

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO
COLEGIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**Diseño, construcción y control de un motor de
reluctancia conmutada**

TRABAJO RECEPCIONAL

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE

**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN
SISTEMAS ELECTRÓNICOS INDUSTRIALES**

PRESENTA:

JOAQUÍN TORRES PÉREZ

DIRECTOR DE TRABAJO RECEPCIONAL

MTRO. CHRISTIAN AGUSTÍN VÁZQUEZ VILLANUEVA

Ciudad de México, septiembre de 2017.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS ©

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Dedicatoria

A todos mis maestros...

A mis primeros maestros (Mis padres): Carmen Pérez Camarillo y Heriberto Torres Tezca por su infinita paciencia y confianza en mí y en mi proyecto de vida

A mis segundos maestros (Mis hermanas y hermanos): Felipe, Claudio, María, Alfonso, Josefina, Bertha, Mauricia, Everardo y Lucía; porque aprendimos a crecer como familia

A mis terceros maestros, mis amigas y mis amigos, que nunca fueron muchos; pero todos de buena calidad. (casi hermanos)

A mis cuartos maestros (Mis profesoras y mis profesores de todos los tiempos) de quienes pude aprender algo para ser mejor persona

A mi novia Ara por ser mi luz al final de un largo y oscuro túnel

A todas ellas y ellos... GRACIAS...

Joaquín.

Índice general

1. Introducción	3
2. Electricidad y magnetismo	6
2.1. Electricidad Estática	6
2.2. Electricidad dinámica	7
2.3. Corriente directa y corriente alterna	7
2.4. Imanes permanentes	7
2.5. Electroimanes	8
2.6. Reluctancia	9
3. Resumen de los motores eléctricos	10
3.1. Breve historia de los motores eléctricos	10
3.2. Motores de corriente directa	12
3.3. Motores de corriente alterna	12
4. El motor de reluctancia conmutada	13
4.1. Principios del motor de reluctancia conmutada	13
4.2. Construcción del primer prototipo de motor de reluctancia conmutada . .	18
4.3. Datos que aportó el primer prototipo de motor de reluctancia conmutada	19
4.4. Construcción del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada .	22
4.5. El rotor, los dientes y los baleros	24
4.6. Las primeras pruebas de campos magnéticos	26

4.7. La máquina de trenzado	31
4.8. La máquina para hacer las bobinas	32
4.9. Las últimas pruebas de los campos magnéticos	32
4.10. El generador de secuencias de frecuencia variable y la etapa de potencia .	36
4.10.1. Primeras pruebas con Arduino UNO	36
4.10.2. Primeras pruebas con el 555, el contador ascendente descendente 74ls192	37
4.11. Programación de la memoria “M27C256B” UV EPROM	39
4.12. Etapa de potencia	43
5. Resultados	45
5.1. Parámetros eléctricos de los prototipos	45
5.1.1. Primer prototipo:	45
5.1.2. Segundo prototipo:	46
5.2. Costos	46
5.2.1. Primer prototipo	46
5.2.2. Segundo prototipo	47
5.3. Formas de onda de voltaje del circuito digital.	49
5.4. Formas de onda en los transistores de potencia	50
5.5. Formas de onda de en las bobinas	50
5.6. Velocidad rpm del motor	51
5.7. Relación entre frecuencia de conmutación y velocidad rpm del motor de reluctancia conmutada	54
6. Conclusiones	57

Capítulo 1

Introducción

Los motores eléctricos han evolucionado desde su descubrimiento hasta nuestros días; los diseños más antiguos vieron la luz hace casi 150 años y cualquier día puede aparecer una nueva propuesta de diseño. Los motores de reluctancia conmutada hubieran sido de los primeros motores eléctricos en ver la luz debido a que su principio de funcionamiento es simple: se trata de aprovechar la atracción que ejercen los campos magnéticos en los materiales férricos. Estos campos magnéticos se pueden controlar si provienen de energizar y des-energizar bobinas por pares y polaridades opuestas en secuencia, colocadas alrededor de un rotor dentado. Este diseño de motor no fue posible hasta la llegada de los semiconductores y el desarrollo de los mismos.

El motor de reluctancia conmutada debe su nombre al efecto “reluctivo” de algunos materiales férricos, lo que quiere decir, que estos materiales son buenos conductores del campo magnético; pero este campo magnético puede estar en una de dos condiciones, “existe o no existe”, que es el efecto de la conmutación. Es por eso que sólo hasta que aparecieron los semiconductores y se encontró que podían realizar conmutaciones en tiempos menores a un segundo, se pudo pensar en diseñar este tipo de motores.

Los primeros análisis sobre motores de reluctancia conmutada se hicieron aproximadamente hace 50 años, lo que lo hace un motor relativamente joven en comparación con los motores de corriente directa y corriente alterna, y es menos conocido que los otros mo-

tores antes mencionados. Su importancia radica en el par de fuerza alto que ejerce desde la velocidad más lenta hasta cierto nivel, pero disminuye cuando alcanza la velocidad más alta que puede alcanzar. La importancia de este trabajo recepcional radica en que no se fabrica en México aún, y que tampoco se han desarrollado prototipos de motores de reluctancia conmutada en otras universidades o colegios de ciclo superior.

El desarrollo de nuevas tecnologías puede liberar a los pueblos de la dependencia tecnológica de otros países con mayor desarrollo tecnológico, pero esto solamente se va a lograr cuando se apoye más a la investigación en las casas de estudio con más presupuestos, mejores instalaciones y programas de avanzada hacia las nuevas tecnologías. Todo proyecto ha de dejarnos nuevos conocimientos, saberlos aprovechar y crear nuevas empresas y fuentes de trabajo evitarán la migración de la gente a países más desarrollados tecnológica y económicamente.

La forma de abordar la problemática o reto de hacer los primeros prototipos de motores de reluctancia conmutada fue:

- i) Obtener la información básica requerida sobre el tema
- ii) Hacer las primeras pruebas con bobinas comerciales (Bobinas de relevadores a 12 volts) cuyo funcionamiento se encuentra en una gran cantidad de circuitos
- iii) Buscar el material para el rotor (Fierro colado) y hacer el rotor como normalmente vienen las ilustraciones de algunos libros
- iv) Encontrar un eje de acero pulido y un buje para obtener la menor fricción posible; esto debido a que el campo de fuerza de los relevadores a 12 volts es muy pequeño
- v) Hacer el estator tratando de minimizar lo más posible la distancia entre el rotor y el estator; se usó silicón por ser un material de fácil manipulación
- vi) Hacer las primeras pruebas para verificar el movimiento del rotor con la activación de los relevadores
- vii) Crear el generador de secuencias usando sensores ópticos y un amplificador operacional para crear pulsos cuadrados en tiempos discretos
- viii) Hacer un circuito de modulación por ancho de pulso para controlar mejor la

velocidad del motor del generador de secuencias

El objetivo principal fue hacer un motor de reluctancia conmutada que sirva para explicar mejor el funcionamiento de este tipo de motores y comprobar la teoría sobre los mismos; así como, desarrollar técnicas para hacer viable la construcción de este tipo de motores; adquirir destreza en la fabricación y diseño de los motores de reluctancia conmutada.

En el capítulo 2 se explica brevemente la electricidad y el magnetismo como una forma de energía que se aprovecha en la construcción y diseño de los motores eléctricos.

En el capítulo 3 se hace una reseña histórica de los motores eléctricos de diferentes tipos de funcionamiento

En el capítulo 4 se ve el funcionamiento del motor de reluctancia conmutada clásico y del primer prototipo que se hizo del motor con un generador de secuencias mecanizado y del diseño del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada y la solución a los problemas que se presentaron.

En el capítulo 5 se da una explicación corta de la construcción del sistema generador de secuencias con la tarjeta “Arduino UNO” y de las experiencias con dicha tarjeta y después con un multivibrador, un contador y una memoria y, por último, la etapa de potencia.

En el capítulo 6 se analizan todos los resultados obtenidos de los diseños de los dos motores.

En las conclusiones se habla de las posibles mejoras al sistema de los motores de reluctancia conmutada que a futuro se puedan diseñar.

Capítulo 2

Electricidad y magnetismo

2.1. Electricidad Estática

La electricidad es el nombre que se le da a todo lo que pueden hacer una gran cantidad de electrones. El electrón una partícula que forma parte de los átomos y que gira alrededor de un núcleo atómico y tiene una carga negativa y el núcleo una carga positiva; sin embargo, no sólo existen los electrones en los átomos, también existe una gran cantidad de electrones libres.

Cuando estos electrones se reúnen en una gran cantidad y se quedan en alguna superficie, se le llama “Electricidad estática”; la electricidad estática es muy útil en los sistemas de impresión de tinta entre otras cosas. Otro fenómeno común que vemos es el de los rayos, donde una enorme cantidad de electrones crean una diferencia de potencial tan grande que recorren grandes distancias desde los cielos hasta la tierra con el único fin de hacer esa diferencia de potencial igual a cero, cosa que no pasa porque hay una cantidad mucho mayor de electrones libres.

2.2. Electricidad dinámica

Cuando los electrones viajan constantemente en algún circuito se le nombra “electricidad dinámica”; es decir, existe un flujo de electrones por un conductor durante un tiempo “X” provenientes de alguna fuente. La electricidad dinámica es la electricidad que viaja por los circuitos y que hace que funcionen los sistemas eléctricos de cualquier tipo.

2.3. Corriente directa y corriente alterna

La corriente directa es el flujo de electrones que pasa por un conductor y qué, mientras no pase de una referencia o potencial cero, hacia un potencial negativo o positivo periódicamente por unidad de tiempo y se mantenga arriba o abajo de la referencia cero todo el tiempo, se llamará corriente directa o C.D., usualmente encontramos que, la corriente directa es la que proporcionan las baterías y pilas; como por ejemplo, la que proporcionan los acumuladores de los carros.

Por otro lado, cuando la corriente de electrones está pasando periódicamente por unidad de tiempo de forma constante en el conductor cruzando por potencial cero, se le llamará corriente alterna. Un ejemplo fácil de encontrar es la corriente que proporcionan los contactos eléctricos caseros; donde, la corriente tiene un potencial de 120 volts RMS y una frecuencia de 60 Hertz.

2.4. Imanes permanentes

Los imanes permanentes deben su nombre a que cuentan con un campo magnético propio que tarda mucho tiempo en desaparecer o tal vez nunca desaparezca (Durante nuestro corto tiempo de vida) Pero ¿qué es el magnetismo? El magnetismo es una fuerza que se crea por el movimiento circular de los electrones alrededor de un núcleo de material férreo. En los imanes permanentes este movimiento de los electrones sucede a nivel molecular, simulando un pequeño planeta con una gran cantidad de satélites girando

alrededor del mismo, cada molécula es un diminuto imán con sus polos norte y sur bien definidos y se orientan todos o la mayoría hasta formar un imán de mayor tamaño.

2.5. Electroimanes

Los electroimanes están formados por un núcleo de material férrico con un bobinado de alambre alrededor del núcleo, ya sea de cobre o de aluminio esmaltado; funcionan igual que los imanes, la diferencia es que los campos magnéticos de estos electroimanes, sólo funcionan mientras circule una corriente eléctrica por su bobinado. También es la forma de demostrar a un nivel macroscópico que el magnetismo es una consecuencia del movimiento circular de los electrones al rededor de un núcleo; los electroimanes se calculan con las siguientes fórmulas.

La densidad de flujo magnético de un electroimán cilíndrico está dado por:

$$B = \frac{\mu NI}{L}$$

Donde:

μ es la permeabilidad magnética del núcleo.

N es el número de vueltas del cable alrededor del núcleo.

I es la corriente en amperios.

L es la longitud del la bobina.

F la fuerza que ejerce sobre los materiales ferromagnéticos está dada por:

$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} A$$

Donde:

F es la fuerza en newtons.

B es el campo magnético en teslas.

A es el área de las caras de los polos en m^2 .

μ_o es la permeabilidad del espacio libre.

En el caso del espacio libre (aire), siendo la fuerza por unidad de área (presión)

Sustituyendo

$$F = \frac{\mu N^2 I^2 A}{2L^2}$$

La importancia de las fórmulas de los electroimanes radica en que son la base de este proyecto de motores de reluctancia conmutada.

2.6. Reluctancia

La reluctancia es la resistencia al paso de un flujo magnético que presenta un material y está definida por:

$$\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu A}$$

Donde:

L es la longitud del material.

μ es la permeabilidad del material.

A es la sección transversal del material.

En el caso de los motores de reluctancia conmutada, el movimiento se produce cuando un par de bobinas del estator se energizan produciendo un flujo magnético entre ellas y el rotor, y es entonces, cuando los dientes del rotor que se encuentran más cerca de las bobinas, se alinean a las bobinas que tienen polaridades contrarias, por lo tanto, reduce la reluctancia y así, aumenta el flujo magnético entre las bobinas.

El flujo magnético en cierto material está definido por:

$$\phi = \frac{F_{mm}}{\mathfrak{R}}$$

donde F_{mm} es la fuerza magnetomotriz y la \mathfrak{R} es la reluctancia y ϕ es el flujo magnético.

Capítulo 3

Resumen de los motores eléctricos

3.1. Breve historia de los motores eléctricos

Un motor es un sistema que transforma una forma de energía en trabajo mecánico; un motor eléctrico es aquél que transforma la energía eléctrica en trabajo mecánico. Los sistemas para transformar la energía eléctrica en movimiento nacen en 1821 cuando se logra aprovechar la inducción electromagnética recientemente descubierta por Michael Faraday y son aplicados en mecanismos para imprentas que eran activadas con baterías. Los motores eléctricos de corriente directa, como actualmente los conocemos, nacen en el año 1873 por un descuido, durante una prueba de dos dínamos conectados en paralelo, pero uno de los dínamos no se le aplicó movimiento por error y se movió debido a la corriente que se generó en el otro dínamo. Así nació el motor de corriente directa descubierto por Zénobe Théophile Gramme, quién había desarrollado los mejores dínamos de la época.

El motor de corriente alterna se lo debemos al ingeniero Nikola Tesla junto con el sistema polifásico de transmisión de energía en 1888; Tesla desarrolla el primer motor trifásico gracias a su descubrimiento de los campos magnéticos rotatorios, pero tenía algunas fallas y es perfeccionado por el sueco Ernst Danielson, quién inventó en 1902 el motor síncrono; donde cambia el material del inducido, que no era de material magnético,

por un imán permanente.

El siguiente motor en la historia de los motores anterior al motor de reluctancia conmutada, es el motor paso a paso, que es un motor con el rotor dentado con imanes y una estructura magnética en forma de sandwich que proporciona grandes pares de fuerza en un tamaño pequeño y que su movimiento se da en forma discreta, es decir, en ángulos exactos y su velocidad se puede variar al variar la velocidad en que se producen sus pasos. El motor paso a paso moderno es descrito por primera vez en 1957 por Thomas y Fleischauer y se empezó a producir comercialmente en los años 60s; genera altos torques y puede alcanzar una velocidad de 1600 pasos por minuto (multiplicado por los grados por paso y dividido entre 360 nos da la velocidad del motor en rpm), la ventaja es que no usa escobillas y es menos ruidoso, pero debe ser controlado por pulsos en tiempos discretos que se convierten a la vez en movimientos discretos en el rotor.

Fue hasta 1966 cuando el desarrollo sobre máquinas de reluctancia conmutadas hecho por Cruickshank, Anderson y Menzies, propone una secuencia escalonada de control para las bobinas del motor de reluctancia conmutada, pero estos trabajos dieron fruto con patentes sobre motores de reluctancia conmutada hasta 1972 debido a que todavía no se contaba con los semiconductores correctos para el control de los campos magnéticos de las bobinas; y estos semiconductores fueron desarrollados por GE (General Electric) para motores a pasos y motores de reluctancia conmutada.

Sin embargo; fue hasta 1980 cuando el motor de reluctancia conmutada despertó gran interés después de los trabajos de investigación realizados por Lawrenson y Stephenson en la Universidad de Leeds; quienes realizaron una rica investigación en máquinas y accionamientos, máquinas de reluctancia síncrona, motores paso a paso, análisis de campos electromagnéticos y sensores. Los motores de reluctancia conmutada lentamente están tomando su lugar en el mundo de los motores eléctricos. Ya se producen en pocas cantidades en algunos países y se utilizan comercialmente en lavadoras. Industrialmente se pueden encontrar motores de reluctancia conmutada de 25 HP como mínimo y de 40 HP y 80 HP; en China se usan mucho para triturar piedra.

3.2. Motores de corriente directa

Los motores de corriente directa son aquellos cuya corriente no cambia de polaridad con respecto del tiempo; existe varios tipos de motores de corriente directa, los hay con escobillas que se conectan directamente a una fuente de corriente directa y existen otros sin escobillas, conocidos también como “Brushless”, los cuales no pueden conectarse directamente a una fuente de corriente directa; entre estos también se encuentran los motores a pasos (o paso a paso), ambos con imanes y los de reluctancia conmutada que son a pasos y tema de esta trabajo recepcional.

3.3. Motores de corriente alterna

Existen varios tipos de motores de corriente alterna, entre ellos se encuentran los universales, que trabajan tanto con corriente alterna como con corriente directa, estos son con escobillas y bobinado en el estator. Los motores asíncronos que trabajan por inducción magnética y tienen un imán en el rotor, la velocidad del motor depende del número de pares en el estator a mayor número de pares, menor velocidad en rpm, y se llama “asíncrono” por la diferencia entre la velocidad del rotor a la velocidad de giro del estator. Los motores asíncronos son los más comunes actualmente dentro de los motores de corriente alterna, mejor conocidos como “jaula de ardilla”, ofrecen una velocidad constante y se les encuentra tanto en trifásica como en monofásica; debe su nombre al diseño del rotor que asemeja a una jaula de ardilla y la velocidad, ya se puede controlar por medio de la electrónica de potencia.

Capítulo 4

El motor de reluctancia conmutada

4.1. Principios del motor de reluctancia conmutada

Los motores de reluctancia conmutada tienen las siguientes características:

- i) Son motores de corriente directa, pero no funcionan si se conectan directamente a una fuente de corriente directa
- ii) Tienen un rotor dentado por pares hecho de hierro con un eje de acero y tiene dos bobinas más que el par de dientes del rotor
- iii) No usa ni imanes ni escobillas y tiene un par de fuerza alto debido a que emplea todo el voltaje de fuente y toda la corriente eléctrica que el motor le exija a la fuente
- iv) Es un motor paso a paso controlado por frecuencia que puede variar desde una frecuencia muy baja a una frecuencia alta y ,como trabaja por secuencia de encendido de las bobinas, si esta secuencia cambia de dirección, cambia la dirección del giro
- v) El rotor es de diámetro reducido para aumentar el par de fuerza
- vi) No produce armónicos debido a que no almacena campo magnético en el rotor y por lo tanto no produce ruidos en la línea, ni estresa de más a los transistores de potencia
- vii) Es más económico en su manufactura porque no utiliza tierras raras y su

construcción es sencilla

La menor reluctancia, que es la característica principal de estos motores, se encuentra cuando los dientes del rotor, se alinean frente a las bobinas que tienen polaridades contrarias, antes de esta alineación, las bobinas ejercen una gran fuerza de atracción, lo que provoca el movimiento del rotor y después de la alineación, se apagan esas bobinas para activar las siguientes bobinas y así; provocar el movimiento continuo del rotor.

En la figura 4-1 se puede ver como fluye el campo magnético que se produce en las bobinas, busca la “menor resistencia magnética”, es decir, la menor reluctancia posible; y como se mueven los dientes para lograr este propósito; cada vez que se prenden y apagan las bobinas en un motor de reluctancia conmutada sucede este efecto; por lo tanto, al aumentar la frecuencia de las interrupciones, también se aumenta la velocidad del motor. Como sólo existen dos condiciones, los pulsos para el movimiento del motor son digitales.

En la figura 4-2 podemos ver el dibujo de un corte transversal de un motor de reluctancia conmutada de prueba y la foto de un rotor de 12 polos en los dientes y por lo tanto 14 bobinas en el estator, que alcanza una velocidad de 1500 rpm con un voltaje de alimentación de 400 volts, 50 Hz, rectificado y tiene una potencia de 26 kW; y fue desarrollado en el departamento de electrotecnia de la Universidad de Karlsruhe en Alemania.

Los pulsos con los que se alimentan las bobinas del rotor, van de cero al voltaje de fuente y las secuencias es igual al número de pares de las bobinas que van desde 2, 3, 4, 5... Sin embargo, los motores de reluctancia conmutada de mayor velocidad son los que tienen menos polos, esto es debido a que entre mayor sea la diferencia entre el número de polos y el número de bobinas habrá una mayor distancia a recorrer y, por lo tanto, el rotor tendrá un paso más grande.

Como podemos observar en la figura 4-3 y la figura 4-4, los pulsos en las bobinas son digitales, es decir, están en tiempos discretos y por lo tanto, se pueden producir utilizando electrónica digital. Lo que permite el cambio de frecuencia en forma lineal, es el generador de los pulsos cuadrados.

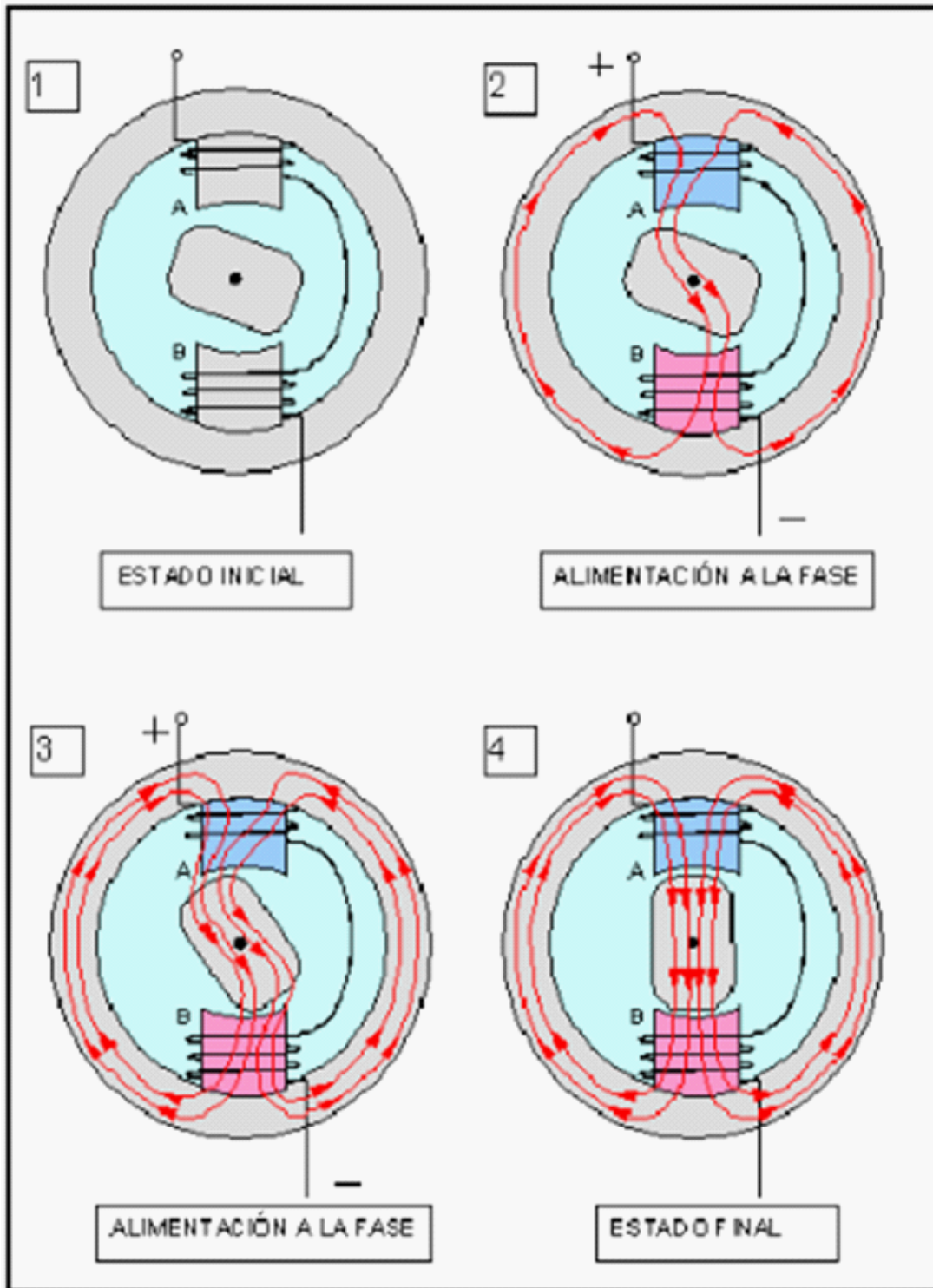


Figura 4-1: Flujo magnético en MRC (tomada de [8]).

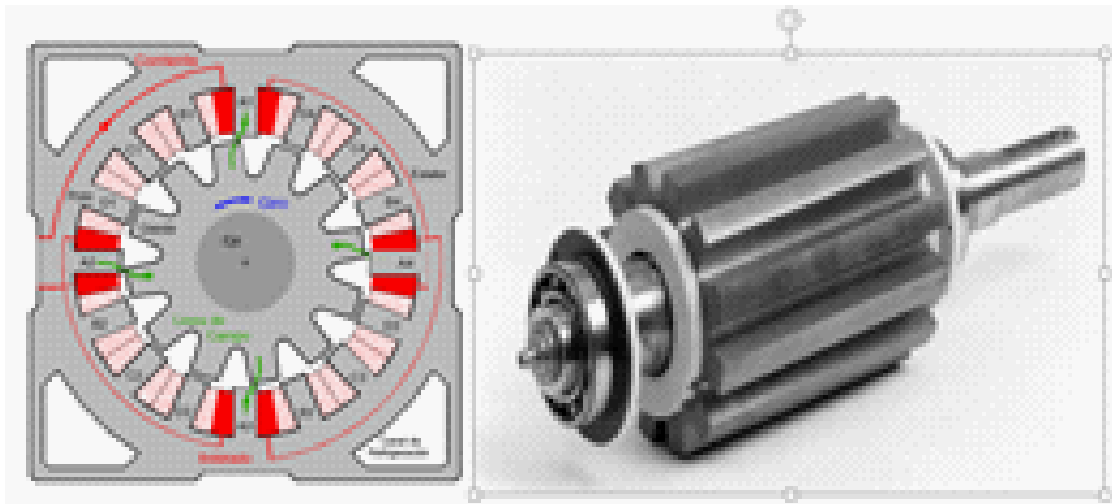


Figura 4-2: Polos y rotor de un motor de reluctancia conmutada tomada de [11]



Figura 4-3: Movimiento de motor de reluctancia conmutada de 4 polos.

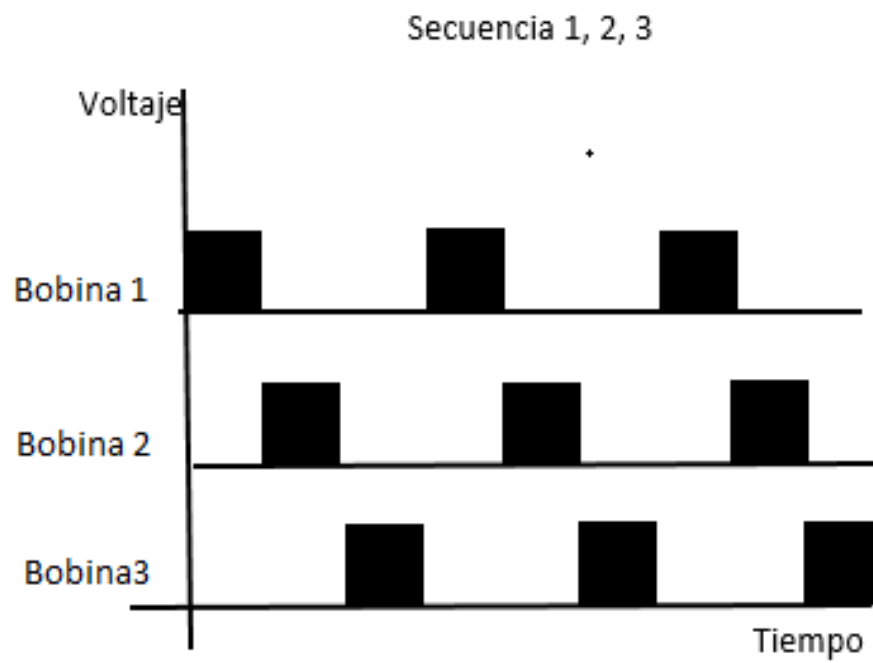


Figura 4-4: Secuencia de encendido de bobinas de motor de reluctancia conmutada de 4 polos,

4.2. Construcción del primer prototipo de motor de reluctancia conmutada

Para la construcción de un primer prototipo de motor de reluctancia conmutada, se hizo un análisis de la información que se encontró del tema, (Libros en PDF, información en la red, videos, fabricantes...) para poder tener una idea de cómo hacer un motor de este tipo. En realidad, el motor de reluctancia conmutada es poco conocido en el mercado y no se vende material, partes o kits para armar este tipo de motores, lo que hizo necesario buscar una solución con los recursos materiales disponibles y lo más económico posible. Se trataba de demostrar la teoría sobre los motores de reluctancia conmutada y por lo tanto, no se requería que el prototipo fuera exacto, pero sí funcional.

Las bobinas son de relevadores a 12 volts que fueron usados en las prácticas de electrónica en diferentes cursos; el rotor es un trozo de hierro colado rescatado de algún lugar; el eje y la base son de un mecanismo de reproducción de discos compactos junto con el buje en el rotor.

La placa perforada, los sensores ópticos, la tableta y circuitos integrados son de reciclaje de otros proyectos y sólo se compró un transistor “FET” para armar un circuito de modulación por ancho de pulso para controlar la velocidad del motor de corriente directa que funciona como nuestro generador de secuencias de frecuencia variable; cuando la modulación por ancho de pulso varía, también varía la velocidad del motor de corriente directa y, por lo tanto, varía la frecuencia de los pulsos para las bobinas, y de esta manera, varía la velocidad del motor de reluctancia conmutada. El resultado fue el primer prototipo funcional y de velocidad variable de un motor de reluctancia conmutada; claro que este motor no tiene más función que demostrar la teoría sobre dichos motores y, por lo tanto, no fue diseñado para realizar un trabajo útil o práctico; sin embargo, el aporte en información es muy valiosa y fue usada para construir el siguiente motor. En la figura 4-5 se muestra el primer prototipo construido.

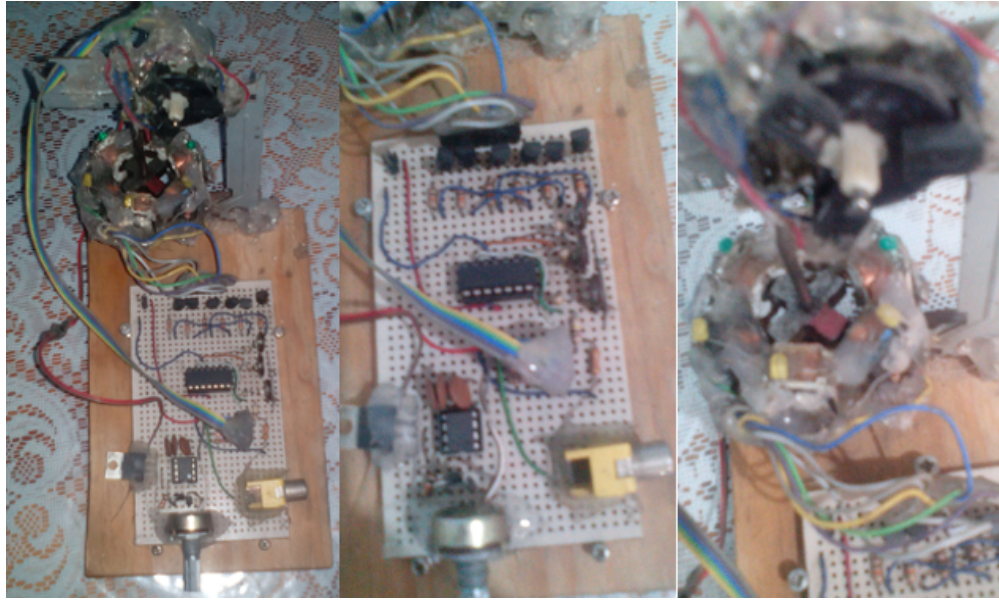


Figura 4-5: Primer prototipo de motor de reluctancia conmutada hecho de material reciclado.

4.3. Datos que aportó el primer prototipo de motor de reluctancia conmutada

El costo de este primer prototipo, debido a que fue hecho en su mayoría con material reciclado, fue aproximadamente de 30 pesos en materiales nuevos. Por supuesto que, si todo el material hubiera sido nuevo, el costo sería mucho mayor. El tiempo aproximado de fabricación fue de aproximadamente 20 días y los aportes en información fueron de gran relevancia para el siguiente diseño de motor de reluctancia conmutada. Se logró observar una gran velocidad, pero mucho menor a los motores de corriente directa. Aproximadamente de 1365 rpm medida con el número de pulsos de excitación de una bobina que se observó en el osciloscopio figura 4-6.

La fricción juega un papel muy importante en el desempeño de el motor, así como la distancia entre los electroimanes y el rotor, la forma; para poder reducir la fricción en este primer prototipo, se utilizó un buje y un eje de acero pulido que permitió reducir

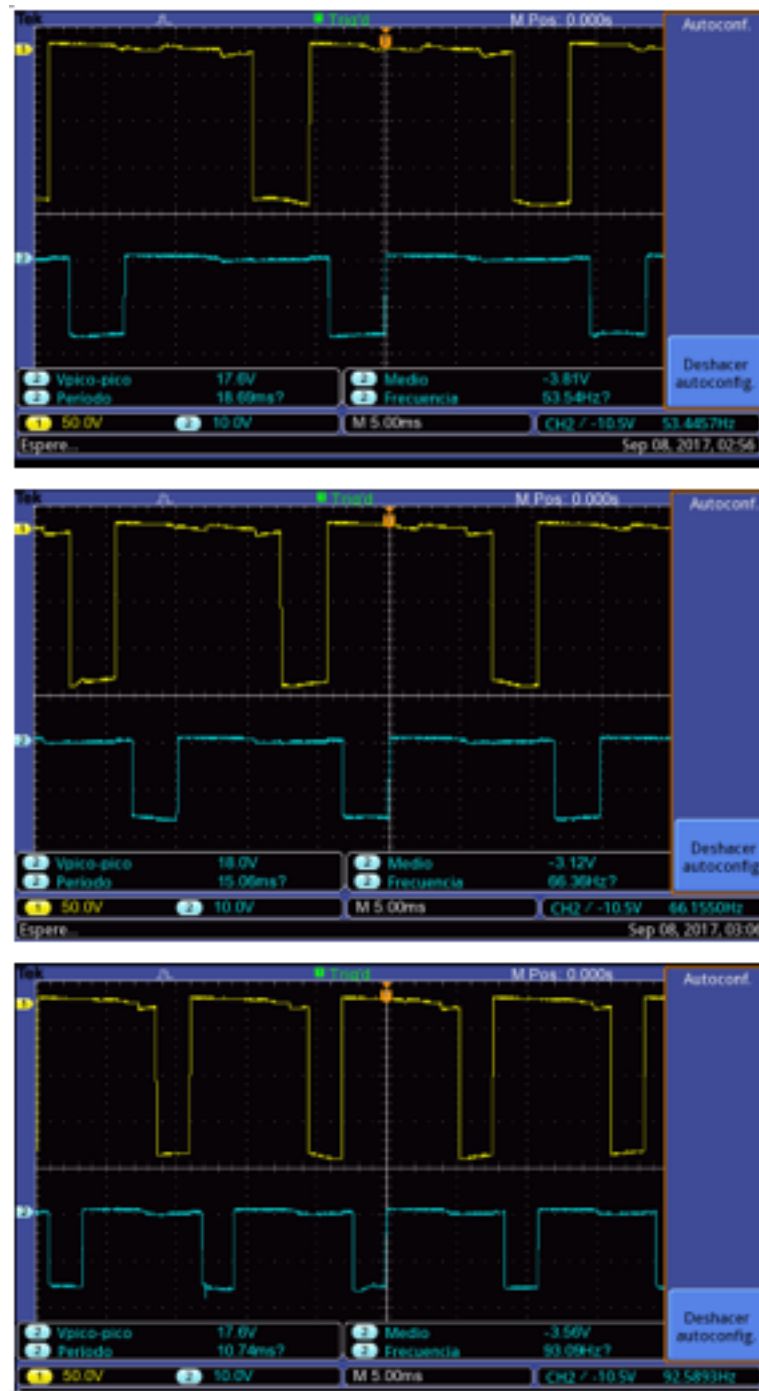


Figura 4-6: Formas de onda del primer prototipo de motor de reluctancia conmutada a diferentes velocidades, dos bobinas.

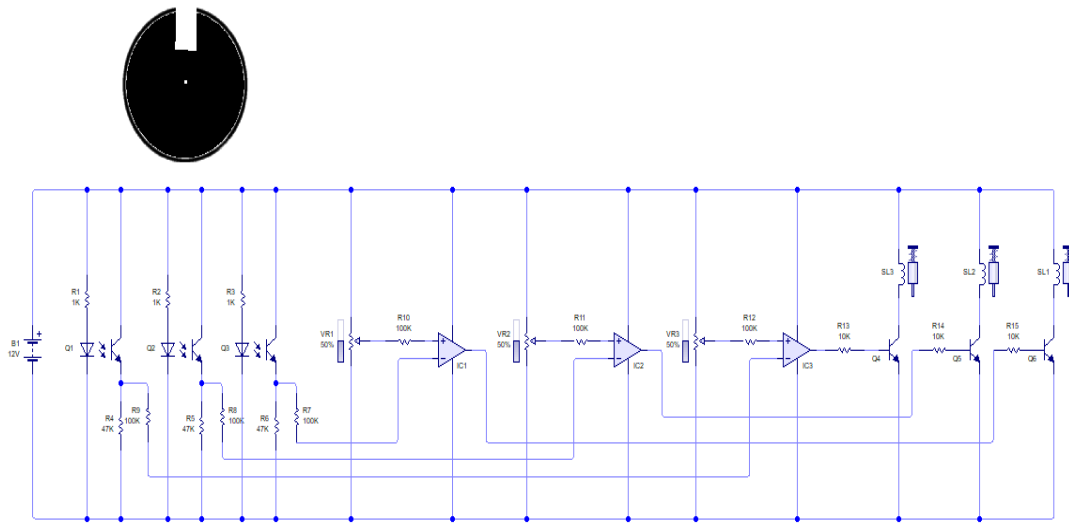


Figura 4-7: Circuito generador de secuencias con disco para activar los sensores y filtro para ruidos infrarrojos ambientales.

mucho el efecto de frenado por fricción. El circuito electrónico para generar la secuencia de pulsos no fue mucho problema; se utilizaron sensores infrarrojos de presencia y un amplificador operacional para filtrar los pulsos de las secuencias de los ruidos infrarrojos del ambiente y así, obtener pulsos cuadrados que irían a los transistores de las bobinas del estator. A cada bobina se le colocó un led para mostrar cuando se encuentra energizada y se usaron dos colores para poder indicar la polaridad de cada bobina. La corriente de consumo de las bobinas es de 40 miliamperes, sin embargo, se utilizó un transistor de tipo BJT pero de 2 amperes de corriente, porque si se usa de menos amperes, el tiempo de vida del transistor se acorta, debido al estrés que produce el encendido y apagado de las bobinas a frecuencias altas; en la figura 4-7, el circuito electrónico que se utilizó para el generador de secuencias con el disco que activa o desactiva los sensores infrarrojos para producir la secuencia de encendido de las bobinas del estator.

La figura 4-8 muestra la colocación de los sensores y el disco con ranura que sirve para proporcionar las secuencias de activación de cada par de bobinas. Todo el sistema se adaptó a 12 volts y se utilizó un transformador de 120 volts a 12 volts y 300 miliamperes

de salida, rectificado para que funcionara el sistema con la corriente de línea . Los pulsos que se obtuvieron son cuadrados y gracias a que el motor de corriente directa puede variar su velocidad con un circuito de ancho de pulso variable, el motor de reluctancia conmutada puede variar la velocidad fácilmente; el cambio de giro se logra cambiando la dirección de la secuencia, en este caso, invirtiendo la polaridad del motor de corriente directa que genera las secuencias.

La figura 4-9 muestra la placa perforada donde se colocó el circuito de modulación por ancho de pulso para controlar la velocidad del motor de corriente directa que usamos para generar las secuencias de encendido de las bobinas y, así poder variar la frecuencia de las mismas y el circuito de filtrado para los sensores ópticos, así como los circuitos de potencia de las bobinas. Como podemos ver, no requiere de electrónica compleja, ni de materiales caros, ni de mucho espacio. Esto es relevante para el siguiente motor, debido a que se tomó en cuenta los requerimientos para poder controlar el siguiente motor y obtener los mismos resultados, pero sin utilizar un motor de corriente directa para generar las secuencias. Había que diseñar un sistema electrónico para generar las secuencias y variar la velocidad e incluso, el cambio de giro del siguiente motor de reluctancia conmutada.

La mejor aportación que dejó este primer prototipo fue que sí es posible hacer motor de reluctancia conmutada, pero había que buscar mejores métodos para generar las secuencias y variar la frecuencia de las mismas con mayor precisión, así como también, incrementar el tamaño, la potencia y mejorar el diseño para hacerlo más parecido a un motor comercial.

4.4. Construcción del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada

Con los datos que aportó el primer prototipo de motor de reluctancia conmutada, se podía imaginar que sería fácil hacer el siguiente prototipo, es decir, escalar el motor para hacerlo más grande; sin embargo, no fue así. Había que modificar la forma, emplear

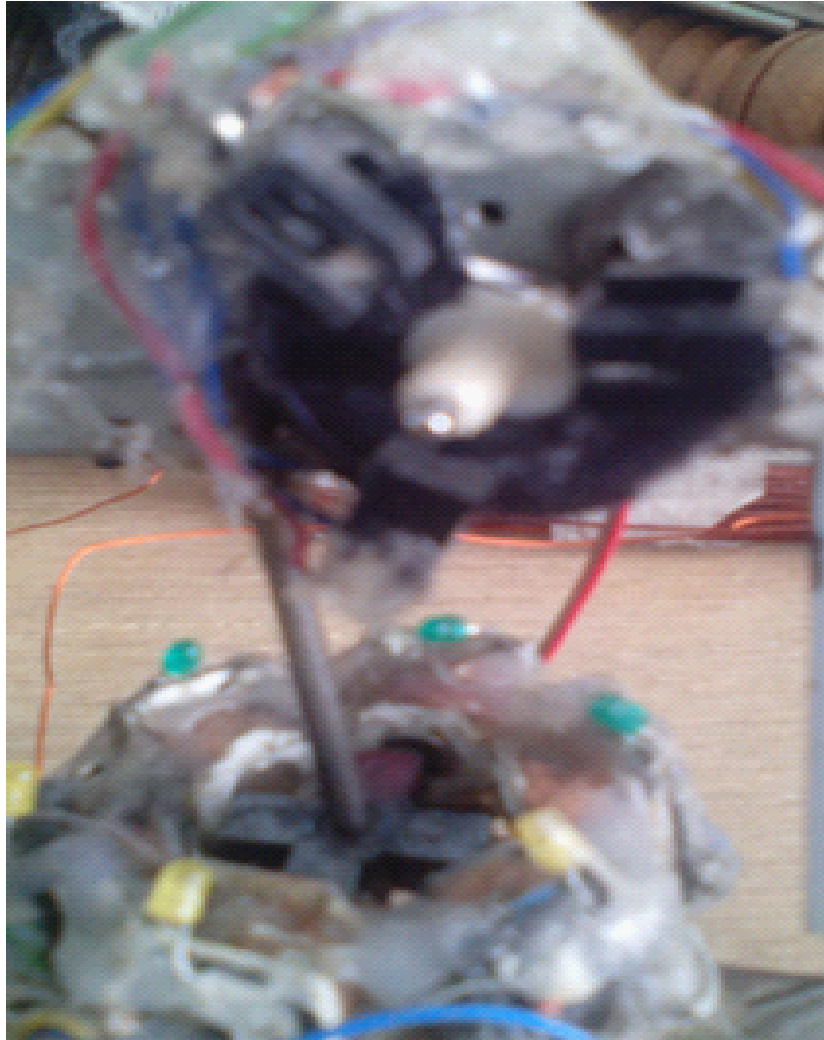


Figura 4-8: Sensores ópticos activados por un disco que se mueve por un motor de corriente directa y crea las secuencias de las bobinas que hacen mover el rotor.

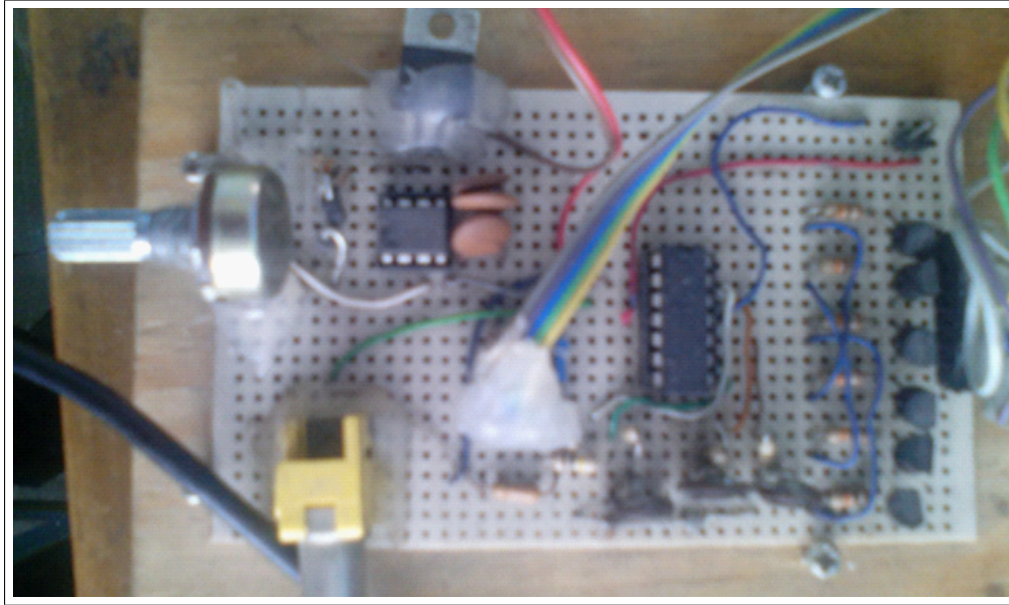


Figura 4-9: Circuito electrónico que se utilizó para el primer prototipo de motor de reluctancia conmutada.

materiales nuevos, incrementar la corriente para aumentar la potencia y todo el sistema electrónico debía tener un diseño nuevo.

El primer problema que se presentó fue hacer el rotor. Como carecemos de antecedentes físicos, se tomó como muestra en la figura 4-10 para mandar a hacer el rotor del motor y se procedió a buscar a un tornero para que hiciera el rotor o por lo menos el rodillo para el rotor.

4.5. El rotor, los dientes y los baleros

Como podemos ver en la figura 4-10, tenemos un estator y un rotor de motor de reluctancia conmutada; el rotor está dentado y es largo, y también muchas bobinas en el rotor. Con esa información se procedió a hacer el rotor y las bobinas, el tornero hizo tres flechas para balero y vendió el material para hacer los dientes que son de hierro dulce y que llaman “cuña” y sirven para fijar las poleas en los motores industriales. Una

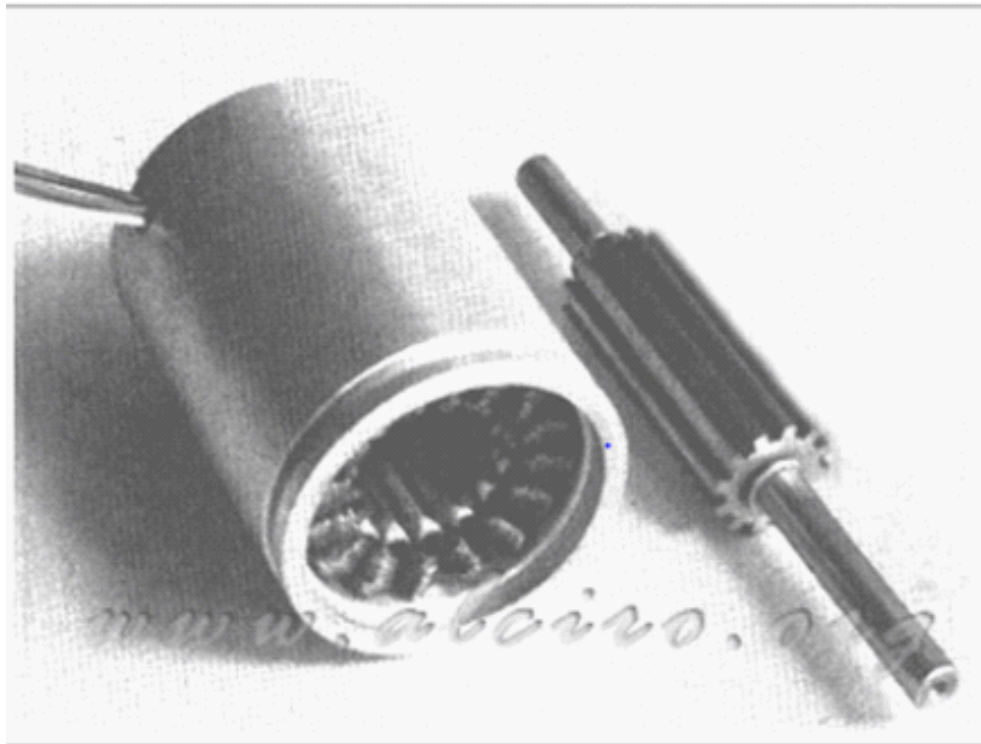


Figura 4-10: Estator y rotor de un motor de reluctancia conmutada tomada [2].



Figura 4-11: Colocación de los dientes en los rotores del segundo motor de reluctancia conmutada.

vez que se tuvo la flecha, se procedió a cortar los dientes y cabían 8 barras de cuña; por lo tanto, el motor tendría 10 bobinas.

Los dientes se fijaron a las flechas con soldadura eléctrica, para intentar que tuvieran la misma distancia, se pegaron primero con plastilina epóxica y después se aplicó la soldadura eléctrica como se muestra en la figura 4-11

4.6. Las primeras pruebas de campos magnéticos

Los campos magnéticos que producen las bobinas son la parte esencial de todos los motores eléctricos y lo más importante en los motores de reluctancia conmutada, éstos son directamente los que producen el par de fuerza que tiene el motor y, por lo tanto,

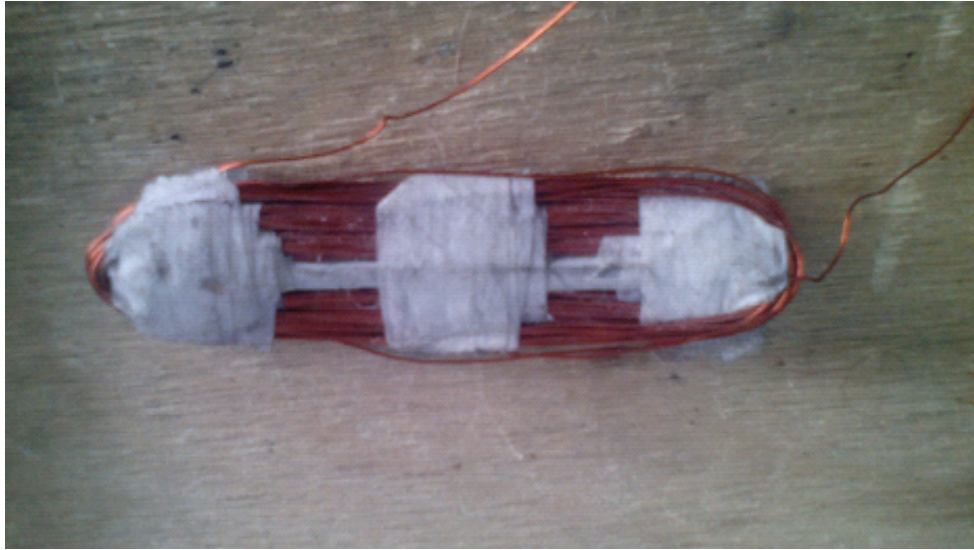


Figura 4-12: Primera prueba con una bobina larga y alambre magneto calibre 22.

deben ser diseñados a las necesidades a cubrir. Sin embargo, no había la pericia para calcular dichos campos magnéticos y se procedió a la experimentación para poder tener datos más reales de dichos campos magnéticos.

Se propuso nuevamente el voltaje de 12 volts para la alimentación del motor a diseñar, se tomó éste voltaje como base debido a que es más fácil de conseguir y manejar, y porque se espera que el trabajo del motor de reluctancia conmutada sea mover vehículos eléctricos con baterías a 12 volts. Para la primera prueba, se utilizó nuevamente el material “cuña” por ser de fierro dulce y dar más o menos la distancia requerida. Se le dio varias vueltas de alambre magneto calibre 22 y se alimentó con 12 volts a 10 amperes pero el resultado fue poco satisfactorio porque la fuerza del electroimán era muy pobre debido a que no tenía muchas vueltas, el ancho y largo del núcleo también afectaba al campo magnético, y se calentaba mucho por el paso de la corriente, y no tenía la suficiente fuerza electromagnética que garantizara el funcionamiento del motor. Ver figura 4-12.

Fue necesario hacer nuevas pruebas sobre campos magnéticos en bobinas que proporcionaran mejores resultados y se encontró que con un calibre más pequeño y un menor

tamaño de los núcleos se podía tener mejores resultados en la fuerza electromagnética que se estaba buscando; pero también se tomó en cuenta que el alambre no puede ser muy delgado porque si se incrementa mucho el número de vueltas, también se incrementa la resistencia del conductor, y por lo tanto, disminuye la corriente y la fuerza.

El siguiente calibre con el que se intentó hacer los electroimanes fue el calibre 30, considerando que podía pasar hasta 5 amperios por su cuerpo sin sufrir daño y se procedió a hacer nuevas pruebas con los mismos 12 volts y los 10 amperios

El segundo problema que se presentó fue el de las bases de las bobinas y el material para el núcleo de las bobinas; se eligió la solera de 2 cm de alto y 2 mm de ancho para hacer las bases de las bobinas y se procedió a experimentar con este nuevo material que permitió hacer bobinas más delgadas y que sí daba la dimensión requerida para el espacio del rotor. Se hicieron las primeras pruebas con la nueva propuesta de bobinas con resultados satisfactorios. Ver figura 4-13 y figura 4-14

Aunque las pruebas que se hicieron con los materiales no eran contundentes, sí proporcionaban la información que se requería para replantear el problema de diseño del motor. Cabe destacar que cada intento es un pequeño paso para mejorar el funcionamiento y, por lo tanto, no se puede tomar como tiempo perdido.

La propuesta de la colocación de las bobinas en secuencia fue para aprovechar al máximo el espacio, y también aumentó la potencia del campo magnético con los bobinados en secuencia, y se obtuvo un nuevo patrón de campo magnético como el de la figura 4-15, que garantizaba una mejor respuesta de campo magnético acomodando las bobinas en herraduras consecutivas, pero sin evitar la idea principal, que el flujo magnético atravesara el cuerpo del rotor.

Sin embargo, lo más importante, fueron las pruebas que se hicieron con la limadura de hierro porque estas pruebas aportaron los verdaderos patrones de distribución del campo magnético y el incremento del mismo, y al mismo tiempo, dejaron ver que se estaba en el camino correcto. Ver figura 4-16

Los resultados de las pruebas fueron satisfactorios, pero el calentamiento era excesivo.



Figura 4-13: Primera prueba de base para bobinas en herradura consecutivas.



Figura 4-14: Propuesta de colocación de las bobinas en herradura consecutivas con resultado satisfactorio.

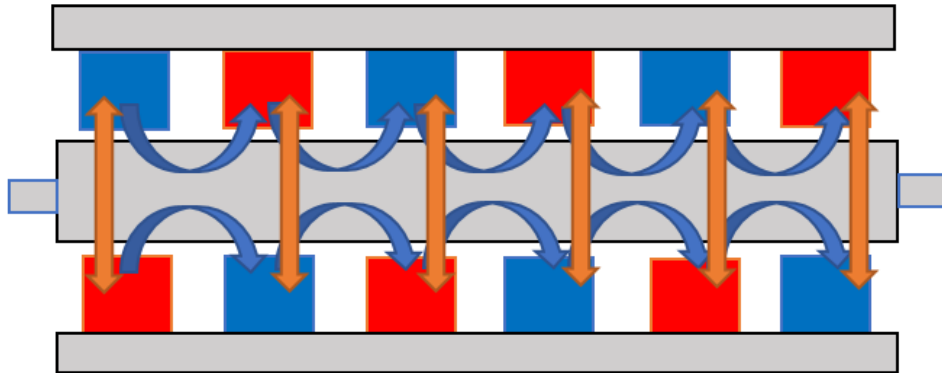


Figura 4-15: Bobinas en herradura en secuencia y distribución de los campos magnéticos.

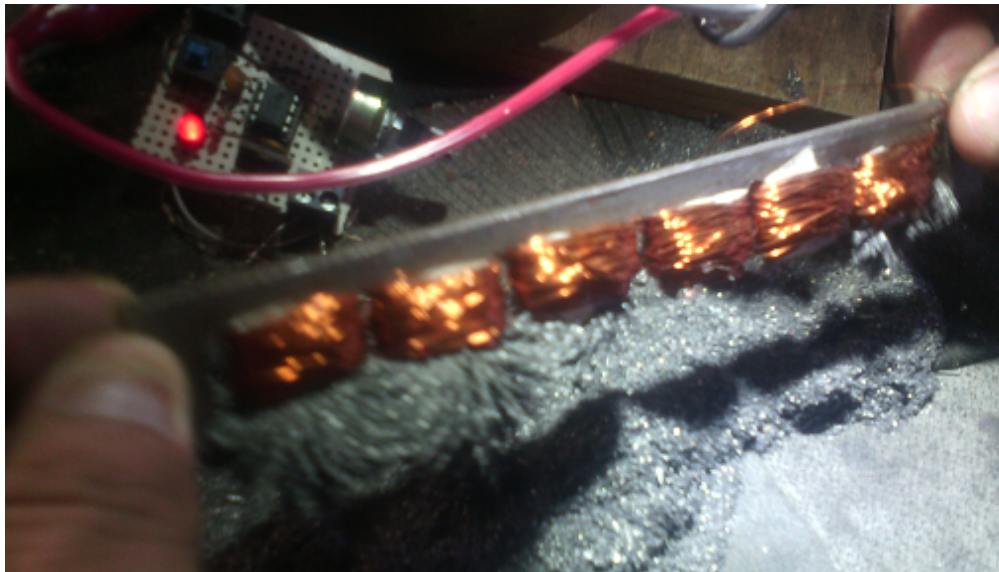


Figura 4-16: Bobinas en herradura en serie, voltaje de 12 volts y la distribución del campo magnético.



Figura 4-17: Máquina para trenzar 8 hilos de alambre magneto para mejorar el campo magnético.

La solución fue aumentar el número de vueltas en las bobinas que, a la vez, aumentarían el valor de la resistencia de la bobina a 54 ohms, por lo tanto, bajaría el amperaje de consumo y, también el calentamiento de las bobinas.

4.7. La máquina de trenzado

Otra solución alternativa fue el de aumentar el número de hilos de alambre magneto y, aunque se hizo una máquina para hacer el alambre de 8 hilos (ver figura 4-17), no fue necesario su uso porque ya se había encontrado otra solución que prometía mejores resultados. Se anexan las fotografías de la máquina y el hilo que resultó de esta máquina sólo como dato de los intentos por encontrar el camino correcto a la fabricación del motor de reluctancia conmutada.

4.8. La máquina para hacer las bobinas

Para aumentar el espacio y el número de vueltas del alambre magneto, se rediseñó el soporte de las bobinas y se cortaron trozos pequeños de solera que se soldaron a un “espárrago” o tornillo sin fin; una solución muy práctica porque este tornillo al mismo tiempo sujetaría las tapas del motor y la distribución de los núcleos para las bobinas permitió la colocación de 6 bobinas en línea. Para soldar las bases se hizo un “molde” con el que se hicieron las 10 bases más o menos con las mismas distancias y se procedió a soldar todas las piezas de solera previamente cortadas, 60 en total. Se tuvo que habilitar una planta de soldar con gatillo en la pinza que sostiene el electrodo para evitar las pérdidas de corrientes mientras no esté soldando y cambiar los tornillos de la planta para que la corriente fluyera correctamente y evitar el sobre calentamiento de la misma; los resultados fueron satisfactorios.

Una vez que se tuvo todo el material disponible para la fabricación de las bases de las bobinas, se procedió a hacer todas de una sola vez, pero cuidando de no ensuciar con soldadura las cuerdas de los soportes. Ver figura 4-18.

Las bobinas fueron hechas con una máquina contadora de vueltas que se hizo (ver figura 4-19) para facilitar el trabajo y se calcularon pensando en el espacio disponible que fue como de 0.5 cm por lado; y quedaron con 600 vueltas cada una, una resistencia de 9.1 ohms en promedio. En total se gastaron cerca de 850 gramos de alambre magneto del número 30 y en total, fueron 36000 vueltas de alambre magneto. Después se procedió a hacer las pruebas de la respuesta de las bobinas ya energizadas; pero el consumo de corriente excedió las posibilidades del transformador, aun así se procedió a colocarlos en una base de madera que se diseñó para este fin, ver figura 4-20.

4.9. Las últimas pruebas de los campos magnéticos

Las bobinas se colocaron en paralelo dando una resistencia aproximada de 1.5 ohms por cada juego de 6 bobinas, colocadas en la base; pero como trabajan al mismo tiempo



Figura 4-18: Piezas de solera y molde para soldar las soleras a las mismas distancias.



Figura 4-19: Base para bobinas, máquina para bobinas y bobina terminada.



Figura 4-20: Presentación de las bobinas, prueba de respuesta de las bobinas con voltaje y presentación inicial de la colocación de las bobinas en el motor.

con otras 6 del otro lado, la resistencia se reduce a .75 ohms en total y la corriente calculada para cada paso sería de 16 amperes aproximadamente. La parte difícil fue ir colocando los alambres de tal forma que se hicieran las conexiones en herraduras consecutivas y en paralelo; esto se hizo así porque el campo magnético de las bobinas en esta combinación es el más fuerte al poner cada bobina independiente y fue para garantizar el movimiento del rotor.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

4.10. El generador de secuencias de frecuencia variable y la etapa de potencia

4.10.1. Primeras pruebas con Arduino UNO

Hoy en día está de moda hacer diseños electrónicos basados en microcontroladores debido a que son económicos y fáciles programar en lenguaje “C”. Arduino UNO (ver figura 37) es una tarjeta de desarrollo que tiene un microcontrolador para programarlo y pueda desarrollar diferentes tareas; un microcontrolador es una pequeña computadora con múltiples salidas y puertos de entrada que se pueden seleccionar para realizar las funciones de control de sistemas o “plantas” ya probados; como es el caso de los motores "brushless", motores a pasos que utilizan tiempos discretos en su funcionamiento y como el motor de reluctancia conmutada es un motor que trabaja en tiempos discretos. La tarjeta Arduino UNO aparentemente era la solución para el movimiento del motor, si se programaban los pulsos de encendido y apagado de las bobinas del motor. Sin embargo, la cantidad de instrucciones y el tiempo de retardo no lograron adaptarse a las necesidades del motor, a pesar de que se hicieron varias pruebas con diferentes códigos, no se obtuvieron los resultados deseados.

El problema principal de adaptación que presentó Arduino UNO fue que se requería un botón de inicio, un control de velocidad, un botón que cambiara el giro y por supuesto,

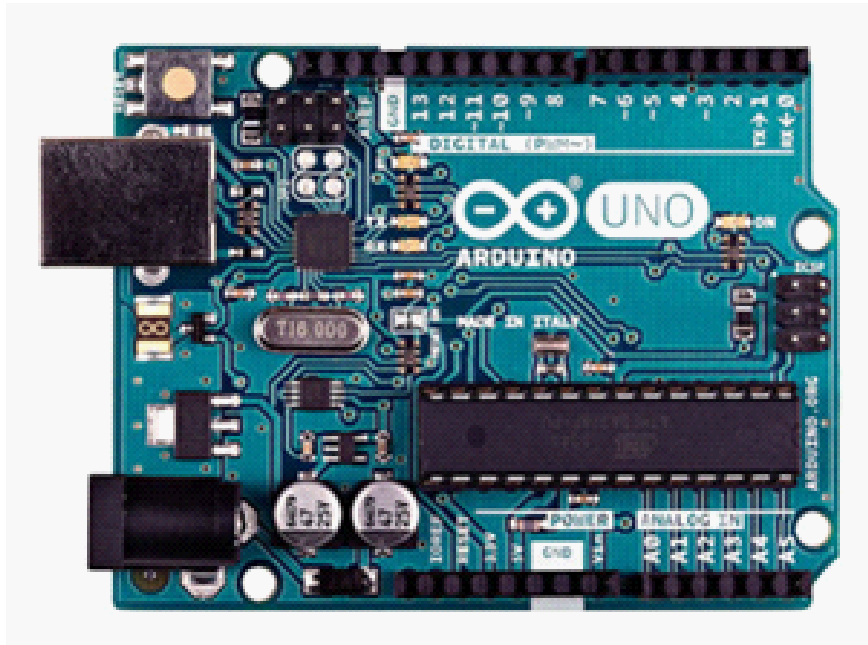


Figura 4-21: Tarjeta programable de desarrollo Arduino UNO.

un botón de paro, y si fuera posible; un botón de paro de emergencia. Esto no fue posible de adaptar porque cuando se realiza un cambio en el programa o en el ajuste a una nueva velocidad, el programa hace una pequeña interrupción para reordenar el nuevo dato en la pila de la memoria, lo que hace que aparezca un salto aleatorio del contador de microcontrolador y este cambie el nuevo dato del anterior y se produzca una falla en la velocidad que no es conveniente en un sistema de trabajo continuo. Por lo tanto, se procedió a desechar la idea de usar la tarjeta Arduino UNO o cualquier otra tarjeta o microcontrolador.

4.10.2. Primeras pruebas con el 555, el contador ascendente descendente 74ls192

La segunda idea para controlar el motor del motor o, mejor dicho, la primera idea, vino de un circuito secuenciador de diez dígitos con un oscilador LM555 que varía la frecuencia

con un potenciómetro, el cual proporciona diferentes velocidades de la secuencia y el cambio de velocidad en las secuencias es más eficiente que el que se conseguía con el Arduino UNO. Las características de LM555 son que puede trabajar con voltajes que van desde los 4.5 volts hasta los 16 volts y tiene una corriente de consumo de 3 a 6 miliamperes a 5 volts; la frecuencia que puede desarrollar los pulsos cuadrados van desde los 100 segundos hasta los microsegundos y por lo tanto, es perfecto para este proyecto. El problema es que no se iban a usar diez dígitos, únicamente 5; pero la idea es buena y por eso sólo se modificó de manera conveniente al aplicar los pulsos a un contador como lo es el circuito integrado 74ls192 que es un contador de pulsos de reloj en décadas y que utiliza un voltaje de alimentación de 4.5 volts a 5 volts, cuenta del 0 al 9 en binario, también es ascendente descendente y, la velocidad máxima de conteo es de 40 MHz, la cual excede por mucho la velocidad de cualquier motor; la salida del contador fácilmente se pueden aplicar a una memoria de tipo UV EPROM de entradas en paralelo y salidas en paralelo y de fácil programación.

Por lo que el siguiente objetivo era hacer la tabla de verdad y el circuito para programar de la memoria M27C256B UV EPROM que se puede conseguir en las tiendas de electrónica sin problema y no es cara; la memoria funciona con un voltaje de lectura de 5 volts, una corriente de consumo de 30 miliamperes y una frecuencia máxima de 5 megahertz, que es muy superior a la frecuencia que puede admitir el motor de reluctancia conmutada. Para el acoplamiento de la etapa del generador de secuencias y la etapa de potencia se usaron optoacopladores con el número PC817 que puede trabajar con 5 volts y tiene una corriente de consumo de 5 miliamperes y una frecuencia máxima de 1 megahertz. Los transistores salida de potencia son del tipo FET, matrícula STP65NF06 (transistores de efecto de campo) cuyas características son una muy baja resistencia en conducción de 14 miliohms, voltaje máximo de trabajo de 60 volts y corriente máxima de trabajo de 60 amperes; con diodo damper integrado e ideal para las conmutaciones en las bobinas del motor de reluctancia conmutada.

4.11. Programación de la memoria “M27C256B” UV EPROM

La programación de la memoria M27C256B EV EPROM, se realiza con un circuito que va abriendo los fusibles internos de la memoria, con un voltaje de 13 volts. Es un proceso un poco lento, pero si se realiza bien, la memoria ya no se desprograma hasta que sea borrada con una caja de luz ultravioleta especial para borrarla. Es una memoria de bajo costo, pero la característica principal por la que fue elegida, es que la entrada de datos se realiza en paralelo e igual que la salida del contador; la máxima frecuencia de trabajo es de 5 megahertz, la cual, supera fácilmente la velocidad que pueda alcanzar cualquier motor a pasos y requiere de pocos elementos para su instalación. Después de la memoria, siguen los opto-acopladores que separan la sección de bajo voltaje de la sección de potencia.

La secuencia de encendido de las bobinas se presenta en la figura 4-22 y la figura 4-23

En la figura 4-24 se muestra un tabla con las secuencia de encendido y paro de las bobinas, en las columnas de la tabla de entrada A, B, C, D son los números que vienen del contador de 0 a 9 en binario y la entrada E es el bit para el paro de emergencia y, también se puede ver que, si se invierte el conteo de ascendente a descendente en el contador, se puede cambiar fácilmente el giro del motor. El diagrama del circuito es muy sencillo de entender a bloques. En la figura 4-25 aparece el diagrama a bloques donde se muestra la sencillez del circuito generador de secuencias de frecuencia variable.

Y en la figura 4-26 se muestra el circuito del oscilador con un selector de frecuencias y su ajuste fino; el potenciómetro permite ajustar la frecuencia del oscilador de una forma exacta, debido a que se utilizó un potenciómetro de precisión de 10 vueltas y los interruptores permiten seleccionar las diferentes frecuencias desde la más baja que proporciona menos de una revolución por segundo hasta el máximo que alcanzó el segundo prototipo de 670 revoluciones por minuto.

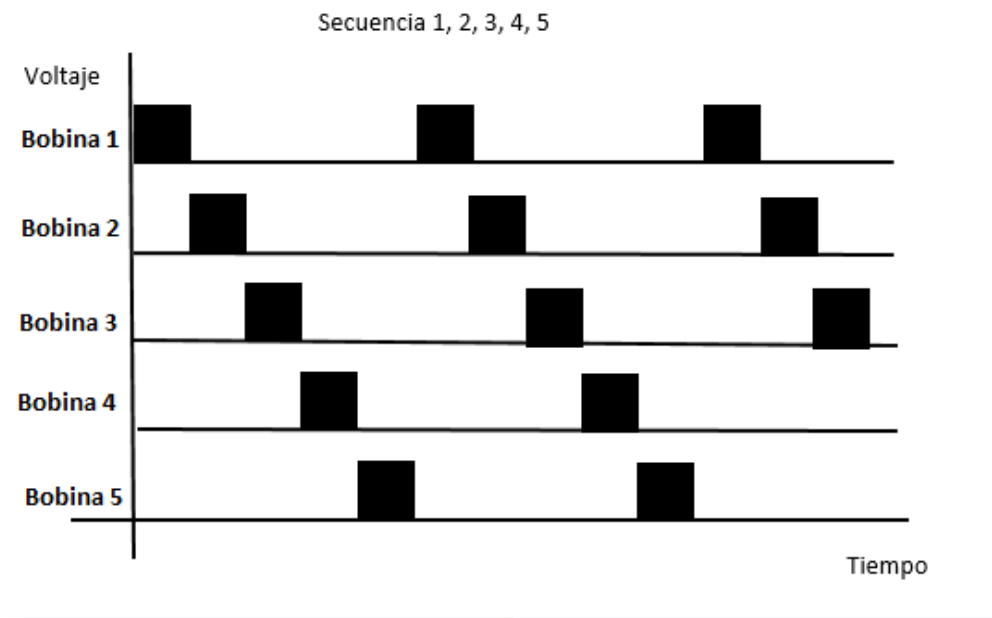


Figura 4-22: Secuencia de encendido de las bobinas para el motor de ocho polos, diez bobinas.

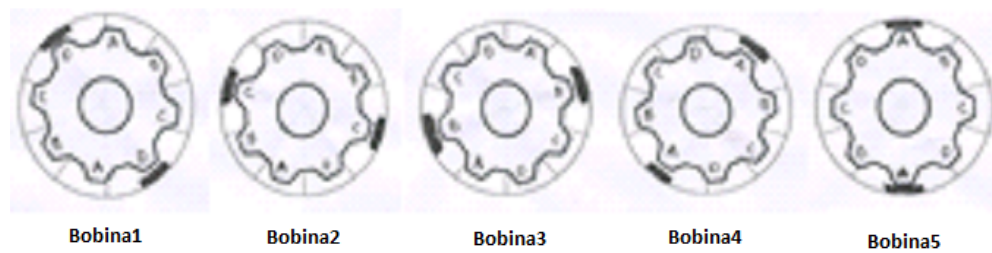


Figura 4-23: Encendido de las bobinas 1,2,3,4,5. del motor de 8 polos 10 bobinas.

Entradas					Salidas				
E	D	C	B	A	B1	B2	B3	B4	B5
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
0	0	1	1	0	0	1	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
1	0	0	0	0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1
1	0	0	1	0	1	1	1	1	1
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	0	1	0	0	1	1	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1	1	1

Figura 4-24: Tabla de verdad de la secuencia de encendido de las bobinas del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada.

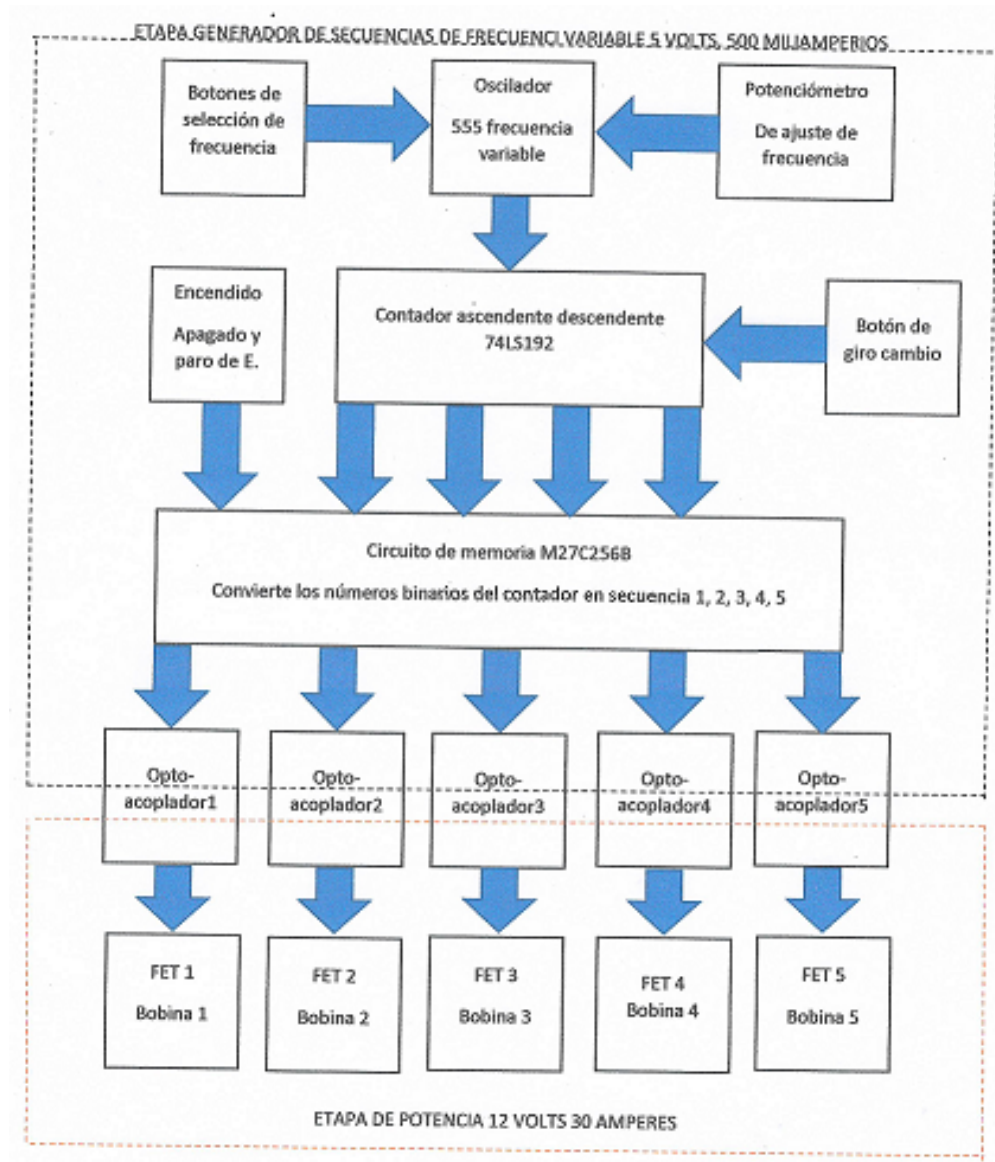
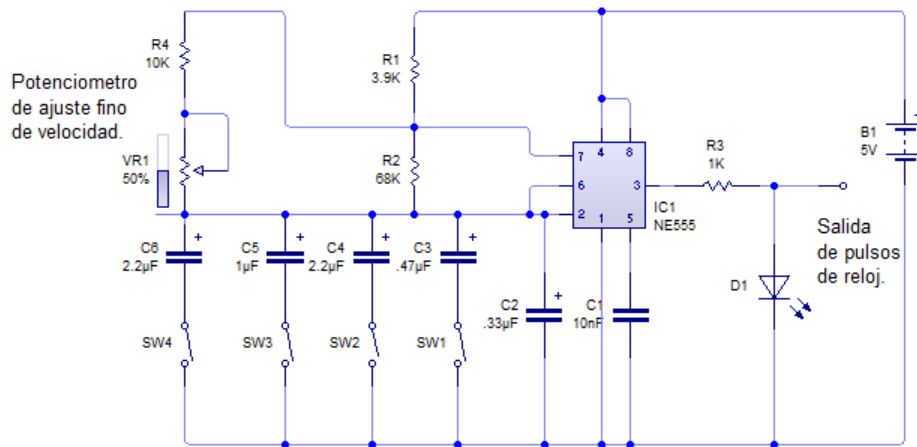


Figura 4-25: Diagrama a bloques del circuito generador de secuencias del motor de reluctancia conmutada.



Al ir cerrando los interruptores, se van sumando las capacitancias y disminuye la frecuencia del oscilador y cuando se abren, aumenta la frecuencia y de esta forma se controla la velocidad del motor de reluctancia conmutada

Figura 4-26: Oscilador de frecuencia variable con selector de rango y ajuste fino.

4.12. Etapa de potencia

La etapa de potencia está acoplada a la etapa del generador de secuencias de frecuencia variable que trabaja con 5 volts, por medio de opto-acopladores con matrícula PC817; y de esta manera, es posible controlar un motor de reluctancia conmutada. Tal vez fue la etapa más fácil de hacer; la salida de potencia cuenta con muy pocos elementos electrónicos, un FET con matrícula STP65NF06, el opto-acoplador PC817, dos resistencias, el diodo de protección y un diodo zener a 5.1 volt para fijar el voltaje de excitación de la compuerta. La figura 4-27 es de una de las cinco etapas iguales de potencia del motor de reluctancia conmutada. El funcionamiento es simple, cuando el optoacoplador recibe el voltaje para que encienda el led, el led enciende y hace que el transistor entre a la condición de conducción e, igual que un interruptor y permite el paso de la corriente a las resistencias que polarizan al transistor de potencia y el transistor de potencia tenga el potencial requerido para polarizar la compuerta del transistor y éste entra en estado de conducción, permitiendo que pase la corriente que energiza las bobinas del motor y

que están conectadas en paralelo pero invertidas para crear los campos magnéticos con polaridades opuestas; cuando el led del optoacoplador deja de tener el voltaje de encendido, regresa al transistor en su etapa de circuito abierto, deja de pasar corriente y todo el circuito pasa a la etapa de circuito abierto y se repite en cada una de los pares de bobinas.

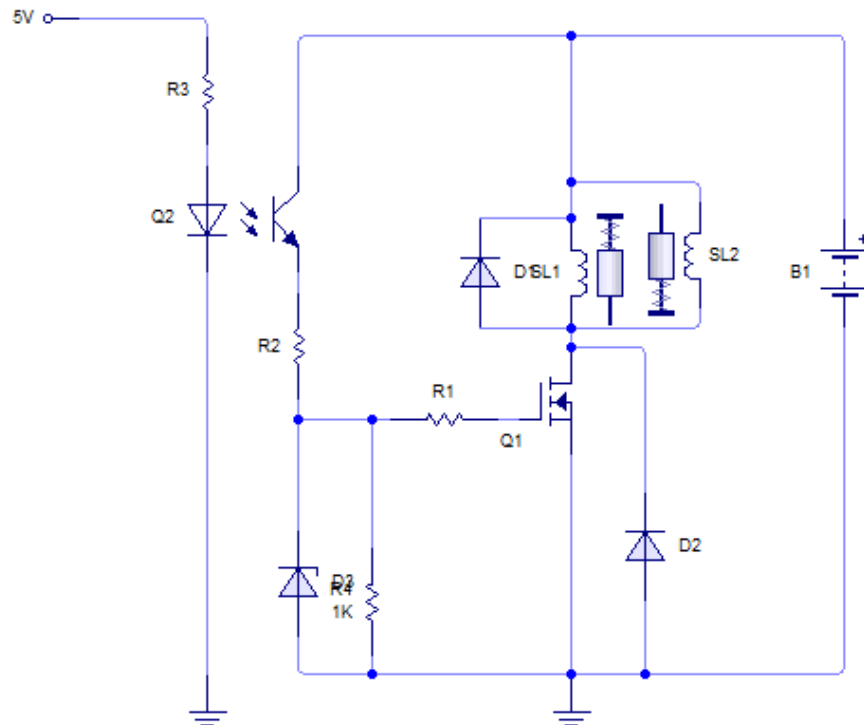


Figura 4-27: Circuito de potencia de una bobina del motor de reluctancia conmutada.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se muestra los resultados de análisis de los prototipos de motores de reluctancia conmutada construidos en este trabajo recepcional, las pruebas que se realizaron fueron sin carga.

5.1. Parámetros eléctricos de los prototipos

5.1.1. Primer prototipo:

Voltaje de alimentación	12 volts C.D.
Corriente de consumo	< a 300 miliamperes
Resistencia de las bobinas	300 ohms cada una
Velocidad máxima aprox.	1365 rpm aproximadamente
Costo aproximado	Reciclando 30 pesos
Sin reciclar	200 pesos
Tiempo de producción	20 días aproximadamente
Tiempo de vida del motor	Indeterminado
Utilidad	Demostrativa

No se pudo colocar un sistema de medición de velocidad por el diseño del motor,

pero se tomó en cuenta los pulsos cuadrados del osciloscopio. Aunque es un modelo muy sencillo, se pudo notar que los pulsos en las bobinas son cuadrados con una casi nula señal de sobresalto o armónicos, esto es debido a la ausencia de campos magnéticos remanentes en el rotor como sucede en los rotores con imanes.

5.1.2. Segundo prototipo:

Voltaje de alimentación	12 volts C.D.
Corriente de consumo	16 amperes aprox.
Resistencia de las bobinas	9.1 ohm en promedio C/U
Velocidad maxima .	674.4 rpm a velocidad estable
Costo aproximado	1290 pesos
Tiempo de producción	Aprox. Año y medio
Utilidad	Demostrativa

Se encontró que las formas de onda en las bobinas son cuadradas y sin armónicas, lo que beneficia a los transistores FET de salida porque no les produce estrés. Los detalles a corregir: evitar una flecha tan larga, cambiar los baleros por bujes, la flecha debe ser de acero pulido, disipadores en los soportes de las bobinas y un ventilador interno para enfriamiento.

5.2. Costos

5.2.1. Primer prototipo

El costo por ser hecho de material reciclado fue de \$30 pesos, si se hubieran comprado todos los materiales no hubiera excedido los \$200 pesos.

5.2.2. Segundo prototipo

El costo del segundo motor se muestra en la siguiente tabla

base del rotor sin dientes	\$35
varillas de cuña	\$120
alambre magneto calibre 30	\$320
solera	\$40
espárragos	\$40
opto-acopladores	\$30
tuercas y rondanas	\$40
dos baleros	\$90
dos placas perforadas	\$100
conectores	\$100
memoria	\$60
timer	\$10
contador	\$25
interruptores	\$70
FET	\$100
varios	\$150
Costo aproximado	\$1290
fuentes de alimentación	\$1000
Total	\$3600

En la figura 5-1 se muestra el segundo prototipo construido antes de agregar el circuito generador de secuencias y la etapa de potencia y en la figura 5-2 se muestra el motor de reluctancia conmutada ya armado con su etapa de potencia y el sistema generador de secuencias variable.



Figura 5-1: Diferentes etapas de la construcción del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada.

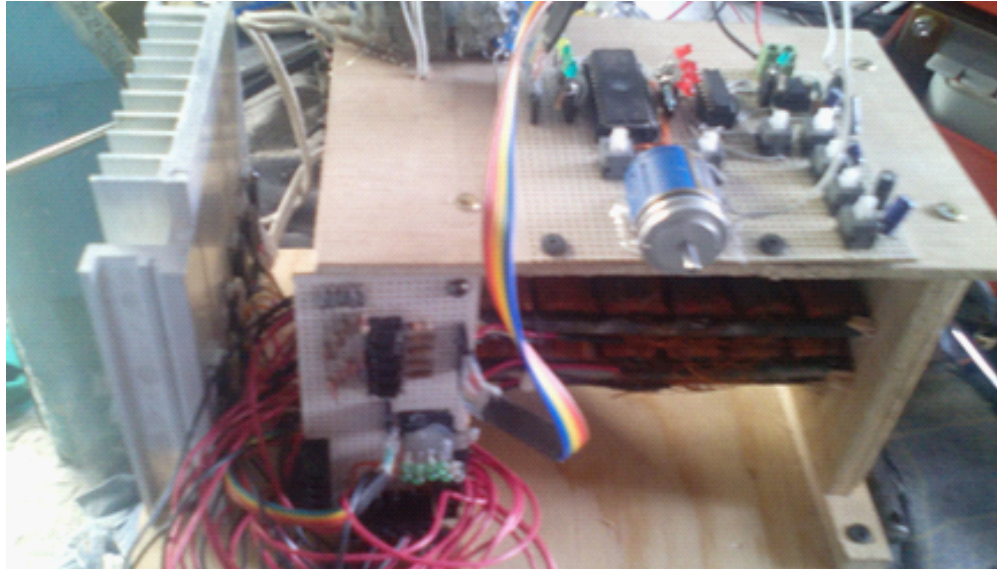


Figura 5-2: Segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada completo.

5.3. Formas de onda de voltaje del circuito digital.

En la figura 5-3 podemos ver las formas de onda de la salida del circuito de memoria, que son las que excitan a los transistores FET de potencia que activan a las bobinas del motor de reluctancia conmutada, y se muestran que las 2 señales se encuentran desfadas de una respecto a otra. Se trata de la señal de la bobina 1 y la bobina 3. estas señales se aplican a los opto-acopladores y a su vez a los transistores de salida de potencia que encienden y apagan las bobinas; se probó con las diferentes frecuencias que proporciona el sistema generador de secuencias y se encontró que el sistema es muy estable, pero que el par de fuerza disminuye al aumentar la velocidad del motor. Para llegar a la máxima velocidad del motor de reluctancia conmutada, se debe partir de una frecuencia baja y poco a poco, ir subiendo la frecuencia del generador de secuencias.

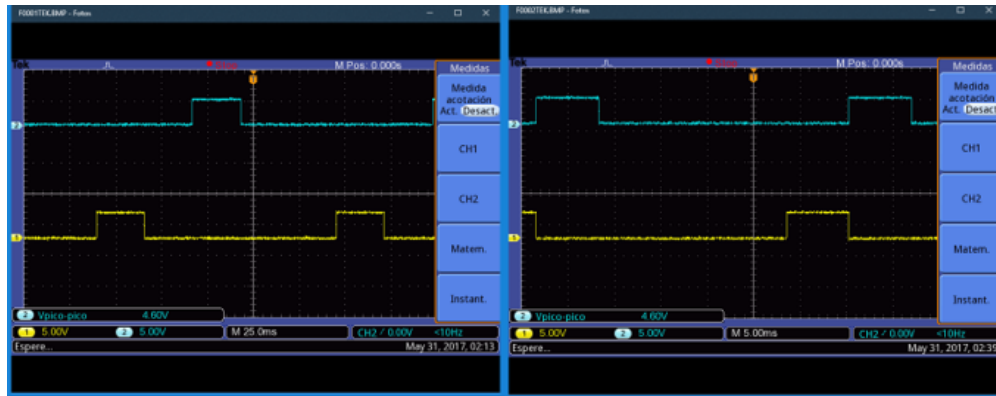


Figura 5-3: Dos tomas de las formas de onda de la salida de la memoria UV EPROM.

5.4. Formas de onda en los transistores de potencia

Los voltajes en los transistores de conmutación no son precisamente cuadrados 5-4 debido al carácter de los semiconductores de no ser lineales. Sin embargo, se puede notar que en la parte del pedestal inferior sí existe algo que semeja un pulso cuadrado, este voltaje que se registra en el transistor es muy pequeño debido a que el transistor cuando entra en conducción tiene una resistencia muy pequeña de aproximadamente 11.5 miliohm y lo hace un interruptor ideal para este tipo de motores, el calentamiento en los transistores es mínimo y sólo hay calentamiento en el rotor y en las bobinas por el efecto electromagnético en el material del rotor y del soporte de las bobinas.

5.5. Formas de onda de en las bobinas

En la figura 5-5, como podemos ver que se nota la ausencia de armónicos durante el funcionamiento del motor debido a la ausencia de imanes en el rotor y tiene como beneficio un menor estrés en los transistores de salida y estos transistores están diseñados para conmutaciones en motores.

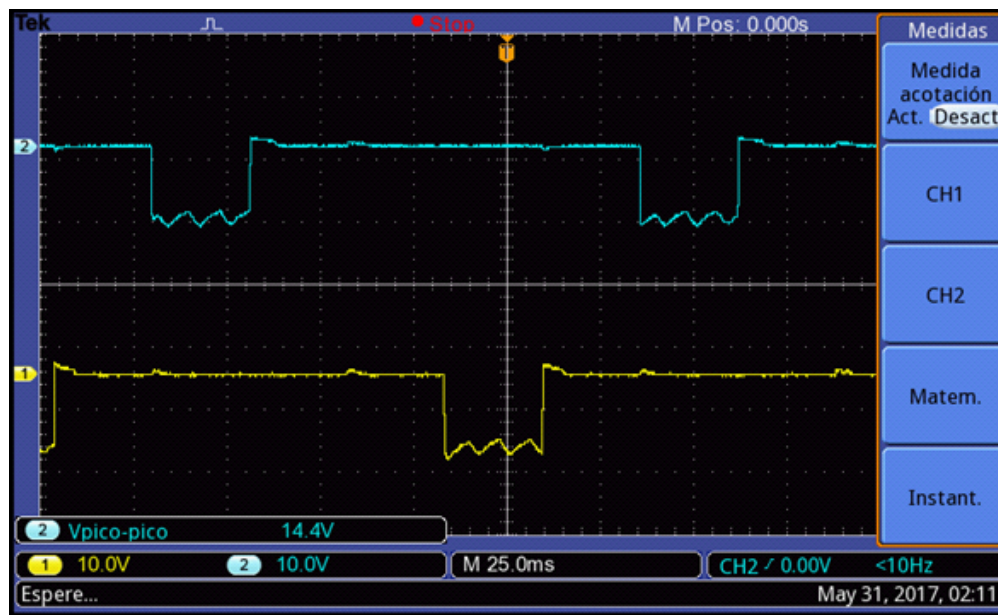


Figura 5-4: Formas de onda en los transistores de potencia del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada.

5.6. Velocidad rpm del motor

Para medir de velocidad del motor se usó un encoder que nos daba un pulso por revolución, y se usó el osciloscopio para medir la frecuencia de los pulsos en Hz y después multiplicar esta frecuencia por 60 segundos para obtener rpm.

En la figura 5-6 diagrama del encoder para medir rpm.

En la figura 5-7 podemos ver la salida del encoder, son pulsos en los que podemos saber su frecuencia. En ese caso en particular vimos que la velocidad máxima que alcanza nuestro motor de reluctancia conmutada es de 674 rpm y en donde el motor aún se mantiene estable; incluso, se dejó que trabajara más de media hora sin que se notaran cambios en la velocidad del motor, lo cual fue muy satisfactorio debido a que es el segundo prototipo y aún tiene muchos detalles de precisión por corregir, nótese que la base es de madera y las tapas también lo son; las bobinas aún no tienen la forma ideal y el peso de la masa es excesivo.



Figura 5-5: Formas de onda en las bobinas del segundo prototipo de motor de reluctancia conmutada.

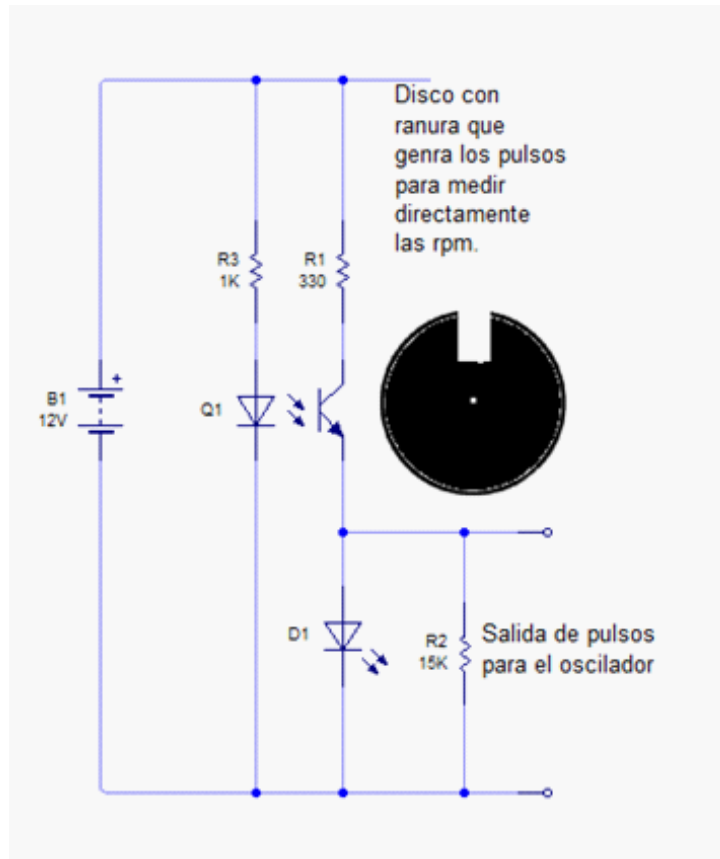


Figura 5-6: Circuito electrónico para el encoder, para medir la velocidad del motor de reluctancia conmutada en rpm.

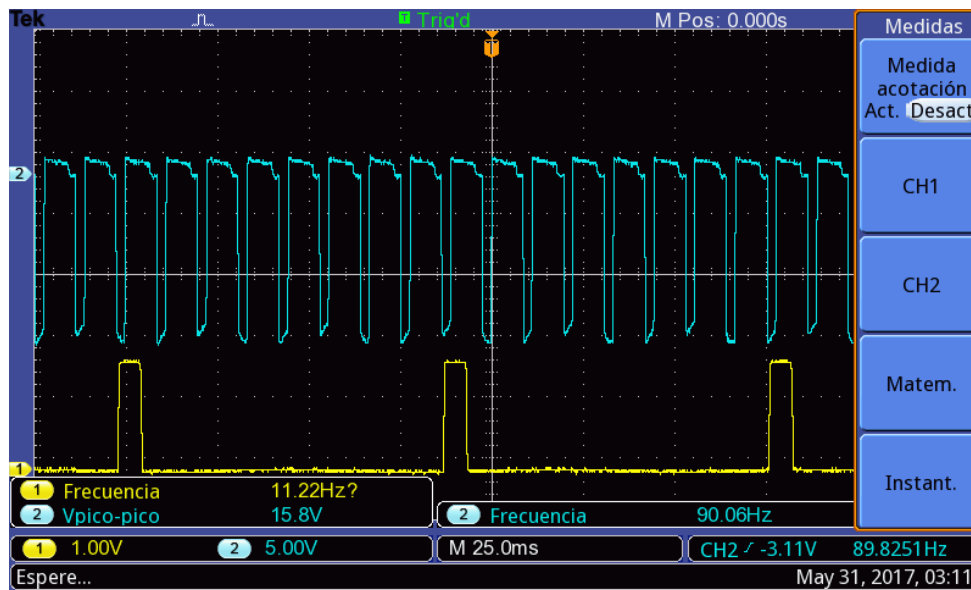


Figura 5-7: Formas de onda del sensor de velocidad y de una bobina.

La velocidad alcanzada por el motor es 674.4 revoluciones por minuto.

Se realizaron dos pruebas de velocidad con diferentes osciloscopios donde los resultados fueron muy cercanos entre sí; las posibilidades de error son muy pocas y esto demuestra la estabilidad del motor en su funcionamiento. En ambos casos, el motor trabajó cerca de una hora durante las mediciones.

5.7. Relación entre frecuencia de conmutación y velocidad rpm del motor de reluctancia conmutada

En la figura 5-8 se tomaron varias muestras de señales tanto del encoder como de un transistor de salida para ver la relación velocidad-frecuencia y poder hacer una gráfica con esos datos, y en la figura 5-9 se puede apreciar que existe una relación lineal entre

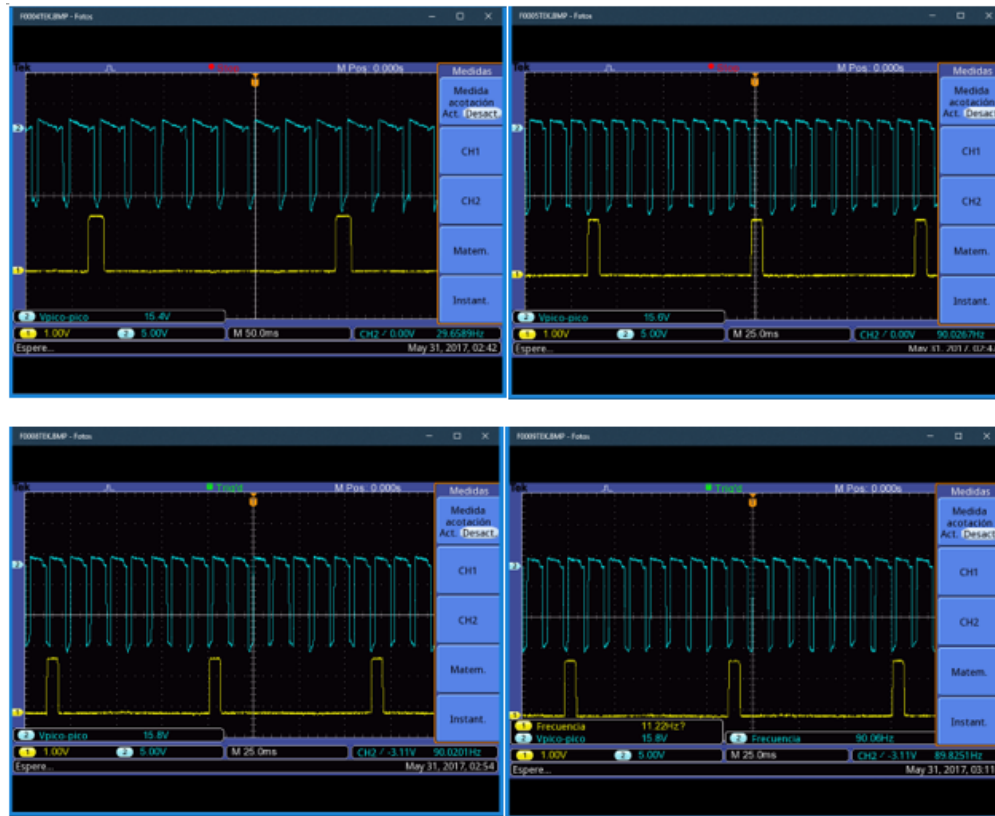


Figura 5-8: Formas de onda de salida de transistores y encoder a diferentes frecuencias de trabajo del motor de reluctancia conmutada.

la frecuencia de conmutación de las bobinas y la velocidad del motor. Por lo tanto, podemos decir que nuestro motor es síncrono, esta característica es ideal para hacer control en lazo abierto, ya que con que podamos controlar la frecuencia del generador de secuencias, podemos controlar la velocidad del motor de reluctancia conmutada.

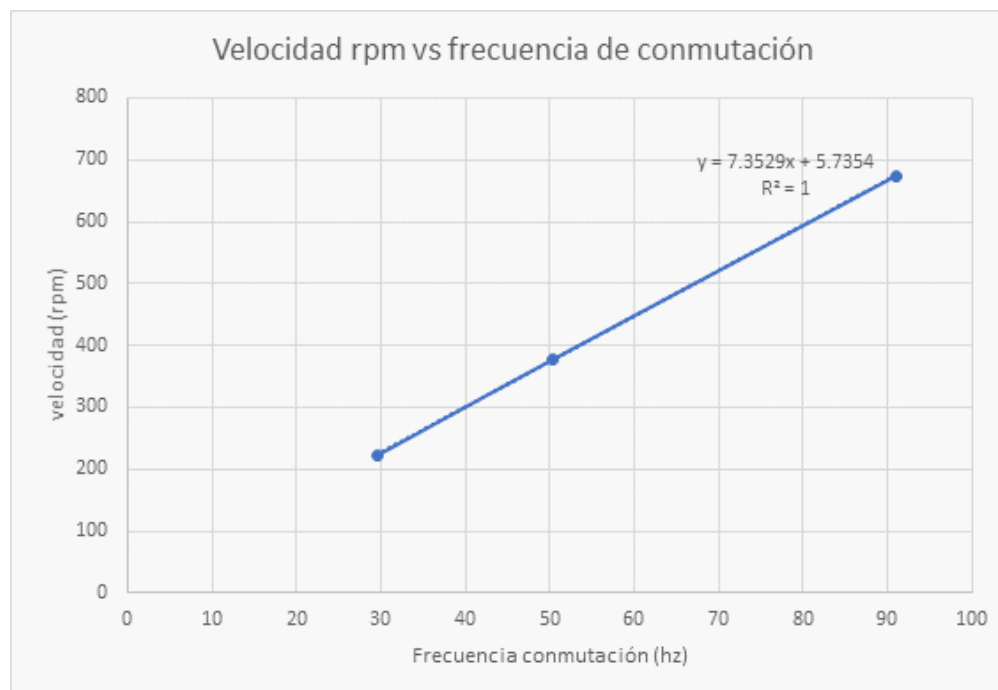


Figura 5-9: Gráfica de frecuencia de conmutación vs velocidad del motor de reluctancia conmutada.

Capítulo 6

Conclusiones

La construcción de los primeros prototipos de motor de reluctancia conmutada, dieron resultados positivos; la información que proporcionan para futuros prototipos nos permiten visualizar nuevas propuestas en las formas de estos motores; así como poder utilizar como base los circuitos electrónicos digitales para sistemas con conmutaciones rápidas. El costo aproximado del proyecto en total fue aproximadamente de 3000 pesos, contando la fuente de poder y algunos misceláneos no anotados. Para ser un segundo prototipo que se acerca más a un modelo real y podemos ver que no es caro y sí aporta mucha información para mejorar los próximos diseños, como reducir los tamaños o probar con otro tipo de materiales y reafirma la información y la predicción de su comportamiento. Hace falta un estudio a conciencia de materiales y de diseños de este motor, para aumentar sus aplicaciones en el mercado comercial e industrial.

Es muy atractivo su estudio porque representa un mercado aún virgen en este país, debido a que no existen marcas o fábricas que lo hagan, ni a nivel comercial, ni a nivel industrial, pero este proyecto no sólo proporcionó información sobre los motores de reluctancia conmutada, también proporcionó información sobre el comportamiento de campos magnéticos, bobinas, potencia y comportamiento de algunos materiales que pueden ser útiles para proyectos futuros.

Dentro de las mejoras que se pueden hacer al segundo prototipo están:

- i) Reducir el largo del rotor y su peso
- ii) Reducir la cantidad de polos a 4 porque a menor número de polos mayor velocidad
- iii) Probar el uso de bujes y ejes de acero para disminuir la fricción en el motor
- iv) Rediseñar las bobinas para aumentar el campo magnético y, por ende, el par de fuerza
- v) Hacer un motor a lazo cerrado para tener un mejor control de la velocidad
- vi) Hacer otro tipo de pruebas en los electroimanes para mejorar los diseños clásicos de los motores de reluctancia conmutada
- vii) Hacer bobinas para voltajes más altos y probar otros niveles de voltaje

Bibliografía

- [1] <http://www.agspecinfo.com/pdfs/M/M27C25~1.PDF> (figura 26) (Fecha de consulta abril 17, 2017)
- [2] http://alciro.org/alciro/Plotter-Router-Fresadora-CNC_1/Motores-reluctancia-variable_42.htm (Fecha de consulta marzo 20, 2016)
- [3] <http://www.arduino.org/products/boards/arduino-unono.org/products/boards/arduino-uno>
- [4] <http://www.biografiasyvidas.com> (Historia de los motores) (Fecha de consulta febrero 15, 2015)
- [5] Electronic Control of Switched Reluctance Machines Edited by T J E Miller editorial NEWNES, de la Serie: POWER ENGINEERING SERIES (Libro PDF)
- [6] <http://documents.mx/documents/motor-paso-a-paso-historia.html> (Fecha de consulta agosto 12, 2015)
- [7] www.ecomotriz.com/2011/11/motor-reluctancia-futuro (Fecha de consulta enero 10, 2017)
- [8] http://electricidaddelauto.blogspot.mx/2014_03_01_archive.html (Flujo magnético de los motores de reluctancia conmutada) (Fecha de consulta marzo 29, 2017)
- [9] <http://electroimn.blogspot.mx> (Fecha de consulta febrero 21, 2017)

- [10] <http://energia-nuclear.net/definiciones/electron.html> (Electricidad y electrones)
(Fecha de consulta mayo 22, 2016)
- [11] https://www.eti.kit.edu/download/Wolff_energia.pdf (Fecha de consulta diciembre 11, 2016)
- [12] <http://www.futurlec.com/74LS/74LS192.shtml> (Fecha de consulta marzo 17, 2016)
- [13] platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/SAP/archivos/1eva/introduccion_motores_ca.pdf
(Motores de corriente alterna)
- [14] http://quintans.webs.uvigo.es/recursos/Web_electromagnetismo/magnetismo_materiales.htm
(Fecha de consulta septiembre 12, 2016)