas e inconvenientes y elegir el motor óptimo. Tampoco será únicamente las características del motor las que determinen la elección de uno u otro, el control y la alimentación también serán aspectos a tener muy en cuenta e influirán tanto o más que la elección de un tipo de motor u otro. Por no hablar de aspectos como el tamaño y su viabilidad de meterlo en el chasis del cortacésped. Incluso la posibilidad de realizar un mecanizado para mantener la posibilidad.

Antes de entrar en qué motor sería mejor o peor hay que dar respuesta a varias preguntas:

Número de motores

Para ello debemos pensar en que tipos de movimiento necesitamos, y la respuesta es 2: uno para las cuchillas, y otro para las ruedas. Por tanto cabe pensar en montar un motor para el movimiento del cortacésped y otro para el movimiento de las cuchillas del corte. El motor del cortacésped tendría como misión desarrollar la velocidad y el par suficiente para que el cortacésped trabaje cumpliendo las exigencias del apartado 3.

Mientras que el segundo motor iría destinado para la función de mover las cuchillas para cortar el césped.

Esta es la primera duda que tenemos que resolver. A priori parece buena opción de dos motores ya que tenemos un control independiente de cada uno, y eso daría mayor flexibilidad de funcionamiento al cortacésped además de dar un conjunto más eficiente. Sin embargo todo el sistema de poleas se vería perjudicado, y podría necesitar de numerosas modificaciones, de la compra y ensamblaje de piezas, para un modelo demasiado antiguo, el JE 130 de 1991, lo cual obviamente repercutirá muy negativamente en el costo de dichas piezas y en la posibilidad de compatibilidad con otras nuevas, resultando un desastre el sistema resultante. Esto sin contar con el problema que supondría el control de varios motores, que requeriría varios controladores, lo cual dispararía el precio. Visto todo esto se eligió como mejor alternativa la configuración de un motor, ya que por las características del cortacésped resulta mucho más simple su instalación, y por tanto el coste es también menor.

Tipo de motor

Al seleccionar la configuración con un motor desechamos automáticamente el motor “HUBwheel” o “Directdrive”, ya que además de movimiento y par hemos de mover las cuchillas. También con este tipo de motores hubiéramos tenido que quitar el eje y sustituir las ruedas por unas de mayor diámetro, al ser las originales de un diámetro bastante pequeño para los motores que se comercializan. La compra de un nuevo eje y ruedas más grandes vuelve a suponer un aumento considerable de gasto, algo totalmente inviable en este proyecto.

El motor de inducción tenía para nosotros como principales inconvenientes que la alimentación del motor es de corriente continua, por tanto precisábamos de controles electrónicos adicionales (circuitos de potencia) para el correcto funcionamiento del motor y que los variadores y convertidores eran muy caros para este tipo de aplicación, por no decir que su implementación resulta difícilmente viable, puesto que convertir una

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

fuente de continua de 48V en alterna de 220V presentaría grandes dificultades sobre todo a la hora de suministrar corrientes excesivas. Este tipo de motores son más baratos que los motores de corriente continua aunque el precio del conjunto accionamiento-motor de inducción llega a ser más caro para motores de potencias medias y bajas. Con hincapié en la simplicidad del control preferimos explorar la vía de los motores CC.

Por otro lado los motores BLDC, aunque poseen muy buenas características como ya comentamos, incluyendo el control puesto que tienen comportamiento parecido a los motores DC, siguen presentando el grave problema de la alimentación. Además mirando algún catálogo de servomotores brushless de LAFERTGROUP, no presentan pares especialmente altos a no ser que trabajen a 400V, y en cambio tienen longitudes bastante mayores al metro, que podrían presentar un impedimento para su instalación.

Por otro lado existen motores CC muy eficientes, y que aunque requieran cierto mantenimiento tampoco resulta excesivamente problemático puesto que únicamente requiere una revisión de las escobillas una vez al año, para ver si necesitan ser reemplazadas, lo cual no debería ser un elemento especialmente crítico a la hora de decidirse por un tipo de motor u otro.

Por ello nos decantamos por un motor de corriente continua, estos motores poseen las características de simplicidad de control y buena regulación que estábamos buscando. Además, aunque sean más caros que los motores de inducción, el motor solo necesita de un microcontrolador para su control. Si podemos obtener un motor que funcione con el voltaje de 48 V no nos hace falta ningún elemento más, lo cual es una excelente ventaja para la instalación del sistema y su correcto funcionamiento, ya que resulta un diseño bastante compacto.

En la siguiente página se muestran características de diversos datasheet que se fueron mirando, aunque no se llegasen a conocer los precios ante la falta de estos datos y la necesidad de contactar con el fabricante para ello.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Golden Motor Technology Co Ltd Model: HPM5000B \$296 (48V) \$315 (72V)

| Torque (N·m) | Speed (rpm) | Output (W) | Voltage (Vdc) | Current (A) | Input (W) | Efficiency (%) |
|--------------|-------------|------------|---------------|-------------|-----------|----------------|
| 3.86 | 3662 | 1480.32 | 47.98 | 37.03 | 1777.08 | 85.3 |
| 4.15 | 3644 | 1583.73 | 47.96 | 39.23 | 1881.65 | 84.2 |
| 4.49 | 3623 | 1703.58 | 47.93 | 41.81 | 2004.11 | 85.0 |
| 4.80 | 3604 | 1811.55 | 47.90 | 44.17 | 2119.63 | 85.6 |
| 5.07 | 3587 | 1904.57 | 47.88 | 46.22 | 2212.65 | 86.1 |
| 5.47 | 3562 | 2040.65 | 47.84 | 49.25 | 2356.21 | 86.6 |
| 5.81 | 3541 | 2151.68 | 47.81 | 51.83 | 2478.06 | 87.0 |
| 6.17 | 3519 | 2273.78 | 47.78 | 54.56 | 2605.91 | 87.2 |
| 6.53 | 3497 | 2391.21 | 47.75 | 57.29 | 2733.59 | 87.4 |
| 6.79 | 3481 | 2474.97 | 47.72 | 59.27 | 2828.41 | 87.5 |
| 7.24 | 3453 | 2617.87 | 47.68 | 62.68 | 2988.85 | 87.6 |
| 7.59 | 3431 | 2727.19 | 47.65 | 65.34 | 3113.45 | 87.6 |
| 7.95 | 3409 | 2847.99 | 47.62 | 68.07 | 3241.44 | 87.6 |
| 8.30 | 3387 | 2944.09 | 47.59 | 70.72 | 3365.70 | 87.5 |
| 8.68 | 3364 | 3057.49 | 47.56 | 73.61 | 3500.42 | 87.3 |
| 8.94 | 3347 | 3131.00 | 47.53 | 75.58 | 3592.49 | 87.2 |
| 9.39 | 3320 | 3261.36 | 47.49 | 78.99 | 3751.63 | 87.0 |

Voltage: M (230 Volt) - 3000 Min-1 (8 Polos) - Connection Y

| M (250 Volt - 5000 Min. I-t pulses) Connection 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-----|------|-----|-----|-----|------|------|-------|----|-----|------|------|-----|-----|-----|
| B56E2S 3M | 1.2 | 3000 | 314 | 1.0 | 4.2 | 6000 | 0.73 | 57534 | 32 | 140 | 0.49 | 0.85 | 154 | 1.4 | 1.2 |
| B56F4S 3M | 2.4 | 3000 | 628 | 2.0 | 8.5 | 6000 | 1.40 | 60714 | 35 | 140 | 0.49 | 0.85 | 154 | 2.8 | 2.4 |
| B56F4S 3MM | 2.4 | 3000 | 628 | 2.0 | 8.5 | 5000 | 1.40 | 60714 | 35 | 140 | 0.49 | 0.85 | 154 | 2.8 | 2.4 |

10.4 10.4 10.4 10.4 10.4 10.4 10.4 10.4 10.4 10.4

Voltage: H (400 Volt) - 3000 Min-1 (8 poles) -Connection Y

000 817 2.6 10.5 6000 1.84 57065 38 140 0.85 1.48 268 2.3 1.8

| TABELLA DATI ELETTRICI (F.F. 1.1) / TABLE OF ELECTRICAL DATA (F.F. 1.1) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------------------------------|--|---------------|------------------|---------------|----------------------|---|------------------|---------|-------|---------|-------|----------|--------------|-----|---|
| TIPO TYPE | SISTEMA DI ALIMENTAZIONE POWER SUPPLY SYSTEM | | | | | | | SISTEMA DI ALIMENTAZIONE POWER SUPPLY SYSTEM | | | | | | | TIPO TYPE | | |
| | VOLT 12 | | VOLT 24 | | VOLT 36 | | VOLT 120 | VOLT 12 | | VOLT 24 | | VOLT 36 | | VOLT 120 | | | |
| | Volts | Amps. | Volts | Amps. | Volts | Amps. | Volts | Volts | Amps. | Volts | Amps. | Volts | Amps. | Volts | | | |
| MGp 2101 | 120 | 17.7 | 120 | 8.6 | 120 | 2.7 | 120 | 120 | 41 | 120 | 20.5 | 120 | 5.5 | 400 | 2.8 | | |
| MGp 2102 | 300 | 34.4 | 300 | 17.2 | 300 | 4.8 | 300 | 24 | 70 | 300 | 40 | 300 | 10.5 | 700 | 3.2 | | |
| MGp 2103 | 480 | 51.4 | 480 | 26.7 | 480 | 6.9 | 480 | 24 | — | 480 | 57 | 480 | 15.5 | 750 | 3.6 | | |
| MGp 2104 | 600 | 62.8 | 600 | 34.5 | 600 | 9 | 600 | 4.6 | — | 600 | 70 | 600 | 19 | 1200 | 4.0 | | |
| MGp 2105 | 140 | 16 | 140 | 8 | 140 | 2.7 | 140 | 2.7 | 200 | 28.5 | 200 | 14.2 | 270 | 4 | 270 | 2 | |
| MGp 2106 | 200 | 32 | 200 | 16 | 200 | 4.2 | 200 | 2.1 | 500 | 57 | 500 | 22 | 500 | 7.5 | 500 | 3.8 | |
| MGp 2107 | 400 | 44 | 400 | 22 | 400 | 6.2 | 400 | 3.2 | 700 | 80 | 700 | 40 | 700 | 11 | 700 | 5.6 | |
| MGp 2108 | 500 | 58 | 500 | 26 | 500 | 9 | 500 | 4.6 | — | 500 | 60 | 500 | 14 | 900 | 6 | 900 | 3 |
| H.P. Watts | Frame Size | Volts V1 V2 V3 V4 | Current (Amps) I1 I2 I3 I4 | Torque Kgm | Mounting Type | Irs. Class | Protection Degree | Duty Mins | Weight (kgs.) | | | | | | | | |
| 3000 RPM MOTORS | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.5/165 | V1 | - | 24 36 48 | - | 97.0 | 65.0 | 48.5 | 60 | Fx/Fx | TENV | F | IP-44 | \$2.5 | 15 | | | |
| 3.5/210 | V2 | - | 24 36 48 | - | 136.0 | 90.5 | 68.0 | 84 | Fx/Fx | TENV | F | IP-44 | \$2.5 | 23 | | | |
| 4.5/3350 | V3 | - | 36 48 | - | 116.5 | 87.0 | 107 | Fx/Fx | TENV | F | IP-44 | \$2.5 | 30 | | | | |

Imagen 41 – Características de motores monofásicos, BLDC y CC.

6.2. Motor seleccionado

Tras estudiar las diferentes posibilidades y realizar búsquedas de los diferentes motores entre diversas empresas del sector, tocaba profundizar en otros factores como, de disponibilidad, económicos, y técnicos.

Así pues lo primero que hicimos fue buscar empresas de Portugal que comercializaran motores, encontrando alguna interesante como la siguiente:

<http://www.batlight.pt/Paginas%20Produtos/Motores/Motores%20DC.htm>

Podemos encontrar motores DC de varios tipos para diferentes aplicaciones, sobre todo centrados en motos o cochecitos, donde nos ofrecen la posibilidad de comprar 2 motores (opción que ya desechamos anteriormente) y mayores voltajes, y los motores DC que funcionan con voltaje de 48 V no tienen suficiente potencia ni par para nuestras pretensiones.

Existen motores eléctricos muy interesantes con potencias iguales o ligeramente inferiores a nuestros requisitos, pero son motores para carros de golf. Tienen la mayoría de nuestras especificaciones requeridas pero solo pueden desarrollar una potencia inferior a los 4kW.

El mayor problema que nos encontramos es que la mayoría de los motores de 48 V que existen en el mercado son para conversiones para motos o bicicletas.

Finalmente encontramos una página con motores de características parecidas a nuestras especificaciones y muy eficientes:

<http://www.lmcltd.net/index.php?page=motors-and-generators-2>

Este tipo de motor Lynch es un diseño no convencional con una armadura de disco. Presenta las ventajas de uno convencional, y las ventajas de un motor plano (de circuito

impreso). Es similar a un pancake, pero es más poderoso que cualquiera de estas tecnologías. La armadura disco tiene imanes en ambos lados, doblando la densidad de flujo disponible y acortando el camino para el flujo magnético, lo que obviamente reduce el problema de la dispersión magnética. Por lo tanto, contiene más energía por Kg y cm³ que cualquier otra tecnología de motor (excepto las nuevas versiones de éste mismo modelo claro, tal como los modelos Agni). No es tan barato como los motores DC convencionales, pero para muchas aplicaciones es un motor muy superior. Además incluye ventilador integral, lo cual valga la redundancia, aumenta las prestaciones.

Observamos las tablas de características técnicas de los diversos modelos de este tipo de motores para seleccionar el que mejor resultado nos pueda dar.

| Motor | No Load Current A | Torque Constant Nm/A | Speed Constant Rpm/V | Armature Resistance DC mΩ | Armature Inductance @ 15kHz μH | Armature Inertia Kgm^2 | Peak Power kW | Peak Efficiency % | Peak Current A | Rated Power kW | Rated Speed Rpm | Rated Voltage V | Rated Current A | Rated Torque Nm |
|-------|-------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------------|---------------|-------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 95S | 6 | 0.0631 | 138 | 32.5 | 14 | 0.0117 | ##### | 87 | 100 | ##### | 6624 | 48 | 75 | ##### |

Imagen 42 – Motor LEM tipo 95 S.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|----|-----|----|--------|----|----|-----|------|------|----|-----|------|
| 127 | 5 | 0,12 | 68 | 650 | 20 | 0,0236 | 16 | 88 | 400 | 5,54 | 3264 | 48 | 140 | 16,2 |
|-----|---|------|----|-----|----|--------|----|----|-----|------|------|----|-----|------|

Imagen 43 – Motor LEM tipo 170-127.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|---|------|----|------|----|--------|-------|----|-----|------|------|----|-----|------|
| 127 | 5 | 0,15 | 54 | 22,5 | 23 | 0,0236 | 16,08 | 88 | 400 | 8,55 | 2592 | 48 | 215 | 31,5 |
|-----|---|------|----|------|----|--------|-------|----|-----|------|------|----|-----|------|

Imagen 44 – Motor LEM tipo 200-127.

Nuestra elección inicial es el Motor LEM 200-127 DC de imanes permanentes, ya que puede llegar a desarrollar unos 8.55kW de potencia (“Rated Power”) y su par (“Rated Torque”) es mucho mayor que el modelo 170-127. Aunque dicha potencia no llega a la potencia desarrollada por el motor de combustión, al ser su rendimiento mucho más alto lo compensa con creces, por tanto no habrá ningún problema en principio en este aspecto, dando incluso margen de seguridad suficiente como para evitar un gasto excesivo del motor que acorte su vida útil.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Las características más significativas de este motor para nosotros son:

- Potencia: 8.55 kW
- Rendimiento: 88%
- Velocidad de rotación del motor: 2592 r.p.m.
- Tensión: 48 V
- Par: 31.5 Nm
- Corriente: 215 A

Y estos son los planos comerciales, en los anexos está el manual de usuario con información más detallada sobre propiedades mecánicas del motor y modos de ensamblaje.

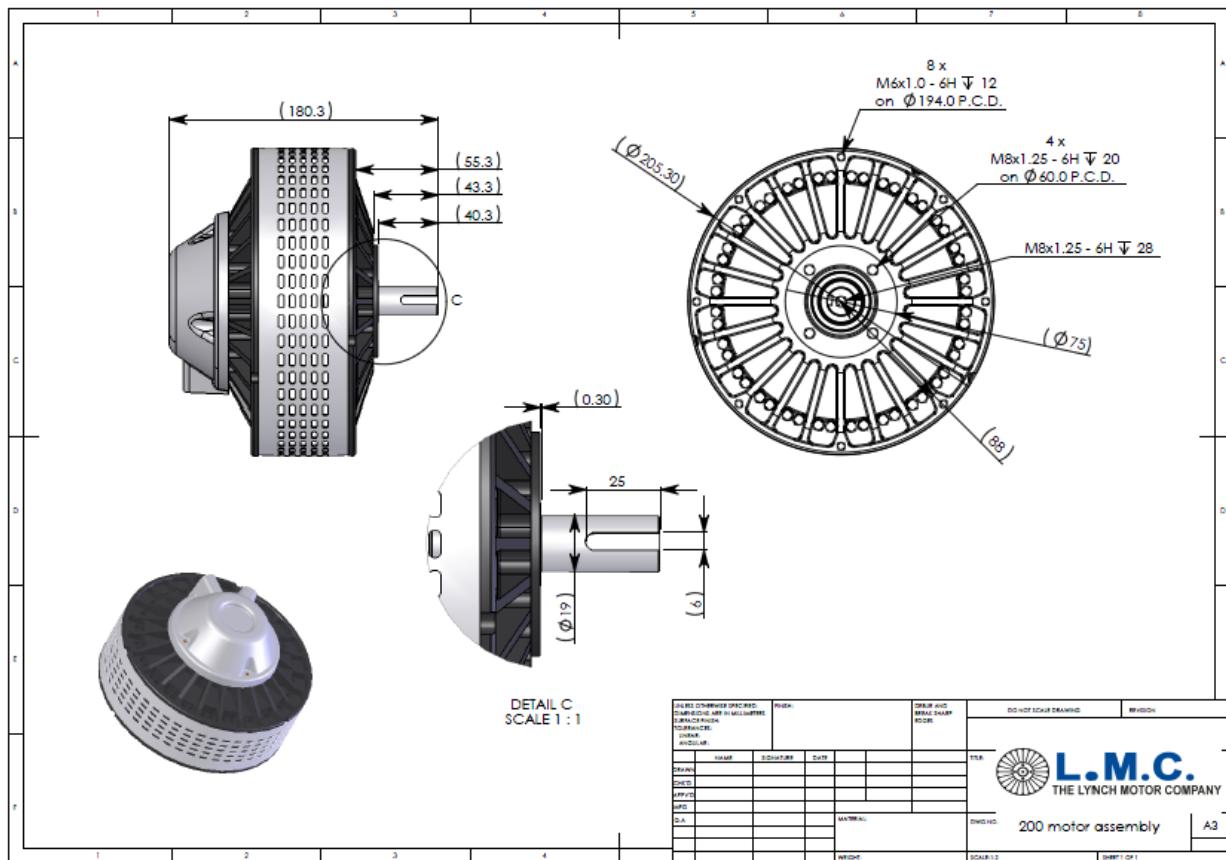


Imagen 45 – Medidas del motor LEM-200.

7. PARÁMETROS A DIMENSIONAR

Dicho motor no tendría problema en la instalación en cuanto a su cabida dentro del chasis del cortacésped, lo cual se puede comprobar echando un simple vistazo a las medidas del apartado anterior con las medidas del cortacésped, que a pesar de no estar en los planos de los anexos, fueron tomadas en el taller y son presentadas en el siguiente dibujo. Habría que esperar al envío del motor con sus correspondientes piezas de ensamblaje, lo cual quedará pendiente para el departamento de mecánica del ISPV al no cumplirse los plazos estipulados de entrega.

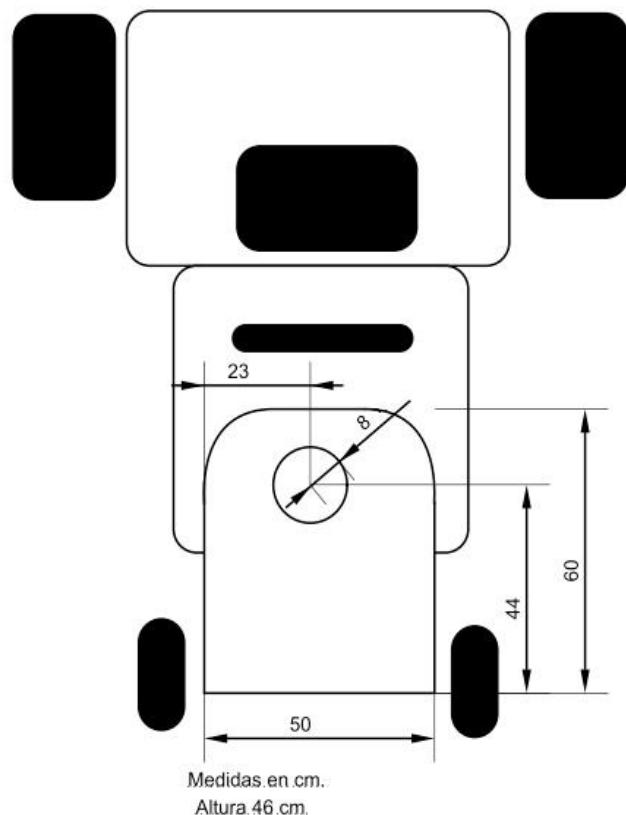


Imagen 46 – Medidas obtenidas del cortacésped MTD JE-130

En este apartado, una vez escogido el motor con el que se va a trabajar tenemos que realizar los cálculos de R (relación de la polea que une el eje motriz y el motor con el sistema de poleas) para alcanzar el compromiso velocidad-par deseado. Además de dar a conocer el par requerido por el motor.

Relación entre la salida del motor y la primera polea (r)

Sabemos que la velocidad máxima es de 10km/h (2.77 m/s y 63 r.p.m.), entonces, para calcular R:

- *Relación rueda-caja de velocidades*

Con la velocidad máxima que alcanzará el vehículo que será de 10 km/h o 63 r.p.m.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow n_1 = n_2 \times \frac{24}{1} = 63.rpm \times 24 = 1512.96rpm$$

- *Relación caja de velocidades-polea intermedia*

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow n_1 = n_2 \times \frac{186}{28} = 1512.96rpm \times \frac{186}{28} = 10050.37rpm$$

- *Relación polea del motor y polea intermedia*

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow n_1 = n_2 \times \frac{94}{122} = 10050.37rpm \times \frac{94}{122} = 7743.73rpm$$

Entonces, para saber la última relación a dimensionar, tenemos que la velocidad máxima del motor es de 2592 r.p.m. Además vamos colocar un factor de seguridad del 10% para que el motor no trabaje a su velocidad nominal, sino a una velocidad inferior porque puede ser contraproducente:

$$n_1 = 0.9 \times 2592rpm = 2332.8rpm$$

Esta velocidad n_1 , la estableceremos como la velocidad máxima que en condiciones normales desearemos.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

$$n_2 = 7743.73 \text{ rpm}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow n_1 = n_2 \times r \rightarrow 2332.8 \text{ rpm} = r \times 7743.73 \text{ rpm} \rightarrow r = 0.3$$

Entonces: $R = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow D_2 = 0.3D_1$, como la ultima polea es una polea compuesta unida por un eje con la primera, que tiene un diámetro de 122 mm y la otra con un diámetro de 44.4 mm:

$$r = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow D_2 = 0.3D_1 = 0.3 \times 44.4 = 13.32 \text{ mm}$$

Cálculo del Par

En el apartado 4.3. tenemos que nuestro par depende de la relación total (R) entre las poleas: $T_{motor} = T_{rueda} \times R = 376.4 \text{ N} \times R$, la relación es:

$$r_n = \frac{D_{motor}}{D_{salida}};$$

$$R = r_1 \times r_2 \times r_3 = \frac{44.4}{13.32} \times \frac{122}{94} \times \frac{28}{186} \times \frac{1}{24} = 0.0271$$

$$\text{Finalmente: } T_{motor} = T_{rueda} \times R = 376.4 \text{ N} \times R = 376.4 \times 0.0271 = 10.21 \text{ Nm}$$

Nuestro motor desarrolla un par de 31.5 Nm, entonces es suficiente porque apenas necesitamos de 10.21 Nm para la tracción.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Todavía podríamos aumentar ligeramente la relación (R) de nuestro cortacésped para que pueda tener mayor velocidad, siendo el par desarrollado por el motor suficiente. Si por ejemplo, tuviéramos una velocidad máxima de 100 r.p.m. a la salida la relación sería de $R=0.0428$ y el par necesario sería de 16.135 Nm. Aunque con velocidades superiores las cuchillas deberían rotar a mayor velocidad debido a que se pasa menor tiempo en la superficie de corte y habría que realizar alguna modificación en el sistema de recogida de hierba para poder extraer con más rapidez la hierva cortada. También habría que modificar alguna de las poleas de corte para que las cuchillas giraran con más velocidad.

Ahora vamos a ver el par de corte, parte fundamental del cortacésped. Consiste en dos cuchillas de gran volumen movidas por sus poleas correspondientes que enlazan con la polea compuesta del motor. La polea compuesta es un eje que une a dos poleas con diferentes diámetros. Esta polea compuesta se sitúa de forma que el eje esté vertical. La primera polea (diámetro más pequeño) esta para mover las ruedas y la otra está para mover las cuchillas del corte.

Las dos poleas, la de 93.6mm y la de 84.7mm, son las poleas que mueven las cuchillas. Tienen dos velocidades ligeramente distintas para que se genere, junto con la velocidad del cortacésped, una succión suficiente para empujar las briznas de hierba cortada hacia el recogedor, que se encuentra en la parte posterior del cortacésped.



Imagen 47 – Cuchillas del corte

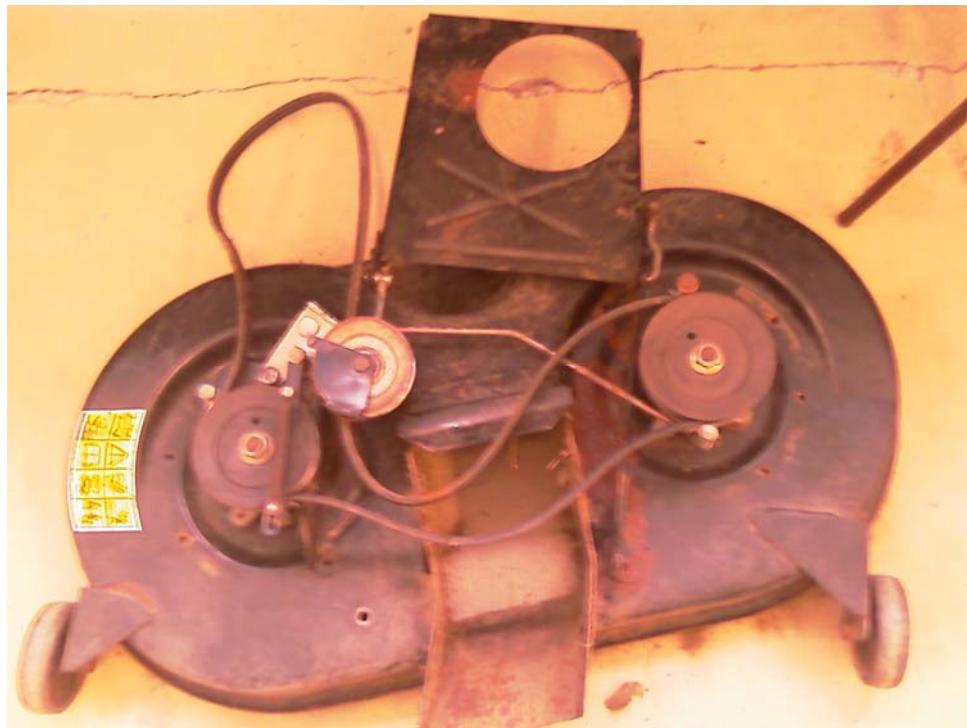


Imagen 48 – Sistema de poleas para las cuchillas del corte.

La relación de velocidad es $r=0.3$ y la velocidad en la polea compuesta será de 7743.73 rpm. Con el diámetro de la polea compuesta para el corte de 44.4mm tenemos:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow n_2 = n_1 \times \frac{D_1}{D_2} = 7743.73 \times \frac{44.4}{93.6} = 3673.3 \text{ rpm} \text{ para la primera cuchilla.}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \rightarrow n_2 = n_1 \times \frac{D_1}{D_2} = 7743.73 \times \frac{44.4}{84.7} = 4059.28 \text{ rpm para la segunda cuchilla.}$$

El par necesario para cortar hierba es complicado de calcular porque no siempre tendremos la misma densidad, ni el mismo grosor, ni el mismo tipo de hierba. Pero por eso precisamente nos centramos en calcular un par máximo, para el movimiento del cortacésped, de 10.21 Nm, y teniendo en cuenta que nuestro motor puede desarrollar un par de 31.5 Nm nos da un margen de seguridad muy elevado, ya que el par que precise el corte no será mucho mayor en condiciones normales puesto que la hierba no es un material excesivamente resistente. De todos modos esto lejos de ser un problema

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

aumenta en gran medida las prestaciones del motor respecto al corte, pudiendo ser capaz de cortar diversos materiales que pudieran entrar dentro del rango de trabajo como hierba más gruesa, otros tipos de plantas o ramitas, lo que solventaría posibles problemas futuros derivados del corte.

8. OTRAS CARACTERÍSTICAS PROPIAS DEL CORTACÉSPED

El cortacésped es un modelo que posee 6 velocidades hacia delante, 1 punto muerto y una marcha hacia atrás. El cambio de marchas tiene tres posiciones, directa, punto muerto y trasera. Cuando tenemos la directa hay otra palanca que modifica la velocidad mediante el movimiento de una polea móvil, la cual aprovecha el deslizamiento de la correa por la polea para tener mejor o peor rendimiento y así tener mayor o menor velocidad. En nuestro caso, fijamos la polea en una de las posiciones donde tenía mejor rendimiento, la 3^a posición.

En relación a los mandos de control, es decir el volante, la palanca de cambios y el selector de velocidad, solo cambiamos el selector de velocidad por un acelerador del tipo potenciómetro de pedal de 0 a 5 KΩ. Lo demás se mantendrá tal y como está.

9. ALIMENTACIÓN

Una vez tenemos calculados los parámetros físicos y mecánicos, y elegido el motor, nos ocuparnos de la alimentación del cortacésped según los requisitos de diseño.

9.1. Baterías

La tensión con la que el cortacésped va a funcionar es de 48 V. Mayoritariamente, toda la potencia consumida por el cortacésped es para el funcionamiento del motor. Como en nuestro caso el motor precisa de 48 V, tenemos que tener como mínimo esa tensión porque si no precisaríamos conversores de tensión.

Entonces, la mejor solución es utilizar 4 baterías de 12 V ligadas en serie ya que $4 \times 12 \text{ V} = 48 \text{ V}$.

La selección de las baterías es muy importante, ya que el cortacésped tiene que trabajar en zonas donde hay desniveles, polvo y bastante humedad. También son importantes las dimensiones porque el cortacésped es bastante compacto.

El peso de las baterías influye el consumo final porque son unos de los componentes con más peso en el cortacésped y puede ser contraproducente que tengamos mucha autonomía, ya que mucho más peso significa un consumo más elevado.

Las baterías escogidas son las baterías OPTIMA YellowTop Modelo YT S 2.7, y sus características más importantes se muestran a continuación:

- 38 Ah
- 0,0046 Ω de resistencia interna
- 11,6 kg
- La carga fluctuante queda entre 13,2 y 13,8 voltios
- Tiempo de duración a 25 A de consumo, 26.7 °C y 10.5 V, es de 66 minutos

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

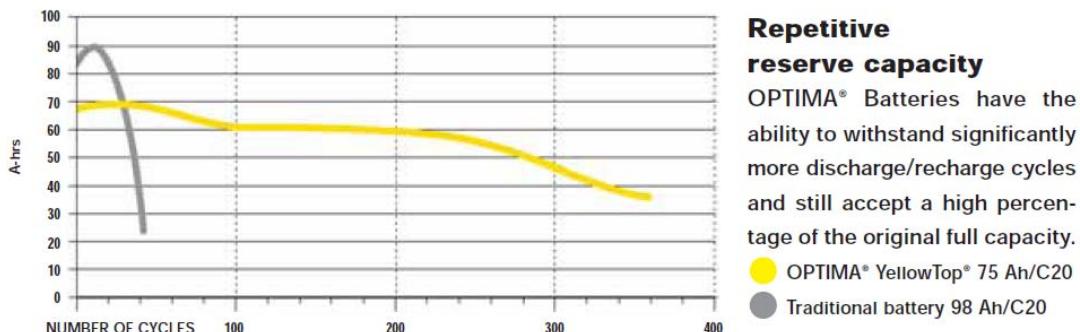


Imagen 49 – Capacidad de almacenamiento de las baterías

Para cargar estas baterías es recomendable un cargador de baterías de 13,8 hasta 15 voltios con 10 A y con un tiempo de carga de 10 horas.

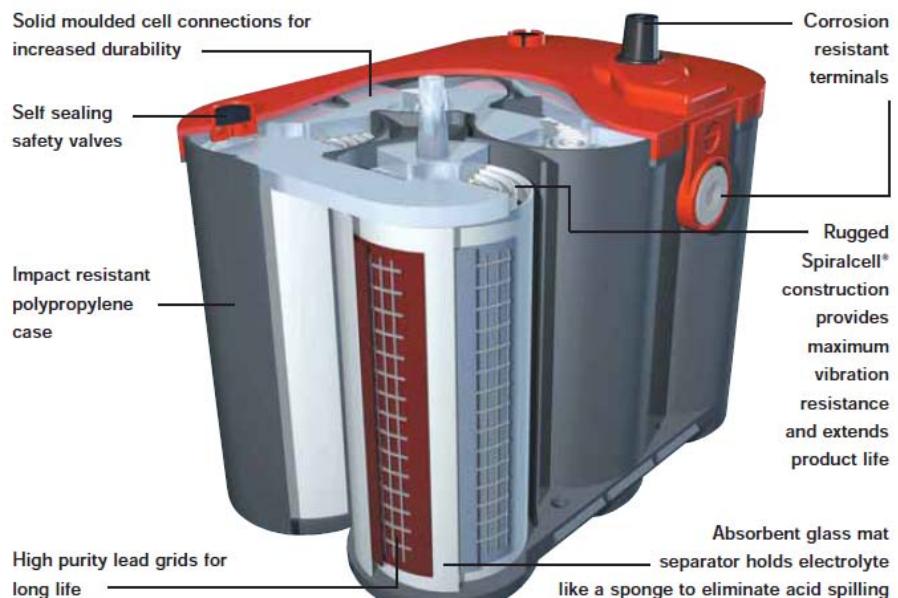


Imagen 50 – Partes de la batería

Estas baterías tienen un alto potencial en el arranque en los primeros 10 críticos segundos, una larga vida y pueden ser cargadas muchas veces sin perder sus prestaciones originales. Su nivel de descarga es de 25 A. También son muy resistentes a las vibraciones y son especialmente fuertes en vehículos “off-road”, esto es, vehículos que no usen calles asfaltadas. Este es precisamente nuestro caso, ya que el cortacésped es usado la mayor parte del tiempo en campos de hierba.



Imagen 51 – Baterías OPTIMA

Las baterías están hechas con Ácido Sulfúrico (H_2SO_4). La carcasa es de plástico de polipropileno. Este tipo de plástico que puede ser moldeado simplemente aplicando calentamiento, o sea, es un termoplástico. Por eso, siempre debemos tener mucho cuidado en la carga de las baterías y en su instalación porque el ácido sulfúrico es muy corrosivo y peligroso.

Para saber el rendimiento de las baterías nuestro sistema precisa calcular la diferencia entre los distintos potenciales.

Performance Data:

| | |
|--|---|
| Open Circuit Voltage (Fully charged): | 13.1 volts |
| Internal Resistance (Fully charged): | 0.0046 ohms |
| Capacity: | 38 Ah (C/20) |
| Reserve Capacity: | BCI: 66 minutes (25 amp discharge, 80°F (26.7°C), to 10.5 volts cut-off) |

Imagen 52 – Características eléctricas de las baterías

Por tanto tenemos:

$$E=13,1V$$

$$R= 0.0046\Omega$$

$$I_{motor}= 215A$$

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Entonces, si U es la tensión de las baterías, tenemos:

$$U = E + R \times I = 13.1 + 0.0046 \times 215 = 14.089V$$

Ahora para las potencias:

$$P_{util} = n_{baterias} \times E \times I$$

pero para saber I hay que saber cual es la intensidad por los cables del cortacésped:

$$\begin{aligned} P_{motor} &= P_{total} \times \eta_{controlador} \times \eta_{motor} \rightarrow P_{total} = \frac{P_{motor}}{\eta_{controlador} \times \eta_{motor}} \\ &= \frac{8.55kW}{0.95 \times 0.88} = 10227.27W \end{aligned}$$

$$P_{total} = U_{motor} \times I \rightarrow I = \frac{P_{total}}{U_{motor}} = \frac{10227.27W}{48V} = 213.06A$$

Entonces:

$$P_{util} = n_{baterias} \times E \times I = 4 \times 13.1 \times 213.06 = 11164.34W$$

La potencia total será:

$$P_{total} = n_{baterias} \times U \times I = 4 \times 14.089 \times 213.06 = 12007.21W$$

Y el rendimiento:

$$\eta_{baterias} = \frac{P_{util}}{P_{total}} = \frac{11164.34W}{12007.21W} = 0.929 \leftrightarrow 92.9\%$$

9.2. Cableado

Ahora tenemos que calcular los cables eléctricos del cortacésped.

$$P_{motor} = P_{total} \times \eta_{controlador} \times \eta_{motor} \rightarrow P_{total} = \frac{P_{motor}}{\eta_{controlador} \times \eta_{motor}}$$

$$= \frac{8.55kW}{0.95 \times 0.88} = 10227.27W$$

Y para saber la intensidad en los cables de nuestro cortacésped:

$$P_{total} = U_{motor} \times I \rightarrow I = \frac{P_{total}}{U_{motor}} = \frac{10227.27W}{48V} = 213.06A$$

El cortacésped trabajará con una temperatura media de 15 °C, aunque en los meses de Julio y Junio la temperatura podrá ser de 25-30°C. Entonces, escogeremos unos cables de la compañía RADALEX, con un factor de corrección de 0.96 relativo a la temperatura.

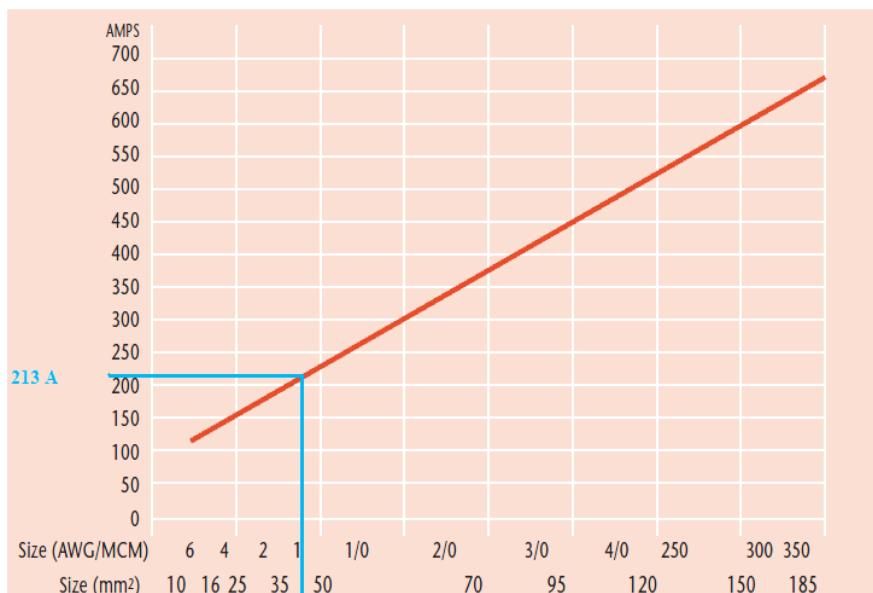


Imagen 53 – Gráfica Intensidad-sección de los cables

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Como podemos ver, los cables tienen que tener una sección entre los 35-50 mm².

| AWG/MCM | Loading current in amps for the following duty cycles | | | | |
|---------|---|-----|-----|------|------|
| | 100% | 85% | 60% | 30% | 20% |
| 6 | 125 | 135 | 161 | 228 | 280 |
| 4 | 160 | 174 | 207 | 292 | 358 |
| 3 | 188 | 204 | 243 | 343 | 420 |
| 2 | 220 | 239 | 284 | 402 | 492 |
| 1 | 250 | 271 | 323 | 456 | 560 |
| 1/0 | 300 | 325 | 387 | 548 | 670 |
| 2/0 | 350 | 380 | 452 | 639 | 782 |
| 3/0 | 400 | 434 | 516 | 730 | 894 |
| 4/0 | 470 | 510 | 607 | 858 | 1050 |
| 250 | 520 | 564 | 671 | 949 | 1163 |
| 300 | 580 | 629 | 749 | 1059 | 1297 |
| 350 | 640 | 694 | 826 | 1168 | 1431 |
| 400 | 700 | 759 | 904 | 1278 | 1565 |

Imagen 54 – Tabla de los cables

Para tener una mayor seguridad, escogeremos los cables 1/0, ya que en el arranque puede haber un pico de corriente elevado.

9.3. Protecciones

Para la protección del motor debemos poner un fusible de elevada capacidad entre las baterías conectadas en serie del motor. El fusible por lo menos será de 215 A porque es la intensidad máxima que el motor consume en condiciones nominales. Pero puede haber intensidades de pico más elevadas en el arranque. Para evitar esto ponemos un fusible de 300 A y 48 V en DC.

El mejor posible encontrado es el fusible CF8 “Compact Fuse”, con una capacidad de ruptura de 1500 A a 48 V.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

| • Limits for Pre-arcng Time | | | | | | | |
|---|-------------|----------------------|--|--|---|--|-------------------------------------|
| Rated Current | 100% | 135% | 150% | 200% | 300% | 400% | 600% |
| 50A ... 300A | > 100h | < 60min | 1 ... 600s | 0.2 ... 60s | 0.05 ... 1.5s | 0.02 ... 0.5s | < 0.2s |
| Permissible continuous operating current is \leq 80% at ambient temperature of 23°C (73.4°F). | | | | | | | |
| Rated Current / Rated Voltage | Amp Code | Breaking Capacity | Voltage Drop (max) 100% x I_{Rated} (P) (mV) | Power Dissipation (avg) 150% x I_{Rated} (P) (W) | Melting Integral (avg) 1000% x I_{Rated} (P) (A ² s) | Cold Resistance (max) (P) (Ω) | Test Cable (mm ²) |
| 50.00A / 48V | 550 | | 97 | 4.9 | 1500 | 0.00135 | 10 |
| 75.00A / • | 575 | | 80 | 6 | 9000 | 0.00072 | 10 |
| 100.00A / • | 610 | | 76 | 7.7 | 10500 | 0.00054 | 16 |
| 125.00A / • | 612 | | 72 | 8.9 | 41000 | 0.00042 | 16 |
| 150.00A / • | 615 | 1500A at 48VDC | 56 | 8.5 | 40000 | 0.00027 | 25 |
| 175.00A / • | 617 | | 60 | 11 | 95000 | 0.0002 | 25 |
| 200.00A / • | 620 | | 59 | 12 | 110000 | 0.0002 | 35 |
| 250.00A / • | 625 | | 61 | 15 | 180000 | 0.00015 | 50 |
| 300.00A / • | 630 | | 61 | 18 | 270000 | 0.00015 | 70 |

Imagen 55 – Tabla de características del fusible

9.4. Cargador

El tiempo de recarga mas recomendable será el tiempo en los Data-sheets de las baterías OPTIMA.

- Con alternador de 13.65 hasta 15 voltios.
- Con cargador de baterías (la tensión constante):
 - de 13.8 hasta 15 voltios.
 - 10 amperios como máximo.

Recharge Time: (example assuming 100% discharge – 10.5 volts)

| Current | Approximate time to 90% charge |
|----------|--------------------------------|
| 100 amps | 25 minutes |
| 50 amps | 65 minutes |
| 25 amps | 130 minutes |

Imagen 56 – Tabla de tiempos teóricos de recarga

Elegimos cargar las baterías con un cargador del tipo Zivan F4EG 48V

Las características de dicho cargador son:

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Para redes de 230 V en AC y 50 Hz
- Corriente de salida de 15 A
- Tensión nominal de las baterías de 48 v (4 baterías x 12V cada una)
- Capacidades recomendadas de las baterías de 80-190 Ah
- Rendimiento mayor que 85% para todas las condiciones de recarga
- Peso 2,2 kg
- Tamaño: 300x160x80 mm
- Frecuencia de conmutación 50 KHz±5%
- Factor de potencia ($\cos\phi$) de 0.68

Los valores de 80-190 Ah son muy elevados para nuestras baterías, pero el cargador Zivan puede ser reprogramado para cada caso, por tanto en este caso lo reprogramamos para 38Ah.



Imagen 57 – Cargador Zivan

9.5. Autonomía

La autonomía depende en su mayoría de las baterías y del régimen de funcionamiento del motor. No tiene sentido hablar de km recorridos como en los coches, ya que estos recorren largas distancias y tal es su propósito. Nosotros hablaremos de autonomía en tiempo de trabajo. Aunque cabe reseñar que el tiempo de trabajo no tiene que ser siempre igual, porque no se hace siempre el mismo trabajo, es preferible tomar este concepto ya que es más acorde a la realidad.

Para peores condiciones

Capacidad de las baterías= 38 Ah

Intensidad máxima necesaria por el motor=213.06 A

$$I_{bat} = t \times I_{max} \rightarrow t = \frac{I_{bat}}{I_{max}} = \frac{38Ah \times 4}{213.06A} = 0.7134h \rightarrow t = 42 \text{ min}$$

Para n_{max}

$n_{max} = 2332.8 \text{ r.p.m.}$

Características del motor:

$R_{motor} = 22.5 \text{ m}\Omega$

$K_{torque} = 0.15 \text{ Nm/A}$

$K_V = 54 \text{ Rpm/V}$

$$E = \frac{1}{K_V} \times n = \frac{1}{54} \times 2332.8 = 43.2V$$

$$V = R_{motor} \times I_{motor} + E \rightarrow I_{motor} = \frac{V - E}{R_{motor}} = \frac{48V - 43.2V}{0.0225\Omega} = 213.33A$$

Por tanto prácticamente coincide con el peor caso

- Para máximo par:

$T_{cond.max.} = 10.22 \text{ Nm}$, que sumando el corte sería $T_{maximo} = 20 \text{ Nm}$.

$$I_{motor} = \frac{1}{K_t} \times M = \frac{1}{0.15} \times 20 = 133.33A$$

$$I_{bat} = t \times I_{max} \rightarrow t = \frac{I_{bat}}{I_{max}} = \frac{38Ah \times 4}{133.33A} = 1.14h \rightarrow t = 68$$

- Para sólo par de movimiento:

$$I_{motor} = \frac{1}{K_t} \times M = \frac{1}{0.15} \times 10,22 = 68,13A$$

$$I_{bat} = t \times I_{max} \rightarrow t = \frac{I_{bat}}{I_{max}} = \frac{38Ah \times 4}{68.13A} = 2.23h \rightarrow t = 133 \text{ min}$$

9.7. Tiempo de carga y consumo

T_{carga} - Tiempo de carga

CB – Capacidad nominal de la batería

EC – Estado de carga da batería

CC – Corriente de carga

$$t_{carga} = \frac{(100 - EC) \times CB}{100 \times CC} \times 1.2$$

Teniendo en cuenta que las baterías están completamente descargadas vamos a asumir el estado de carga igual a 5% porque las baterías sufren descarga constantemente. Y dado que en la tabla del datasheet pone que para 48V la CC es de 15A:

$$t_{carga} = \frac{(100 - EC) \times CB}{100 \times CC} \times 1.2 = \frac{(100 - 5) \times 38}{100 \times 15} = 2.4$$

Por tanto 2 horas y 24 minutos.

Consumo eléctrico de la red

$$\text{Consumo} = P \times t = 4 \text{baterias} \times 12V \times 15A \times 2.4h = 1728Kwh$$

10. SELECCIÓN Y CONFIGURACIÓN DEL CONTROL DEL MOTOR

Después de calcular las características mecánicas necesarias del motor y sus características eléctricas, el próximo paso fue escoger un “driver” para variar la velocidad y el par del motor. El motor elegido tiene como principales características 48V de tensión continua en la alimentación, potencia de 8,55 kW y un consumo de corriente de 215 A. Hay mucha oferta de controladores en el mercado. Al final, fuimos aconsejados por el Ingeniero Vasco Santos para utilizar el controlador de la familia de controladores “Sigmadrive” de la empresa “PG Drives Technology”. Esta elección fue debida principalmente a la experiencia con controladores de esta empresa en anteriores conversiones de otros vehículos ligeros, siendo completamente satisfactoria su integración.

Estos modelos poseen una consola de programación donde se puede configurar de forma fácil el arranque, la curva de aceleración, la velocidad máxima, etc. Además son capaces de controlar varios tipos de tecnologías de motores, tales como motores CA de inducción, motores CC serie, motores CC de imanes permanentes y de motores CC de excitación externa. Por ello esta elección es óptima por si en un futuro se decide cambiar el motor por otro tipo más pequeño o por otro motor de los antes mencionados. Así solo basta con reconfigurar y adaptar el controlador al nuevo motor que se desee colocar.

Dentro de la familia “Sigmadrive” había que escoger el que más se acercase a nuestras necesidades. Por ello, dentro del catálogo de “PG Drives Technology”:

<http://www.pgdt.com/products/sigma/sigmarange.html>

Hemos escogido el controlador PMT465M, numero de serie D51065. Existe el PMT465L pero al contactar con la empresa también comercializaban el M (“medium”). Nos interesa más que el modelo L (“Large”) ya que ocupa menos espacio y además pesa menos. La longitud será de 225mm, anchura de 200, altura 49 y peso 4,1 Kg.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

| Dimensions (mm) | | Sigmadrive Frame Size | | |
|--------------------|--|-----------------------|--------|-------|
| | | Small | Medium | Large |
| Length | | 177 | 225 | 320 |
| Width | | 155 | 200 | 200 |
| Height | | 41 | 49 | 51 |
| Weight (kg) | | 1.2 | 4.1 | 6.1 |

Imagen 58 – Tabla medidas y pesos de los controladores.

En cambio no se ha efectuado la compra del “Sigmagauge”, ya que encarecería el precio final y la información que debería mostrar es completamente prescindible para un cortacésped, por ejemplo, la velocidad, ya que no sobrepasa los 10 km/h.

Aquí se explican los diversos parámetros existentes y el valor inicial que les daremos para el control del cortacésped. Estos valores son teóricos y podrán cambiarse una vez efectuadas las pruebas con el prototipo cuando sea construido. Es decir, son valores iniciales que podrán ser alterados ligeramente para conseguir un mejor ajuste o porque se haya visto un rendimiento bajo. Pero eso será más adelante. Estas tablas y sus explicaciones pueden verse en el Anexo I.

Primero nos fijamos en los parámetros relacionados con la velocidad, la aceleración y los límites de velocidad del motor.

| Ref. | Parameter | Programmer Text | Range |
|------|-----------------------|-----------------|--------------|
| 1.1 | Acceleration | Accel | 0.1s – 10.0s |
| 1.2 | Deceleration | Decel | 0.1s – 10.0s |
| 1.3 | Creep Speed | Creep | 0% – 25% |
| 1.4 | Maximum Forward Speed | SpdMaxF | 0% – 100% |
| 1.5 | Maximum Reverse Speed | SpdMaxR | 0% – 100% |
| 1.6 | Speed Limit 1 | Sp1 | 0% – 100% |
| | Inching Speed | Inch | 0% – 25% |
| 1.7 | Speed Limit 2 | Sp2 | 0% – 100% |
| | Inching Time | Time | 0.1s – 10.0s |
| 1.8 | Speed Limit 3 | Sp3 | 0% – 100% |

Imagen 59 – Parámetros del 1.1 al 1.8 relacionados con la velocidad y la aceleración.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Los parámetros con números de referencia 1.1 y 1.2 hacen referencia al tiempo que tardan en acelerar desde velocidad cero hasta alcanzar la máxima velocidad. Los valores de máxima velocidad marcha adelante y marcha atrás están establecidos en las referencias 1.4 y 1.5. Nos interesaba una aceleración lenta para que la cuchilla tenga tiempo suficiente de llegar a una velocidad óptima para el corte.
- El número de referencia 1.3 ajusta la velocidad inicial que el vehículo adoptará. Nos interesaría un nivel bajo.
- Las referencias 1.4 y 1.5 de la velocidad máxima hacia delante y hacia atrás. Se ponen al máximo, es decir valor de 100.
- Las referencias 1.6 y 1.7 dependen del parámetro 3.5 sobre el conector A (pin 5 y pin 6). Estos parámetros establecen la velocidad máxima del vehículo cuando el interruptor conectado al pin 6/7 este abierto o cerrado según el parámetro que se vaya a establecer en el punto 3.6.
- La referencia 1.8 depende del parámetro 3.6 sobre el conector A (pin 7). Si está a 0, entonces la “Speed limit 3” determina la máxima velocidad del vehículo cuando un interruptor conectado al pin 7 del conector A está abierto. Y si está a 0, entonces la “Speed limit 3” determina la máxima velocidad del vehículo cuando un interruptor conectado el pin 7 del conector A está cerrado.

Los siguientes parámetros están relacionados con el frenado.

| | | | |
|------|-----------------------------|----------|-----------------|
| 1.9 | Direction Regen. Braking | DBrake | 50A – Unit max. |
| 1.10 | Neutral Regen. Braking | NBrake | 50A – Unit max. |
| 1.11 | Footbrake Regen Braking | FBrake | 50A – Unit max. |
| 1.12 | Direction Braking Ramp | DBrkRamp | 0.1s – 10.0s |
| 1.13 | Direction Braking End Delay | DBrkEnd | 0.1s – 10.0s |
| 1.14 | Neutral Braking Ramp | NBrkRamp | 0.1s – 10.0s |
| 1.15 | Neutral Braking End Delay | NBrkEnd | 0.1s – 10.0s |
| 1.16 | Regen Speed | RegSpd | 0% – 100% |

Imagen 60 – Parámetros del 1.9 al 1.16 relacionados con el frenado.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- Las tres primeras, 1.9, 1.10 y 1.11 tienen que ver con la intensidad usada para el frenado cuando la dirección cambia, el frenado cuando el vehículo está sin señal de dirección y el frenado cuando el pedal del freno está pisado.
- La 1.12 establece la rampa de frenado por la que tarda el vehículo en pasar de la máxima velocidad hasta cero.
- La 1.13 permite mantener el vehículo a velocidad cero cuando en la referencia el tiempo de frenado ha pasado.
- La referencia 1.14 ajusta el tiempo que se toma en bajar de la máxima velocidad a cero cuando el vehículo no tiene ninguna señal de conducción ni dirección. Está indicado en el apartado 1.10 el frenado cuando el vehículo está en posición neutral.
- La referencia 1.15 es cuando el vehículo está equipado con un freno electromagnético conectado al pin 13 en el conector A. Este parámetro permite al vehículo mantenerse a cero de velocidad cuando el 1.14 ha pasado.
- Esta referencia 1.16 establece la velocidad mínima que el vehículo ha de alcanzar a fin de que el frenado de retardo empiece a operar.

Los siguientes parámetros están relacionados con los voltajes y corrientes que se necesitan para la alimentación del motor.

| | | | |
|------|--------------------------|---------|-----------------|
| 1.17 | Maximum Current | MaxCurr | 10A – Unit max. |
| 1.18 | Battery Voltage | BattV | 24V – Unit max. |
| 1.19 | Power Steering Delay | PStrDly | 0s – 50s |
| 1.20 | Electric Brake Delay | EBrkDly | 0s – 50s |
| 1.21 | Accelerator 0% Voltage | AccMin | 0V – 5V |
| 1.22 | Accelerator 100% Voltage | AccMax | 0V – 5V |
| 1.23 | Footbrake 0% Voltage | AuxMin | 0V – 5V |
| 1.24 | Footbrake 100% Voltage | AuxMax | 0V – 5V |
| 1.25 | Motor Pot. Min. | MotMin | 0V – 5V |
| 1.26 | Motor Pot. Max. | MotMax | 0V – 5V |

Imagen 61 – Parámetros del 1.17 al 1.26.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- En las dos primeras, la 1.17 y 1.18 establecemos los parámetros de la corriente máxima y del voltaje de las baterías. Es decir, 450 A (de 10 en 10 unidades) y 48 V para las baterías.
- La siguiente, 1.19, marca el periodo que la entrada del contactor que gobierna la energía (pin 14 conector A) se mantenga activo después de que el disparo originario haya desaparecido.
- La 1.20 marca el retardo después de que el freno electromecánico (conectado en el pin 13, conector A) haya actuado, después de que el vehículo haya alcanzado la velocidad cero.
- Las referencias de la 1.21 a la 1.24 marcan el voltaje a la entrada del acelerador o del freno que corresponde con la velocidad/fuerza de frenado a su máximo o mínimo.
- Las referencias 1.25 y 1.26 dependen del ajuste 3.15. Estos parámetros ajustan el voltaje en la entrada de direccionamiento, pin 4 del conector C, el cual corresponde al mínimo/máximo ángulo de dirección.

Los siguientes parámetros hacen referencia a la velocidad, el nivel de las baterías, al control del motor si fuera dual y al Standby.

| | | | |
|------|--------------------|----------|----------------------|
| 1.27 | Max. Vehicle Speed | VmaxSpd | 0 kph – 100 kph |
| 1.28 | BDI Reset Level | BDIreset | 18V – 125% Bat. V |
| 1.29 | BDI Empty Level | BDIempty | 12V – 125% Bat. V |
| 1.30 | BDI Warning Level | BDIwarn | 0% – 99% |
| 1.31 | BDI Cut-out Level | BDIcut | 0% – 99% |
| 1.32 | BDI Speed Limit | BDIspeed | 0% – 100% |
| 1.33 | Dual Motor Cutback | DMcut | 0% – 100% |
| 1.34 | Dual Motor Reverse | DMrev | 0% – 100% |
| 1.35 | Dual Motor Speed | DMspeed | 0% – 100% |
| 1.36 | Standby Delay | StdByDly | 0 min (off) – 10 min |

Imagen 62– Parámetros de velocidad, de baterías, de motor dual y del standby.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- La primera referencia, 1.27, es para que muestre en el LCD (en el caso de que lo hubiera) el valor máximo de velocidad que nosotros pongamos cuando el vehículo está al máximo de su velocidad.
- De la 1.28 a la 1.32 ajustan un reset para cuando esté al 100% o más la batería, nivel de voltaje para cuando esté descargada, aviso para cuando esté baja, nivel para cuando se ha de limitar la velocidad debido a la baja carga de la batería (1.32) y velocidad a la que tiene que funcionar cuando ha saltado la 1.31. Los niveles de alarma se fijarían sobre el 10% y el 30% respectivamente y así se vería reflejado en el Sigmagauge, pero en nuestro caso no interesaba.
- Desde la 1.33 hasta la 1.35 para que estas funciones estén activas el parámetro 3.15 debe estar a 1 o a 2. Aquí van los parámetros que queremos para la respuesta de dos motores (si los tuviéramos), uno para cada rueda. Entonces aquí hay que poner la tensión que se reduciría de uno de ellos al girar la dirección y aumentaría la del otro motor. También la velocidad máxima cuando se alcanzara el máximo giro (a derecha o izquierda) de la dirección. Estos no nos interesaban ya que solo tenemos un motor, por tanto todo al 100%.

Seguidamente los tipos de respuesta del menú “Controller set-up”, que son para habilitar las entradas de los pins o establecer tipos de funcionamientos utilizando los valores anteriores.

| Ref. | Parameter | Programmer Text |
|------|----------------------------|-----------------|
| 3.1 | Accelerator Characteristic | Lin/Curv |
| 3.2 | Not Used | Spd/Torq |
| 3.3 | Proportional Braking | Bpro/Off |
| 3.4 | Anti Roll-back (Restraint) | Arol/Off |

Imagen 63 – Parámetros del 3.1 al 3.4.

- El primer parámetro marca el tipo de respuesta para ambas entradas del acelerador y freno de pie (pins 8 y 9, conector A). Hay tres opciones para el control, lineal, curvado1 y curvado2. Los valores que se pueden insertar van del 0 al 8. Es decir, tiene 9

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

combinaciones distintas, ya que hay tres opciones disponibles para el acelerador y para el freno.

- El 3.2 no se usa.
- El parámetro 3.3 sirve para establecer como la fuerza de la dirección del frenado regenerativo es controlada. Aquí podría establecerse 0 o 1. Si el marcado es 0, la corriente del frenado regenerativo correspondería a la posición del potenciómetro del acelerador. Si el potenciómetro está en la posición mínima, la corriente mínima de frenado será de 50 A y si el acelerador está al máximo, la corriente de frenado estará ajustada en el parámetro 1.9. Si es 1, se controlará por la posición del potenciómetro del acelerador y la máxima corriente lo establecerá el 1.9. Lo dejamos a 1 ya nos parece más simple el control.
- El parámetro 3.4 ajusta si hay una función de contención cuando el vehículo está en reposo. Hay dos opciones, 0 y 1. Con 0, el controlador limitará la velocidad de deslizamiento del vehículo. El vehículo entrará y se mantendrá en un modo “Anti Roll-Back”, es decir, cuando se frena el motor verá limitada la velocidad aun después de haberse parado. En este caso pondremos el valor 1 del ajuste. El vehículo será libre de deslizarse después de finalizar el retardo de cualquier freno programado en reposo.

| | | |
|-----|-------------------------|----------|
| 3.5 | Connector A Pin 5 and 6 | Spd/Inch |
| 3.6 | Connector A Pin 7 | Spd3/Hbk |
| 3.7 | Power Steering Trigger | PsF/FR/S |
| 3.8 | Truck Type Select | Ride/Wlk |

Imagen 64 – Parámetros del 3.5 al 3.8.

- Los parámetros 3.5 y 3.6 tienen dos opciones programables, 0 y 1. Para el primero, al estar a 0, la entrada se usa para limitar la velocidad, ya establecida en el parámetro 1.6, ya sea al estar cerrado o abierto el interruptor. Mientras que para el 3.6, la entrada pin 7 del conector A, sirve para limitar la velocidad (cuando el interruptor está abierto) y el valor de velocidad se encuentra en el 1.8.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- El 3.7 ajusta la fuente de disparo para el contactor de la dirección asistida. Cuando el vehículo ha dejado de conducir, un reloj establece el tiempo que la dirección asistida permanece activa, el tiempo se ajusta en el 1.19. Hay 3 posibles opciones, 0, 1 y 2. Cada opción establece cuando deja de funcionar, después de pisar el freno, hasta que se desconecta el contacto de adelante y atrás o hasta que el contacto del asiento se cierra (se levanta el operario).
- La 3.8 ajusta la función de las entradas 3 y 4 (pins) del conector 4. Tiene dos opciones programables 0 y 1. El 0 habilita las entradas pin 3 para ser un pedal y el 4 para ser un interruptor del asiento. El 1 habilita esos pines para una configuración del vehículo en donde se puedan introducir dos dispositivos (un mando con cable de varios metros) para controlarlo a una cierta distancia y así el operario lo maneja desde fuera del vehículo, por tanto preferimos dejarlo a 0.

| | | |
|------|--------------------------|----------|
| 3.9 | Not Used | Key/Drv |
| 3.10 | Display Error Indication | Of/M/M&W |
| 3.11 | Display Status Field | Of/D/V/K |
| 3.12 | Not Used | InitDisp |

Imagen 65 - Parámetros del 3.9 al 3.12.

- El 3.9 y el 3.12 no tienen uso.
- El 3.10 marca el tipo de errores que pueden ser mostrados en el Sigmagauge. Hay 3 tipos.
- El 3.11 marca el tipo de información que aparecerá en el Sigmagauge. Hay 5 tipos, del 0 al 4.

| | | |
|------|-------------------------------|-----------|
| 3.13 | Motor Temperature Sensor Type | MTempTyp |
| 3.14 | Analogue Inputs Set-up | Accel 8/9 |
| 3.15 | Single / Dual Motor Select | Si/DL/DR |
| 3.16 | Not Used | - n/a - |
| 3.17 | CAN Node Number | CAN node |

Imagen 66 – Parámetros del 3.13 al 3.17.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- El 3.13 ajusta el tipo de sensor de temperatura que queramos controlar por medio del pin 4 del conector C.
- El 3.14 ajusta las funciones de los pines 8 y 9 del conector A para ver que pin recibe el acelerador y cual el freno.
- El 3.15 ajusta cual será la función del pin 4 del conector C y la configuración es a izquierda o derecha dentro de una configuración de motor dual. Hay tres opciones, la 0 será para un control de la temperatura del motor ajustada en el parámetro 4.1. Las otras dos sirven para la configuración dual de los motores. Por tanto la dejamos a 0.
- El 3.16 no tiene uso.
- Finalmente el 3.17 es para marcar cual es el nodo CAN (un bus que se comercializa aparte). Hay 15 opciones. Si marcamos 0 el controlador será el “Master” y si marcamos otra cosa el controlador será “Slave”. Dado que no poseemos del CAN lo dejamos a 0.

Finalmente tenemos los controles del motor.

| Ref. | Parameter | Programmer Text |
|------------|--|-----------------|
| 4.1 | Motor Temperature Cutback | TempStrt |
| 4.2 | Motor to Vehicle Speed Ratio | SpdRatio |
| 4.3 | Number of Teeth | SpdTeeth |
| 4.4 – 4.29 | Not Used | - n/a - |
| 4.30 | Current Threshold | CurrTh |
| 4.31 | Lower Maximum Current | ImaxLow |
| 4.32 | Threshold Timer | IthTime |
| 4.33 | Offset M1, (Applicable in Reverse Drive) | Oset1R + |
| 4.34 | Offset M2 (Not Applicable) | - n/a - |
| 4.35 | Offset M3, (Applicable in Forward Drive) | Oset3F + |
| 4.36 | Gain M1, (Applicable in Reverse Drive) | Gain1R |
| 4.37 | Gain M2 (Not Applicable) | - n/a - |
| 4.38 | Gain M3, (Applicable in Forward Drive) | Gain3F |

Imagen 67 – Parámetros del 4.1 al 4.38 relacionados con el motor.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

- El 4.1 marca cuándo el controlador debe de reducir la corriente para proteger el motor. La temperatura se medirá mediante un sensor externo. El valor irá de los 1 °C hasta los 151 °C. Marcamos como temperatura 151 °C y desactivamos esta opción.
- El 4.2 ajusta la relación entre la velocidad rotacional del motor y la velocidad de conducción del vehículo. En conjunción con el parámetro 1.27 será utilizada para enviar esta información al Sigmagauge.
- El 4.3 ajusta el número de pulsos. Es decir, dientes (de tensión) en el “encoder” que corresponden a una revolución del motor.
- Del 4.4 al 4.29 no se usan.
- El 4.30 ajusta el nivel de corriente, el cual si es excedido se activará el umbral del reloj (4.32).
- El 4.31 ajusta el valor de la corriente disponible para el motor una vez que el periodo del reloj 4.32 haya transcurrido.
- El 4.32 ajusta el periodo de tiempo, el cual si es excedido, se iniciaría la reducción de la corriente máxima que envía el controlador al motor. Se puede ajustar de 0 a 60 segundos en escalones de 1 segundo. La dejamos a 0.

Hay valores máximos permisibles para cada modelo:

| | Maximum Drive Current | Current Threshold | Threshold Timer | Lower Maximum Current |
|---------|-----------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|
| PMT835M | 350A | 350A | 60s | 350A |
| PMT465L | 650A | 650A | 60s | 650A |
| PMT445M | 450A | 450A | 60s | 450A |
| PMT425S | 250A | 250A | 20s | 250A |

Imagen 68 – Valores de corriente y tiempo máximos para el parámetro 4.32.

- Del parámetro 4.33 al 4.38 son parámetros de fábrica que no deben ser alterados bajo ninguna circunstancia.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Ahora vamos a colocar los valores dentro del controlador.

| AC Traction settings | | | Controller: PMT465M | | Motor | | Software: | | 5.3.0 | | | |
|----------------------|-----------|-------|---------------------|----|----------|---|------------------|----------|----------|-----|--|--|
| Cliente: ESTV | | | PMS 170 | | | | Date: | | 11-01-11 | | | |
| 1.Adjustments: | | | 3.Controller Setup: | | | | 4.Motor setup DC | | | | | |
| 1 | Accel | 3 | Sec | 1 | Lin/Curv | 5 | 1 | TempStrt | 151 | oC | | |
| 2 | Decel | 1 | Sec | 2 | Vp/Tq/Sp | 0 | 2 | SpdRatio | 1,0 | Num | | |
| 3 | Creep | 0 | Hz | 3 | Bpro/Off | 1 | 3 | SpdTeeth | 0 | Key | | |
| 4 | SpdMaxF | 100 | Hz | 4 | Arol/Off | 1 | 4 | SpdPoles | NA | Key | | |
| 5 | SpdMaxR | 75 | Hz | 5 | Spd/Inch | 2 | 5 | SPDmin | NA | Hz | | |
| 6 | Sp1/Inch | 100 | Hz | 6 | Spd3/Hbk | 1 | 6 | SPDboost | NA | Hz | | |
| 7 | Spd2/Time | 100 | Hz | 7 | PsF/FR/S | 0 | 7 | SPDbase | NA | Hz | | |
| 8 | Spd3 | 100 | Hz | 8 | Ride/Wlk | 0 | 8 | SPDmax | NA | Hz | | |
| 9 | Dbrake | 80,0 | % | 9 | Key/Drv | 0 | 9 | Vmin | | Vrm | | |
| 10 | Nbrake | 60,0 | % | 10 | Of/M/M&W | 2 | 10 | D Vmin | | Vrm | | |
| 11 | Fbrake | 70,0 | % | 11 | Of/D/V/K | 2 | 11 | D Vboost | | Vrm | | |
| 12 | DBrkRamp | 1,5 | Sec | 12 | InitDisp | 0 | 12 | D Vbase | | Vrm | | |
| 13 | NBrkRamp | 0,5 | Sec | 13 | MTempTyp | 0 | 13 | D Vmax | | Vrm | | |
| 14 | FBrkRamp | 0,3 | Sec | 14 | Accel8/9 | 1 | 14 | D Smin | | Hz | | |
| 15 | NBrkEnd | 0,5 | Sec | 15 | Si/DL/DR | 0 | 15 | D Sboost | | Hz | | |
| 16 | regSpd | 1,0 | Hz | 16 | n/a | 0 | 16 | D Sbase | | Hz | | |
| 17 | MaxCurr | 450 | Arm | 17 | CanMode | 0 | 17 | D Smax | | Hz | | |
| 18 | BattV | 48,0 | V | | | | 18 | BDVmin | | Vrm | | |
| 19 | PStrDly | 5,0 | Sec | | | | 19 | BDVboost | | Vrm | | |
| 20 | EBrkDly | 0,5 | Sec | | | | 20 | B Vbase | | Vrm | | |
| 21 | AccMin | 3,5 | V | | | | 21 | B Vmax | | Vrm | | |
| 22 | AccMax | 0,1 | V | | | | 22 | BDSmin | | Hz | | |
| 23 | AuxMin | 0,5 | V | | | | 23 | BDSboost | | Hz | | |
| 24 | AuxMax | 0,5 | V | | | | 24 | B Sbase | | Hz | | |
| 25 | MotMin | 0,2 | V | | | | 25 | B Smax | | Hz | | |
| 26 | MotMax | 4,8 | V | | | | 26 | BNVmin | | Vrm | | |
| 27 | VmaxSpd | 12 | KPH | | | | 27 | BNVboost | | Vrm | | |
| 28 | BDIreset | 49,0 | V | | | | 28 | BNSmin | | Hz | | |
| 29 | BDIempty | 42,0 | V | | | | 29 | BNSboost | | Hz | | |
| 30 | BDIwarn | 30,0 | % | | | | 30 | CunTh | 450 | A | | |
| 31 | BDIcut | 10,0 | % | | | | 31 | ImaxLow | 450 | A | | |
| 32 | BDIspeed | 100,0 | Hz | | | | 32 | IthTime | 0 | s | | |
| 33 | Dmcut/Ac | 100,0 | % | | | | 33 | Oset1R | 11 | bit | | |
| 34 | Dmrev/De | 100,0 | % | | | | 34 | Oset2A | N/A | bit | | |
| 35 | Dmspeed | 100,0 | % | | | | 35 | Oset3F | 12 | bit | | |
| 36 | StdByDly | 0,5 | % | | | | 36 | Gain1R | 94 | % | | |
| | | | | | | | 37 | Gain2A | 0 | % | | |
| | | | | | | | 38 | Gain3F | 92 | % | | |

Imagen 69 – Valores de corriente y tiempo máximos para el parámetro 4.32.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

Los parámetros han sido elegidos en base al teórico funcionamiento del cortacésped, de todos modos se han explicado todos los apartados y funciones por si, tras las pruebas y ensayos, pudiera ser necesario o recordable utilizar otras opciones. Lo cual es altamente probable puesto que en la mayoría de los casos en la práctica las cosas no funcionan como en la teoría al no tener absolutamente todas las variables en cuenta.

Estos parámetros se han realizado con ayuda del Ingeniero Vasco Santos. En el apartado 3.1 nos recomendó la opción 5 en vez de nuestra propuesta de opción 2. La opción 2 es, acelerador con “curved 2” y pedal de freno con “linear”. En cambio la 5 es, acelerador con “curved 2” y freno con “curved 1”.

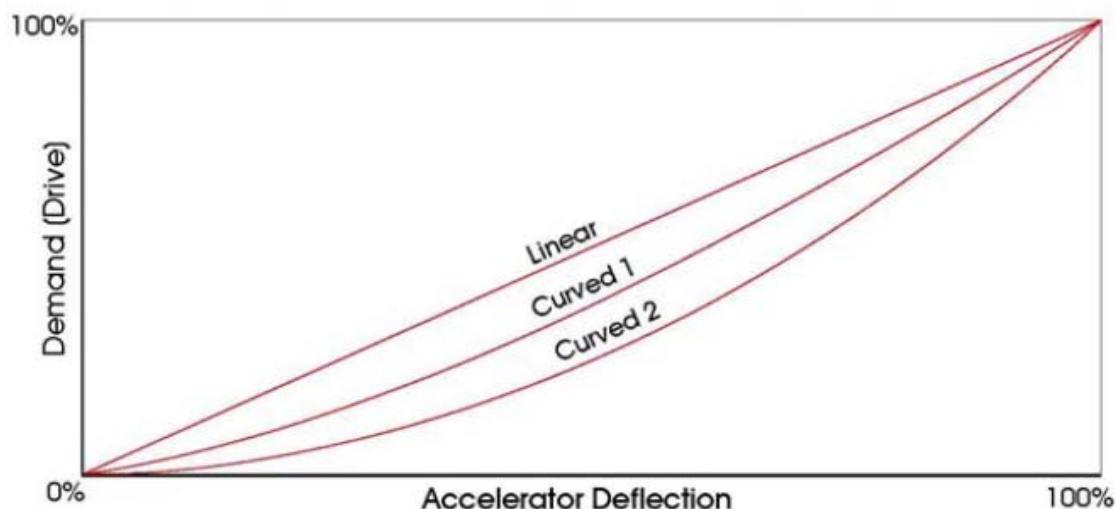


Imagen 70 – Respuesta para el acelerador y el freno.

11. INTERCONEXIONADO

Finalmente presentamos el esquema de conexiones que sería necesario para el correcto funcionamiento del mismo, con especial detalle en las conexiones del controlador.

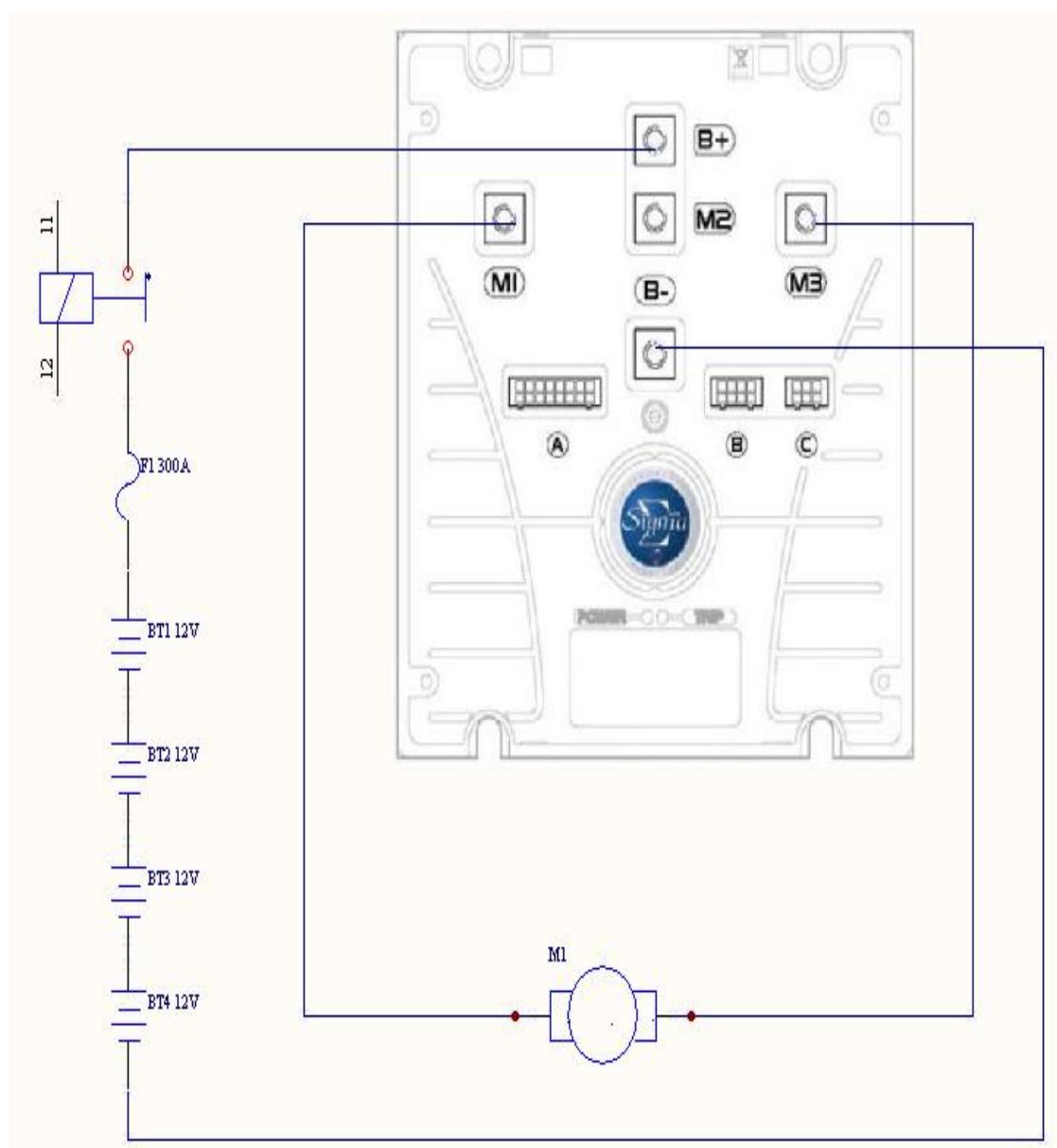


Imagen 71 – Esquema de conexiones del controlador, el motor, el fusible y las baterías

12. RENDIMIENTO

El rendimiento una parte muy importante del proyecto, ya que el rendimiento de las máquinas con motor de combustión es muy bajo, cerca de 20-30% y la restante energía es desperdiciada. El rendimiento total es la multiplicación de todas las partes de nuestro sistema, desde la toma de 230V hasta llegar la energía a las ruedas y hojas de corte o cuchillas. También vamos a tener en cuenta el rendimiento de la carga de las baterías, es decir, del cargador.

Rendimiento eléctrico

- Baterías:

$$\mu = 92.9\%$$

- Motor:

$$\mu = 88\% \text{ (apartado 7.5.2)}$$

- Controlador:

$$\mu = 94\% \text{ (apartado 7.8)}$$

- Cargador

$$\mu > 85\% \text{ (datasheet de cargador Zivan NG1)}$$

Entonces, el rendimiento eléctrico será de:

$$\mu_{electrico} = \mu_{bat} \times \mu_{contr} \times \mu_{motor} = 0.929 \times 0.94 \times 0.88 = 0.768 \rightarrow \mu_{electrico} = 76.8\%$$

Rendimiento mecánico

- Correas de las poleas

$$\mu = 95-97\%$$

- Poleas (rozamiento con el eje)

$\mu=98\%$ (casi despreciable)

- Caja de velocidades

μ =variable, pero la velocidad será controlada por el controlador, quedando fija la polea que hace la relación entre una posición que podrá ser en la 3^a marcha. El cortacésped tiene 6 marchas para adelante, 1 punto muerto y 1 para atrás. Entonces el rendimiento medio de esta marcha elegida como fija será aproximadamente:

$\mu=70\%-80\%$

$$\mu_{mecanico} = \mu_{correas} \times \mu_{poleas} \times \mu_{caja} = 0.95 \times 0.98 \times 0.7 = 0.6517 \rightarrow \mu_{mecanico} = 65.17\%$$

Rendimiento total

$$\mu_{total} = \mu_{mecanico} \times \mu_{electrico} = 0.768 \times 0.6517 = 0.5 \rightarrow \mu_{total} = 50\%$$

El rendimiento en la práctica debería ser mayor ya que algunos rendimientos como el mecánico están calculados para el peor de los casos.

13. PRESUPUESTO

Establece el coste total de todos los componentes que se deben comprar. No incluye las piezas mecánicas que pudieran ser necesarias para la correcta instalación del motor en el chasis o para mejorar la transmisión, por ello deberá esperarse a la recepción del motor y realizar su correspondiente estudio y trabajo, lo cual quedará a cargo del departamento de Mecánica del ISPV en caso de seguir con el proyecto.

| Descripción | Fabricante | Cantidad | Precio Unitario | Precio Total |
|--|----------------------|----------|-----------------|--------------|
| Motor LEM-200-127 DC | LEM srl | 1 | 1044,17 € | 1044,17 € |
| Controlador PMT465M | PG drives technology | 1 | 710,60 € | 710,60 € |
| Contactor eléctrico JCG-6 250 | Ametek | 1 | 83,20 € | 83,20 € |
| Cable de unión del acelerador al controlador | Radalex | 1 | 36,50 € | 36,50 € |
| Fusible de 250 A | Wickman USA Inc. | 1 | 3,36 € | 3,36 € |
| Portafusibles (DC DIN43562) | SIBA | 1 | 17,50 € | 17,50 € |
| Potenciómetro (0-5Komhs) | Diotronic S.A. | 1 | 15,60 € | 15,60 € |
| Terminales de cobre GC 50-8 | Radalex | 5 | 2,50 € | 12,50 € |
| Baterías | Optima bateries | 4 | 179,29 € | 717,16 € |
| Cables PC50-M | Radalex | 8m | 11,60€/4m | 23,20 € |
| Post Terminal Clamps – Heavy Duty to suit 60mm Cable | Radalex | 8 | 4,41 € | 35,28 € |
| Power Cable Terminal Eyelets 35mm2 – 6,8, o 10mm | Radalex | 8 | 0,78 € | 6,24 € |
| Cargador F4EG 48V | Zivan | 1 | 553,20 € | 553,20 € |
| Mano de obra (instalación y pruebas y ensayos) | | 24h | 10 € | 240,00 € |
| | | | TOTAL: | 2.454,34 € |

14. PLANIFICACIÓN

Este es el cronograma de la realización del proyecto, desde que fue iniciado el 22 de Febrero hasta su aprobación en Portugal, y posteriormente reconducido en España

| Mes-año | feb-10 | | | | mar-10 | | | | abr-10 | | | | may-10 | | | | jun-10 | | | | Jul-10 | | | | oct-10 | | | | nov-10 | | | | dic-10 | | | | ene-11 | | | | feb-11 | | | |
|--|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|---|---|---|--------|--|--|--|
| Semanas | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | |
| Búsqueda de información | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Memoria | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Cálculos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Toma de datos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Diseño de la solución | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Desmontaje | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Instalación de motor, baterías, controlador* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Mediciones* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Presupuesto | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Traducción | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

*En estos apartados me fue imposible su realización por causas ajenas a mi trabajo, concretamente la crisis económica y la falta de presupuesto para cumplir los plazos para la llegada del motor y controlador prometidos en un principio por el ESTV

15. CONSIDERACIONES Y CONCLUSIONES

Una vez se asignó el proyecto hubo que realizar una amplia búsqueda de información a través de Internet fundamentalmente de modo que se pudiera ir avanzando en el proyecto, ya que aún no tenía acceso al taller. La búsqueda era compleja y extensa y se recurrió a empresas ya consolidadas en el sector de la conversión de coches eléctricos y de motor, principalmente inglesas y portuguesas, sobre todo siguiendo las recomendaciones del coordinador del proyecto Vasco Santos.

Cuando finalmente conseguimos acceso al taller y fuimos a desmontar el cortacésped nos informaron que el viejo motor de gasolina ya se lo habían llevado, sin dar demasiadas explicaciones de quién ni por qué, y para mayor desgracia nuestra no tenían ningún tipo de documentación del aparato en cuestión. Por tanto tuvimos que buscar información sobre el cortacésped, su motor, y deducir aspectos del funcionamiento que sin el motor inicial era imposible de comprobar. En esos primero compases de tiempo también se tuvo que hacer frente problemas en el diseño, por ejemplo al hacer el despiece del cortacésped, ya que aparecían muchos elementos que nos eran desconocidos tales como los sistemas de poleas o la palanca que movía la polea móvil que era responsable de variar la velocidad del cortacésped mediante un mayor o menor rozamiento.

Con alguno de estos problemas tuve que solicitar ayuda al departamento de mecánica de la universidad, y muchos otros aspectos tuvieron que ser resueltos mediante medidas en el taller al ser el cortacésped de un modelo muy antiguo, del cual no teníamos ningún documento en un principio y sólo pudimos empezar a dilucidar el asunto al encontrar planos de modelos parecidos, aunque finalmente se consiguieron los planos del modelo exacto mediante una página alemana de piezas de vehículos y herramientas de motor, y aun así, no estaban correctamente acotados, por lo que realizar cálculos con dichos planos era una quimera.

No obstante el coordinador fue ayudando a desatascar estas situaciones con sus recomendaciones de mirar las empresas LMC y PG Drives Technology, por ejemplo, lo cual ayudó mucho a enfocar el proyecto en esa vía y evitar seguir dando vueltas a todos los tipos de soluciones que pudiese haber.

En definitiva nos interesaba un motor que desarrollara una potencia parecida al de combustión, en realidad sería menor ya que el rendimiento del motor de combustión es muy pobre frente al rendimiento del motor eléctrico, que es bastante alto. El problema del tipo de motor a escoger no fue muy grande, ya que se nos aconsejaba que fuera de fácil control y que tuviera un buen sostenimiento del par en trabajo, es decir, características del motor DC, lo cual al comprobar las empresas recomendadas fue casi automático. Se efectuaron más medidas y cálculos, tanto de peso del conjunto como de fuerza que tendría que soportar. Por ello la búsqueda se centró en encontrar un motor DC de imanes permanentes que fuera óptimo para su instalación y que cumpliera con los requisitos, y de ahí que nos decantásemos por la elección final.

El departamento de Ingeniería Electrotécnica, a pesar de su experiencia con otros vehículos eléctricos, no tenía gran experiencia en sistemas tan anticuados de poleas, ya que las conversiones realizadas anteriormente incluían coches nuevos y un quad. Seguramente el sistema del cortacésped pudiera ser altamente mejorado si se pudiera formar un grupo de trabajo de electrónicos y mecánicos, de modo que se pudieran realizar conversiones de ciertos elementos, tales como mecanizado, ensamblaje de piezas o reforzar el chasis.

Lamentablemente el proyecto finalmente no pudo ser montado debido a problemas burocráticos relacionados con el periodo de crisis actual ya que se fueron retrasando los plazos de entrega del motor y controlador, y al final no llegaron los componentes durante el periodo lectivo dentro del programa ERASMUS, y dada la crisis, seguramente nunca lleguen. Aunque nunca sabremos si fue cosa de que no llegó el dinero suficiente al ISPV para dicho proyecto, o que simplemente las empresas encargadas no pudieron cumplir los plazos por los problemas de crédito e inversión

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

propios de la crisis actual, el caso es que uno aprende por qué los plazos son tan importantes, de modo que hay que andar con pies de plomo en éste aspecto, y para otras ocasiones, tener preparada siempre una alternativa por si surgiera un problema parecido.

Por otra parte el proyecto de transformación de un cortacésped normal a un cortacésped eléctrico no parece viable económicamente a primera vista, debido principalmente al enfoque tan específico del proyecto, que se limita a coger un cortacésped existente y hacerle las necesarias modificaciones, en un contexto en el cual ciertos elementos que allí puedan ser de extrema utilidad tales como el cargador Zivan (que sirve al Departamento de Electronica del ISPV para recargar todos sus vehículos eléctricos) o como la experiencia con controladores y motores ya ampliamente conocidos, cuando en otro sitio lo normal es tener otros recursos y otras experiencias, que en definitiva influyen tanto o más que otros factores. Aunque en cierta medida tampoco es tan caro económicamente, ya que la durabilidad de estos motores es bastante alta y el ahorro de combustible es bastante elevado para estos aparatos que están trabajando continuamente durante los meses de primavera, verano y parte del otoño y en superficies bastante extensas. Además, la ausencia de ruido o la disminución muy significativa del mismo repercute en la mejora de las condiciones laborables y de salud de los operarios. Que dicho sea de paso, aunque otro tipo de motores pudieran generar menos ruido, resulta prácticamente anecdótico, puesto que el problema del ruido viene sobre todo del motor de gasolina, y al sustituirlo por uno eléctrico se reduce tanto, que estando el cortacésped a una distancia considerables de aulas y clases, el sonido es prácticamente inaudible. Y aunque los operarios todavía sufran en cierto modo el ruido, seguramente agradecerán enormemente el cambio. En definitiva la mejora en la calidad del producto está garantizada, aunque la inversión inicial pueda ser alta.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que han ayudado y colaborado de manera desinteresada y especialmente a la “Escola Superior de Tecnologia de Viseu”, Departamento de Engenharia Electrotécnica da ESTV, Coordinador del Proyecto Ing. Vasco Santos del Departamento de Eng^a Electrotécnica, Departamento de Engenharia Mecânica y Ing. Joaquim Delgado.

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

16. NORMAS Y LEYES

Este proyecto se ajusta en su elaboración a la normativa vigente aprobada por el Ministerio da Economia e da Invação. Por ello, es de carácter obligado el cumplimiento de todas y cada una de las siguientes normas:

- Directiva de Compatibilidad Electromagnética 2004/108/CE
- Directiva de Baja Tensión 2006/95/CE

17. DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

BLDC: en inglés “Brushless DC”, es llamado así porque no posee las características escobillas de los motores CC normales y presenta algunas ventajas respecto a estos últimos.

Carcasa: es la estructura mecánica exterior de acero o hierro fundido. La carcasa sirve para alojar el circuito magnético, el circuito eléctrico y la sustentación de la parte rotativa, cuando esta existe.

Conmutación: cuando una escobilla pasa de contactar con una delga a hacerlo con la siguiente, se produce un cambio de sentido en la circulación de la corriente en la bobina unida a la delga.

CPU: “Central Processing Unit”, unidad central de procesamiento. Es un procesador o microprocesador que interpreta las instrucciones y procesa los datos contenidos en los programas del computador.

Eje de la armadura (rotor): imprime rotación al núcleo de la armadura, a los bobinados y al conmutador.

Encoder: es un dispositivo, circuito, programa de software o algoritmo que convierte información de un código o formato a otro. Suele usarse para controlar las rotaciones de un motor paso-paso o similares.

Enrollamiento de la armadura: esta constituido por bobinas aisladas entre sí (bobinado) y del núcleo de la armadura. Esta colocado en las ranuras y eléctricamente ligado al conmutador.

Enrollamiento de campo: bobinado constituido por pocas espiras de hilo grueso para el campo serie o de muchas espiras de hilo fino para el campo-shunt. Esencialmente, las

Estudio de elección y control de un motor eléctrico en un cortacésped tractor

bobinas de campo son electroimanes, cuyos Amperio-espiras (Ae), generan una fuerza magnetomotriz adecuada a la producción en el entrehierro del flujo necesario para generar una f.e.m. o una fuerza mecánica. Los enrollamientos de campo son soportados por los polos.

Escobillas: suelen ser de grafito y cobre. Se encuentran en la base del motor una en cada polo y su función es la de comunicar la electricidad sobre el conmutador. En las escobillas es donde deberá ir la alimentación.

F.C.E.M.: fuerza contraelectromotriz o tensión generada en un conductor debido al campo magnético que lo atraviesa.

IGBT: acrónimo de “Insulated Gate Bipolar Transistor”, transistor bipolar de puerta aislada. Transistor que generalmente se usa como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

Interpolo: estos polos auxiliares y su enrollamiento son montados en la carcasa de la máquina. Se localizan en la región interpolar es decir entre los polos principales. Son generalmente de tamaño menor que los polos. El enrollamiento del interpo está compuesto de algunas pocas espiras de hilo grueso debido a que está ligado en serie con el circuito de la armadura, de modo que a f.e.m. sea proporcional a la corriente de la armadura.

Microcontrolador: dispositivo de una potencia inferior a un microprocesador pero que cuenta entre sus características con estar dotado de memoria, CPU y unidades tanto de entrada como de salida.

Microprocesador: es un circuito integrado que contiene algunos o todos los elementos hardware, y el de CPU, que es un concepto lógico. Una CPU puede estar soportada por uno o varios microprocesadores, y un microprocesador puede soportar una o varias

CPU. Un núcleo suele referirse a una porción del procesador que realiza todas las actividades de una CPU real.

MOSFET: acrónimo de “Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor”, es decir, transistor de efecto de campo de semiconductor de óxido metálico. Es el más común de la clase de los transistores de efecto de campo basado en la estructura MOS usados en la microelectrónica.

Motor paso a paso: También denominados PaP, son dispositivos electromecánicos que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares, lo que significa es que es capaz de avanzar una serie de grados (paso) dependiendo de sus entradas de control

Núcleo de la armadura: está ligado al eje y está construido por láminas de material ferromagnético, presentando una baja reluctancia magnética entre los polos. Las láminas sirven para reducir las corrientes parasitas en el núcleo, y el acero usado tiene características especiales destinadas a producir una baja pérdida por histéresis.

El núcleo contiene ranuras axiales en su periferia para la colocación del enrollamiento de la armadura.

Polea compuesta: se trata de dos poleas, o más, unidas por un eje y generalmente con diferentes tamaños.

Polos: están constituidos de hierro laminado y atornillados o soldados en la carcasa después de la inserción de los enrollamientos de campo en los mismos. La expansión polar es curvada y es más larga que el núcleo polar, para esparcir el flujo uniformemente.

PWM: del acrónimo en inglés “Pulse-Width Modulation”. Es una técnica por la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (senoidal o cuadrada) para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga o transmitir una señal de comunicación.

Regulador: sistema de regulación cuyo objetivo prioritario es mantener la salida del sistema en un valor constante, el de la referencia.

Sensor: elemento que detecta manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos que aprovecha sus cualidades de tal modo que consigue adaptar la señal que mide para que la pueda interpretar otro elemento, generalmente un microcontrolador o procesador.

Servomecanismo: sistema de regulación cuyo objetivo prioritario es mantener el error nulo cuando la referencia es variable. Es un sistema seguidor.