



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN REDUCTOR DE
VELOCIDAD CICLOIDAL MAGNÉTICO BALANCEADO**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

Luis Alberto Vázquez Pérez

TUTOR PRINCIPAL

Dr. Ricardo Chicurel Uziel

CO-TUTOR

DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

MÉXICO, D. F. FEBRERO 2013



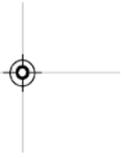
A mi familia,

seres queridos y amigos;

que son ejemplo, motivación y apoyo en mi vida.

Sin todos ustedes, este trabajo no hubiera sido posible.

Agradecimientos



Al Dr. Ricardo Chicurel Uziel y al Dr. Gabriel Ascanio Gasca, por sus conocimientos y enseñanzas.

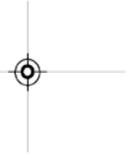
Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por su apoyo para poder realizar mis estudios de maestría.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), por su apoyo para poder realizar este proyecto.

A la Sección de Desarrollo de Prototipos del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), por su apoyo en la fabricación de las piezas para el prototipo.

Al Taller Mecánico del Instituto de Ingeniería, por su apoyo en la fabricación de las piezas para el prototipo.

Índice



RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	4
1.1 Reductores Cicloidales.	5
1.2 Reductores de velocidad magnéticos.....	7
1.3 Reductores de velocidad cicloidales magnéticos.	10
1.4 Objetivos.	13
METODOLOGÍA.....	14
2.1 Diseño.....	15
2.2 Manufactura.....	23
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	33
3.1 Pruebas a los imanes.....	34
3.2 Análisis Estático del Reductor.	36
3.3 Diseño de las pruebas.....	41
CONCLUSIONES.....	44
TRABAJO A FUTURO.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
ANEXOS.....	48

Índice de Figuras.

Figura 1. Partes de un reductor de velocidad [12].	5
Figura 2. Curva (a) Epicicloide e (b) Hipocicloide [9].....	6
Figura 3. Reductor cicloidal.[5].....	7
Figura 4. Engranés magnéticos con relación 1:1. [4]	8
Figura 5. a) Reductor magnético. b) Tornillo sinfín magnético [1].....	9

Figura 6. Reductor magnético Atallah & Howe.[1]	10
Figura 7. Diferentes configuraciones para un reductor cicloidal.[4]	11
Figura 8. Reductor cicloidal magnético [4]	12
Figura 9. Explosivo del Reductor Cicloidal Magnético Balanceado.	16
Figura 10. Engrane fijo en vista explosiva.....	17
Figura 11. Vista explosiva del engrane móvil.	18
Figura 12. Acople	18
Figura 13. Rueda de balanceo	19
Figura 14. Porta-baleros de Entrada.....	20
Figura 15. Flecha de entrada.	21
Figura 16. Vista explosiva de la salida del reductor.....	22
Figura 17. Porta-baleros de Salida.....	22
Figura 18. Fabricación del anillo del engrane fijo.....	23
Figura 19. Fabricación del soporte por corte con chorro de agua.....	24
Figura 20. Fabricación en CNC del soporte.....	25
Figura 21. Anillo móvil.	25
Figura 22. Corte con chorro de agua del centro del engrane móvil.....	26
Figura 23. Fabricación de la rueda de balanceo.....	26
Figura 24. Solera rolada para fabricar el porta-baleros de entrada.....	27
Figura 25. Porta-baleros de entrada con rayos.....	28
Figura 26. Porta-baleros de entrada final.....	28
Figura 27. Maquinado de la flecha de entrada.....	29
Figura 28. Fabricación del porta-baleros de salida.....	29
Figura 29. Flecha de salida.....	30
Figura 30. Fabricación del plato de la flecha de entrada.....	31
Figura 31. Ensamble de las diferentes piezas del conjunto de salida.....	31
Figura 32(a). Vista frontal. (b) Vista posterior del reductor de velocidad final.....	32
Figura 33. Dispositivo para medir la fuerza longitudinal entre un par de imanes.....	35
Figura 34. Dispositivo para medir la fuerza tangencial.....	36
Figura 35. Posición del engrane móvil para el análisis estático.....	36
Figura 36. Diagrama de cuerpo libre del acople.....	37
Figura 37. Diagrama de cuerpo libre del rodamiento.....	37
Figura 38. Diagrama de cuerpo libre del engrane móvil.....	38
Figura 39. Motor de entrada.....	42
Figura 40. Dinamómetro.....	42
Figura 41. Celda de carga.....	43

RESUMEN



Los reductores de velocidad tienen una amplia gama de aplicaciones y los podemos encontrar habitualmente en todo lugar donde haya un motor, es decir prácticamente en toda la industria. Esto se debe a que generalmente no se utiliza un motor a su velocidad nominal, sino que normalmente se requiere una velocidad más baja y un mayor par, características que se pueden obtener fácilmente con la utilización de un reductor de velocidad.

Los reductores de velocidad se pueden encontrar en diferentes tamaños y configuraciones, dependiendo del tipo de elementos de transmisión, el principio de funcionamiento, así como el tipo de aplicación para el que estén diseñados.

En este trabajo se hablará sobre los reductores de velocidad cicloidales y los reductores magnéticos, y se abundará en la descripción del desarrollo de un novedoso reductor de velocidad que combina ambas tecnologías.

El reductor de engranes cicloidal es una transmisión planetaria muy sencilla. La entrada de alta velocidad es una manivela que imparte un movimiento circular al eje de un engrane de dientes externos, que se suele llamar engrane de potencia. Este último enlaza con un engrane fijo de dientes internos, causando una rotación del primer engrane sobrepuesta a la translación circular. La rotación se transmite a la flecha de salida, la cual es colineal con la de entrada, a través de un mecanismo simple que filtra el movimiento de translación. En la versión que aquí se desarrolla, los engranes se sustituyen con ruedas que llevan imanes cilíndricos colocados radialmente en su periferia con polaridades alternantes.

Si bien el reductor cicloidal, también llamado planocentrico, es sencillo y compacto, presenta ciertas desventajas; una de ellas es que el movimiento orbital

del engrane de potencia, conlleva una fuerza centrífuga de desbalance, cuya neutralización con masas rotatorias complica el diseño e introduce pérdidas de energía. El reductor que aquí se propone incorpora una solución novedosa a este problema basada en contrabalancear la fuerza de desbalance con un anillo cuyo centro de masa se mueve en el mismo plano que el del engrane de potencia. Dicho anillo tiene un movimiento de rotación superpuesto a una translación circular tal que su centro siempre queda diametralmente opuesto al del engrane de potencia. El arreglo presenta la ventaja de que todos los centros de masa de los engranes y la rueda de balanceo están en un mismo plano.

En el primer capítulo de este trabajo se dan los antecedentes mínimos necesarios para entender el funcionamiento de los reductores de velocidad, así como para conocer el estado del arte de los reductores, tanto mecánicos o tradicionales como de los reductores magnéticos. En el segundo capítulo se desglosa el desarrollo de un reductor cicloidal magnético, pasando por el diseño y la manufactura. Finalmente en el capítulo tres se presentan las pruebas realizadas al reductor para poder caracterizarlo, los resultados de dichas pruebas así como el análisis de los mismos.

ABSTRACT

Speed reducers have a wide range of applications and can be usually find at any place where an engine is used, practically at all the industry. This is because generally a motor is used at lower speed and higher torque and not at its rated speed, features that can be easily obtained with the use of a speed reducer.

Speed reducers can be found in many different sizes and configurations, depending on the transmission elements, the principle of operation and the type of application for which they are designed.

This thesis discusses the cycloidal speed reducers and magnetic gear, and talk in depth about the development of a novel speed-reducer, which combines both technologies.

The cycloidal gear reducer is a simple planetary transmission. The high speed input crank imparting a circular motion to the shaft of a gear of external teeth, which is often called power-gear. The power-gear connects with a fixed internally toothed gear, causing rotation of the first gear superimposed on the translational circular. The rotation is transmitted to the output shaft, which is collinear with the input, through a simple mechanism that filters the translation movement. In version developed here, the gears are replaced with wheels that have cylindrical magnets arranged radially on its periphery with alternating polarities.

While the cycloidal gear, also called planocentrico is simple and compact, has certain disadvantages, one of which is that the orbital motion of gear power leads unbalance centrifugal force, whose neutralization with rotating masses complicates the design and introduces losses energy. The speed reducer proposed here incorporates a novel solution to this problem based on balancing the counterbalancing forces with a wheel whose center of mass moves in the same plane as the power gear. This wheel has a superimposed rotational movement to a circular translational such that its center is provided diametrically opposite the output gear. The arrangement has the advantage that all of the mass centers of the gears and the balancing wheel are in one plane.

The first chapter of this work talks about the minimum necessary backgrounds to understand the operation of speed reducers, and to know the state of the art of mechanical speed reducer or magnetic reducers. The second chapter discusses about the development of a magnetic cycloidal reducer, through design and manufacturing. Finally chapter three shows the tests to characterize the speed reducer, the results of these tests and the analysis thereof.

INTRODUCCIÓN

1



Un elemento indispensable en la industria, en prácticamente todas sus áreas, son los motores, y puesto que éstos funcionan a distintas velocidades, dependiendo del uso que se les quiera dar, los reductores de velocidad están siempre ligados a ellos.

Un reductor de velocidad de engranes es un arreglo con un eje de entrada y uno de salida, rodamientos y alojamientos de lubricación (Figura 1). Así, los reductores de engranes son sistemas de engranajes que permiten obtener de los motores diferentes velocidades para las que fueron diseñados.

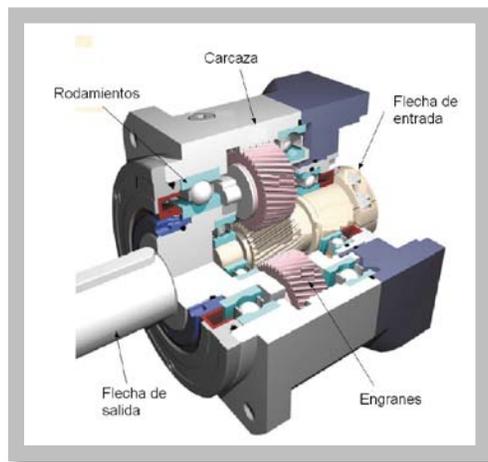


Figura 1. Partes de un reductor de velocidad [12].

Existe una amplia gama de reductores de velocidad, los cuales se diferencian entre sí principalmente por su forma constructiva y disposición de montaje de sus componentes.

1.1 Reductores Cicloidales.

Una curva epicloide o hipocicloide se genera por un punto de un círculo, el cual rueda alrededor de la circunferencia exterior o interior de un círculo fijo (Figura 2). Es por esto que el reductor de tren de engranes planetario es frecuentemente llamado tren de engranes epicicloidal.

Se puede definir el tren de engranes epicicloidal como un sistema mecánico de elementos conducidos, uno de los cuales se mueve alrededor de la circunferencia de uno o más de los miembros centrales sobre un brazo o soporte.

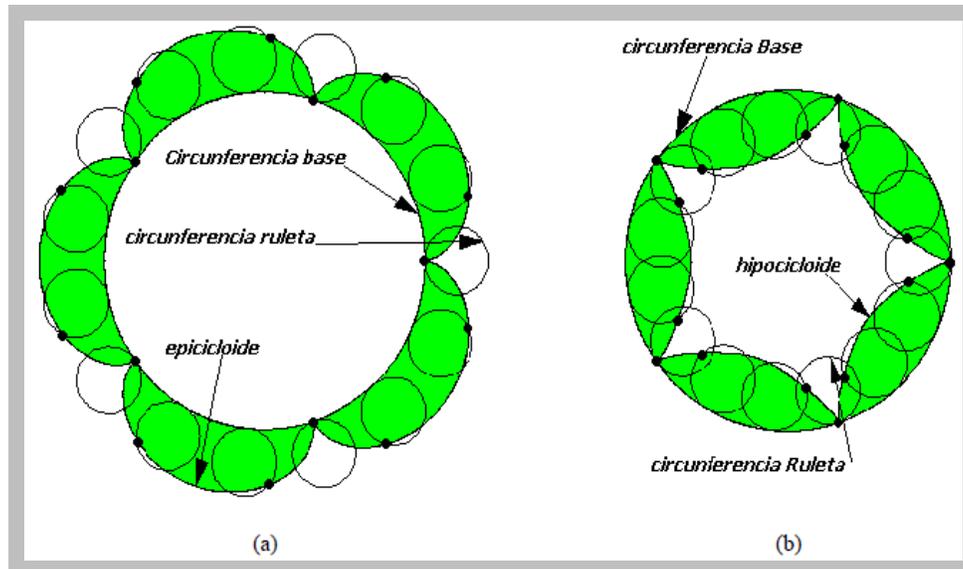


Figura 2. Curva (a) Epicicloide e (b) Hipocicloide [9]

Un ejemplo claro de un movimiento hipocicloidal se puede observar en la trayectoria trazada por el diente de un piñón planetario rotando dentro de una corona; por otra parte los reductores armónicos y planocéntricos son tipos generales de los reductores cicloidales.

El reductor cicloidal transmite potencia en una estructura pequeña y compacta. En contraste con el movimiento circular de los engranes en otro tipo de reductores, los reductores cicloidales usan un movimiento no circular o excéntrico en sus componentes para convertir el movimiento de rotación de entrada en un movimiento cicloidal oscilante. Este movimiento cicloidal es posteriormente convertido nuevamente en un movimiento circular homogéneo, con una salida colineal con la flecha de entrada. Es en este proceso cuando la reducción de velocidad ocurre.

Es sabido que el reductor de velocidad cicloidal, debido a su configuración de varios dientes o lóbulos en contacto (Figura 3), ofrece ventajas significativas

respecto a otros reductores, como lo son un pequeño volumen, peso ligero, una transmisión constante, una operación silenciosa, y un alta capacidad de par.

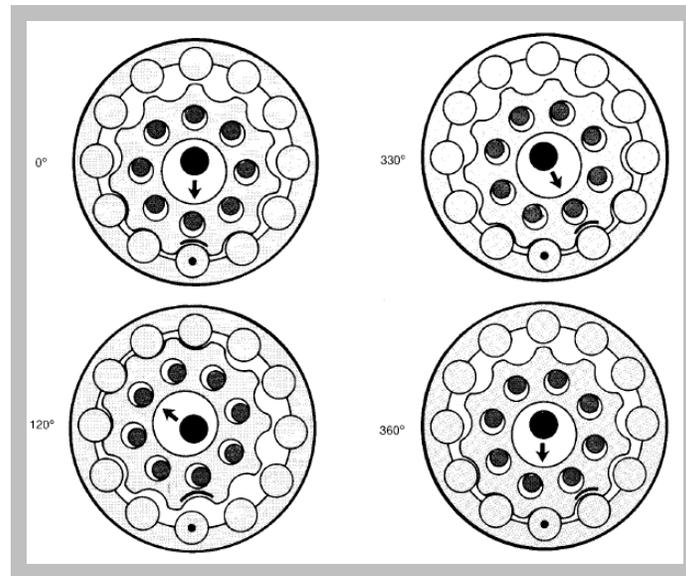


Figura 3. Reductor cicloidal.[5]

1.2 Reductores de velocidad magnéticos

Los imanes permanentes han fascinado e inspirado a mucha gente a lo largo del tiempo debido al flujo y la fuerza magnética que producen, y estas características han permitido una amplia aplicación de los mismos. Entre las aplicaciones más comunes que encontramos destacan los mecanismos de levantamiento de objetos metálicos, las bocinas y acoplamiento magnéticos, sin olvidar las máquinas eléctricas, como los motores, que se han renovado en las dos últimas décadas gracias al uso de imanes permanentes. Este renacimiento ha sido más claro en máquinas pequeñas donde tanto la eficiencia como la densidad de par se han visto claramente mejoradas con el uso de imanes permanentes.

Un área en la que los imanes permanentes no habían sido explorados era la de los engranes y reductores de velocidad en general. Aunque existen acoplamiento magnéticos, éstos no se consideran engranes, sin embargo con el tiempo se ha

observado que un acoplamiento de este tipo se puede considerar un engranaje con una relación de reducción de 1:1 (Figura 4),

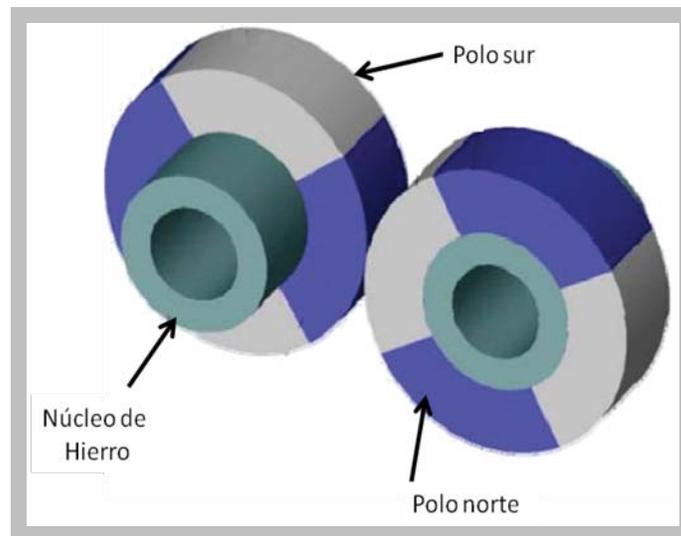


Figura 4. Engranes magnéticos con relación 1:1. [4]

Por otra parte los reductores magnéticos ofrecen grandes ventajas potenciales frente a los reductores mecánicos tradicionales, tales como [1]:

- Vibración y ruido acústico reducidos.
- Mantenimiento reducido y una mayor confiabilidad.
- Capacidad de transmisión de un par pico preciso, y una inherente protección de sobrecarga.
- Posible aislamiento físico entre la flecha de entrada y la de salida
- Contacto nulo entre elementos, aunque en el caso de este trabajo esto ofrece ventajas.
- Aumento del rango de la temperatura de trabajo, en ciertos casos.
- Incremento en la tolerancia de desalineación

La primera patente registrada sobre un engranaje magnético data de 1901(US Pat. 687,292), en la cual se presenta una rueda dentada magnética utilizando bobinas; en los años posteriores se desarrollan diversas configuraciones de engranes magnéticos, utilizando en todas ellas bobinas, y no es hasta 1967 que se presenta

la primera patente (US Pat. 3, 301,091) de un reductor de velocidad con imanes permanentes. A partir de ese año el desarrollo de engranes y reductores magnéticos es más productivo y se logran reducciones planetarias, ruedas dentadas, engranajes cónicos e incluso tornillos sinfín magnéticos (Figura 5).

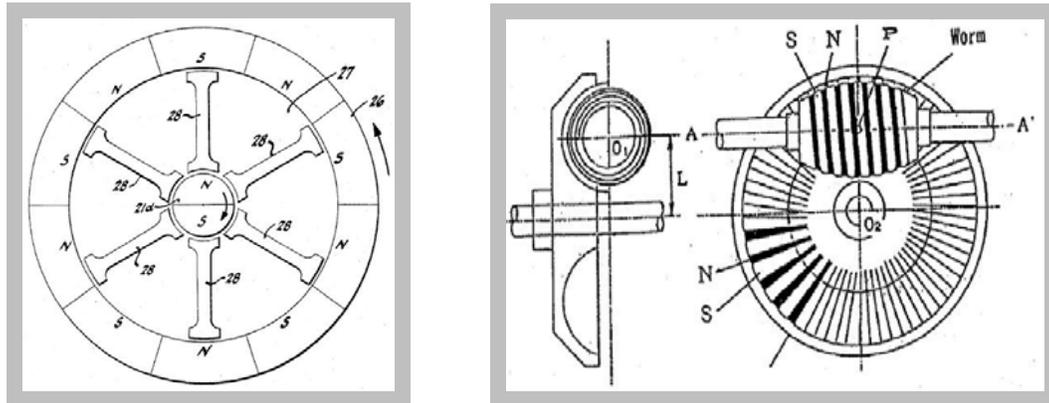


Figura 5. a) Reductor magnético. b) Tornillo sinfín magnético [1]

En los últimos años se han logrado importantes mejoras en los reductores de velocidad magnéticos lográndose densidades de par de $100 \text{ N}\cdot\text{m/l}$ con relaciones de reducciones de 5.5:1 y eficiencias medidas de 97% en la conversión de la velocidad-par. Estas características se han logrado con reductores magnéticos de configuración muy sencilla, tales como el presentado por Atallah & Howe [9] en el 2001 (Figura 6). En dicha configuración se tiene un rotor interior de alta velocidad, el cual contiene 4 pares de imanes; un rotor exterior de baja velocidad compuesto de 22 pares de imanes; y de una etapa intermedia de 26 piezas metálicas fijas. Con esta configuración la dirección de rotación de la flecha de entrada y salida puede ser elegida en un sentido u otro.

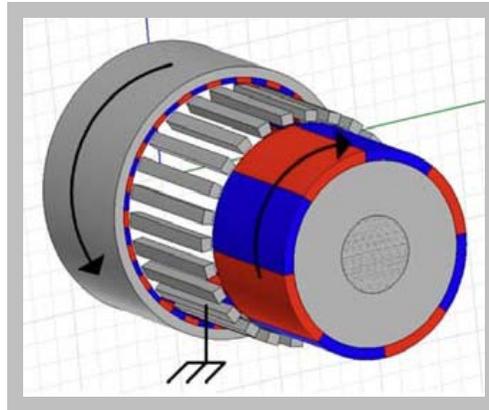


Figura 6. Reductor magnético Atallah & Howe.[1]

1.3 Reductores de velocidad cicloidales magnéticos.

Como se mencionó anteriormente, las reducciones magnéticas comienzan a jugar un papel importante en el ámbito de los reductores de velocidad, debido a las importantes ventajas que ofrecen y a los buenos resultados que se han obtenido en cuanto a eficiencia y densidad de par, sin embargo a pesar del buen desempeño que han mostrado aún existe un gran potencial por explotar si se considera que un acoplamiento magnético puede ofrecer una densidad de par de hasta $400 \text{ [kN}\cdot\text{m/m}^3]$ en una relación de reducción de 1:1, y en la mayoría de los reductores magnéticos desarrollados hasta el momento solo se han logrado densidades de par de $100 \text{ [kN}\cdot\text{m/m}^3]$.

Por lo anterior, se han propuesto diferentes configuraciones de reductores de velocidad con imanes permanentes tratando de incrementar la eficiencia y la densidad de par, y una de las propuestas que ha presentado un mejor desempeño es el reductor de velocidad cicloidal magnético, el cual está basado en el reductor de velocidad tradicional del mismo nombre y que fue descrito brevemente a principios de este capítulo.

Esta topología ha hecho posible el incremento de la densidad de par en casi el doble de lo logrado con reductores magnéticos anteriores, y por lo tanto se ha planteado su uso en aplicaciones que emplean reductores mecánicos

tradicionales, o al menos en aplicaciones en donde las ventajas ofrecidas por esta tecnología son significativas.

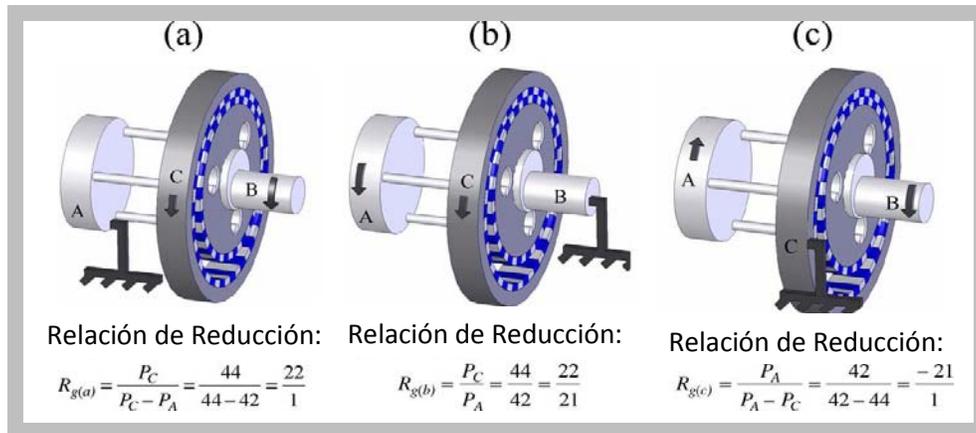


Figura 7. Diferentes configuraciones para un reductor cicloidal.[4]

El principio de movimiento del reductor cicloidal magnético consiste en fijar el engrane exterior y tener movimiento en el engrane interior conectado a la flecha de entrada, sin embargo existen otras configuraciones que ofrecen diferentes relaciones de reducción. En la Figura 7 se muestran los tres posibles arreglos que se logran al fijar diferentes elementos del reductor. Como se puede observar en la combinación (a) al mantener fija la salida y libres los dos engranes se obtiene una relación de reducción, en este ejemplo, de 22 y con movimiento de giro en el mismo sentido para ambas ruedas; de manera similar en la configuración (c) se obtiene la misma relación de reducción al mantener fija la rueda exterior, pero con un sentido de giro en la salida opuesto al movimiento de entrada; finalmente en la configuración (b) se obtiene la menor relación de reducción al fijar el engrane interior y el sentido de giro tanto para la rueda exterior como para la salida es el mismo.

Las tres configuraciones mostradas previamente presentan densidades de par muy similares, y la elección de una u otra solo depende de la aplicación que se le vaya a dar. Comúnmente la configuración (c) es la más utilizada por las ventajas que ofrece su diseño, como por ejemplo que la flecha de salida puede ser

diseñada con una relativa buena separación entre rodamientos para un mejor soporte de las cargas en la flecha de salida.

En el 2008 fue desarrollado un reductor cicloidal magnético [4] con muy buenas prestaciones. Este reductor tiene en su rueda interior 42 imanes y en la exterior 44 dando una reducción de 22:1(Figura 8); los imanes permanentes utilizados tienen un flujo remanente de 1.21 [T], la excentricidad entre las ruedas es de 2.5 [mm] y el entrehierro de 0.5 [mm]. Con este reductor se logró obtener una densidad de flujo de 183 [N•m/l], que representa casi el doble de lo obtenido con configuraciones previas. Por otra parte se obtuvo una eficiencia del 94% a 50 rpm en la flecha de salida y con par de hasta 25 [N•m].

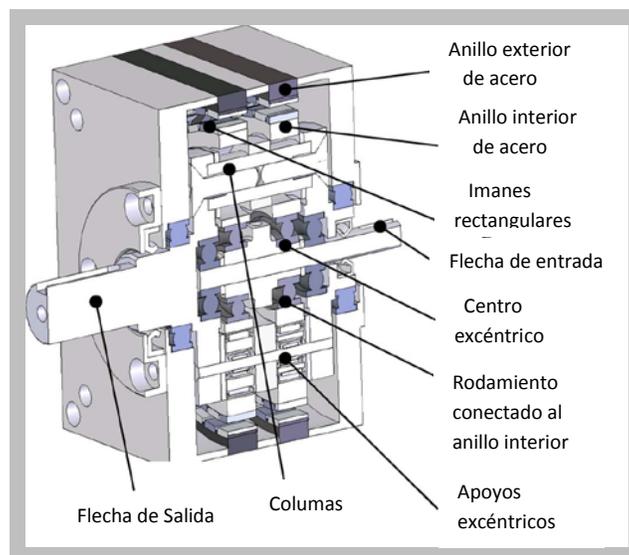


Figura 8. Reductor cicloidal magnético [4]

A pesar de los excelentes resultados obtenidos con este reductor, se observaron diferentes áreas de oportunidad, en las cuales se puede mejorar el diseño y por ende el desempeño de este tipo de reductores.

1.4 Objetivos.

Diseñar, construir y caracterizar un reductor de velocidad cicloidal magnético balanceado. Parte de los beneficios de la presente propuesta será el desarrollo completamente documentado de un reductor de velocidad, el cual será protegido intelectualmente por medio de una patente.

1.4.1 Objetivos particulares.

- Realizar los planos necesarios para la fabricación y documentación de cada elemento del reductor.
- Supervisar la adecuada fabricación de las piezas del reductor, así como su correcto ensamble.
- Colaborar en el diseño y realización de las pruebas necesarias para caracterizar el reductor.
- Analizar e interpretar los resultados obtenidos de las pruebas realizadas.

METODOLOGÍA ²



En el reductor propuesto en este trabajo, los engranes magnéticos hacen contacto mecánico entre sí y ruedan uno contra el otro, lo que difiere de las transmisiones magnéticas detectadas en una búsqueda bibliográfica, en las cuales no existe contacto, como en la descrita en el capítulo anterior.

En el reductor presentado se obtienen, además de las ventajas que ofrecen los reductores magnéticos, tres ventajas significativas: la capacidad de transmisión de fuerza por efecto magnético es mayor porque la separación entre polos activos se reduce a cero, se logra añadir capacidad por efecto de la fuerza de fricción adicional asociada a la fuerza normal de contacto y, se elimina la carga radial en el engrane que de otra manera debe ser resistida por un rodamiento.

2.1 Diseño.

El reductor cicloidal magnético balanceado fue diseñado no sólo para ofrecer las ventajas previamente mencionadas, sino que también se contempló en el diseño que su manufactura fuera posible con los recursos con los que se cuenta tanto en el CCADET como en Instituto de Ingeniería de la UNAM, y consta básicamente de los elementos enlistados a continuación.

No del elemento en la Fig. 9	Nombre de la pieza	Cantidad
1	Engrane Fijo o Soporte	1
2	Engrane Móvil	1
3	Rodamiento 6006-14	2
4	Rodamiento 6002-12	2
5	Rodamiento 6008-16	2
6	Acople 1	1
7	Rueda de Balanceo	1
8	Acople 2	1
9	Porta-baleros de Entrada	1
10	Flecha de Entrada	1
11	Salida	1
12	Rodamiento RNA-4900-12	6
13	Porta-baleros de Salida	1
14	Anillo de Retención	1

Tabla 1. Lista de componentes básicos del Reductor.

Los elementos principales y de los que se hará una descripción más detallada, son aquéllos que se diseñaron y fabricaron en las instalaciones del CCADET y del Instituto de Ingeniería. El resto de los elementos son piezas comerciales, tales como rodamientos, anillos de retención y tornillería en general. En la Figura 9 se puede observar un despiece de las piezas principales del reductor.

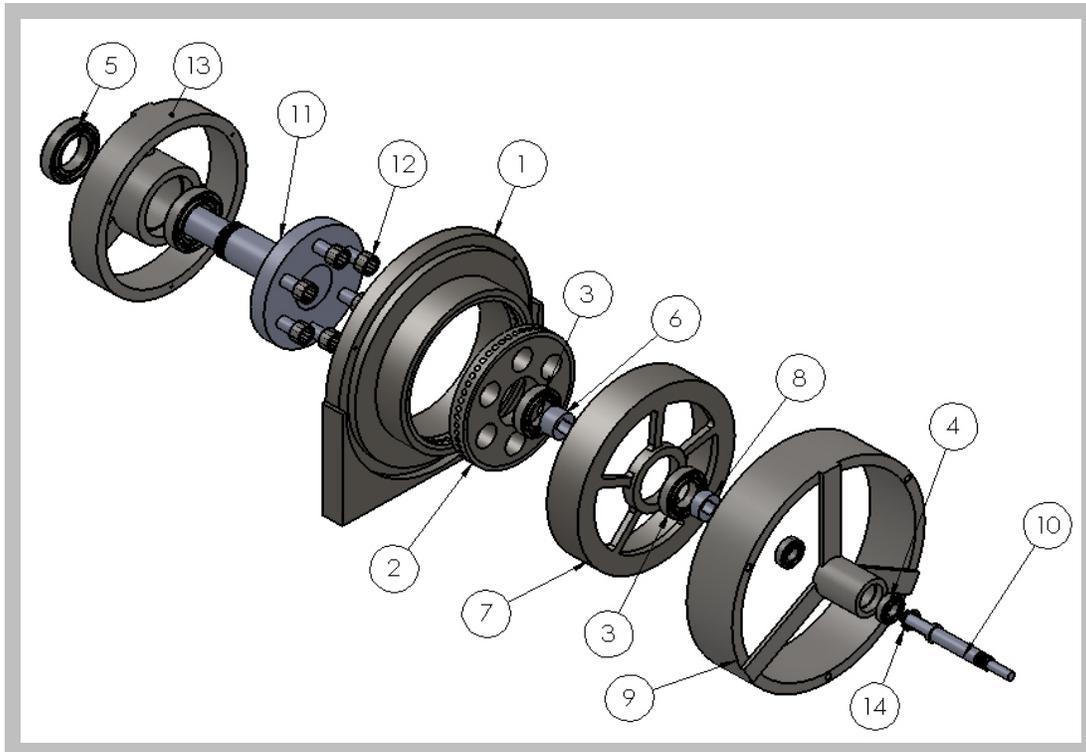


Figura 9. Explosivo del Reductor Cicloidal Magnético Balanceado.

A continuación se hace una breve descripción de los principales elementos del sistema, así como de su función dentro del reductor y los materiales con los que están fabricados.

- **Soporte o Estator.**

Este componente del sistema está compuesto básicamente por dos piezas, y su función principal es la de engrane fijo para el reductor, sin embargo también sirve de soporte para todo el sistema, ya que es en este componente donde se sujetan los porta-baleros tanto de entrada como de salida (Figura 10).

La pieza principal de este componente es una estructura que está fabricada en acero al carbono, y en la cual se fijan los dos porta-baleros colinealmente.

La otra pieza es un anillo de acero inoxidable no magnético, en el cual van insertos los 54 imanes correspondientes; dichos imanes son de Neodimio, tienen un diámetro de 6 mm y una longitud de 5 mm. Es en la superficie de la cara interior de este anillo donde rodará la superficie de la cara exterior del anillo del engrane móvil.

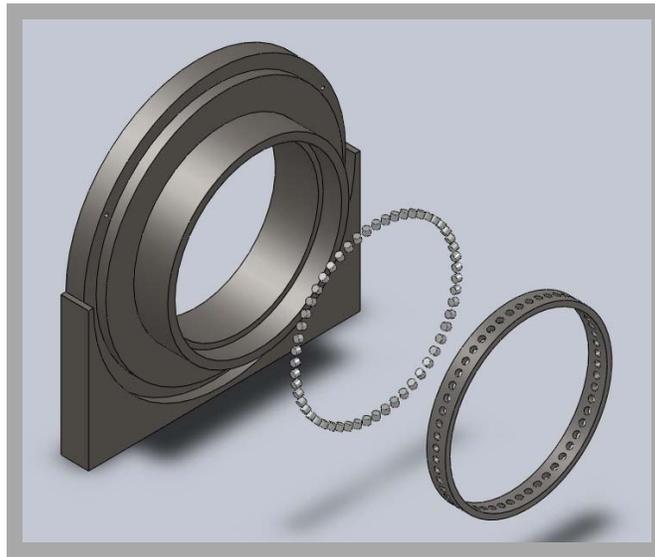


Figura 10. Engrane fijo en vista explosiva.

- **Engrane Móvil.**

En la Figura 11 se presenta una vista en explosivo del engrane móvil. Como se puede observar, este elemento del sistema está compuesto a su vez por dos piezas principales. La primera es su centro, el cual está fabricado en acero al carbono; esta pieza tiene los 6 barrenos pasados donde se desplazarán tangencialmente los pernos del elemento de salida, así como un barreno central donde se alojará un rodamiento y el cople para la flecha de entrada. La segunda pieza que compone el engrane móvil es un anillo de acero inoxidable no magnético, el cual tiene 52 barrenos pasados donde se insertarán los imanes de iguales características que los del engrane fijo.



Figura 11. Vista explosiva del engrane móvil.

- **Acoplamiento**

Los acoplamientos son dos elementos muy sencillos que permiten el movimiento cicloidal en el engrane móvil, así como en la rueda de balanceo, gracias al ojal con el que cuentan. De igual forma estos acoplamientos permiten que los centros de masa del engrane fijo y de la rueda de balanceo siempre se encuentren diametralmente opuestos. Por otra parte, estos elementos permiten que en este diseño no se requiera de un cigüeñal u otro elemento complejo como flecha de entrada. El cople del engrane fijo (Figura 12) además delimita la separación entre dicho engrane y el móvil para evitar que haya contacto entre ellos. Los dos acoplamientos están fabricados en acero al carbono.

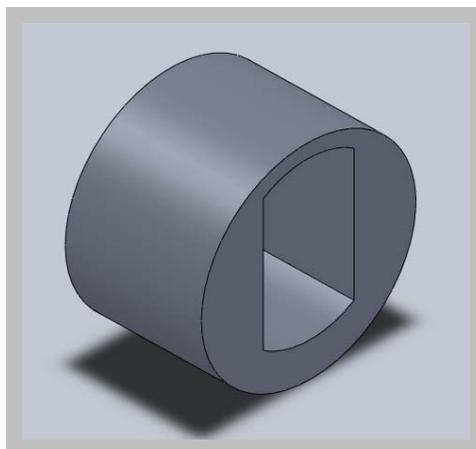


Figura 12. Acople

- **Rueda de Balanceo.**

La rueda de balanceo es un elemento que genera una fuerza centrífuga que se opone a la del engrane móvil en su movimiento orbital. Para su diseño se tuvo una restricción en la masa total del elemento, la cual, por la excentricidad de la rueda resulto ser aproximadamente el doble de la masa del engrane móvil. De igual modo, el centro de masa de la rueda de balanceo estaba restringido, de modo tal que en el ensamble tanto el centro de masa del engrane móvil como de la rueda de balanceo debían localizarse en el mismo plano transversal.

Debido a las restricciones anteriores y a las mismas dimensiones del resto de los elementos del reductor, la geometría y las dimensiones de la rueda de balanceo quedaron como se muestra en la Figura 13.

La rueda de balanceo está fabricada en acero al carbono, y en su centro, al igual que en el engrane móvil, se alojará su respectivo rodamiento y su acoplamiento.

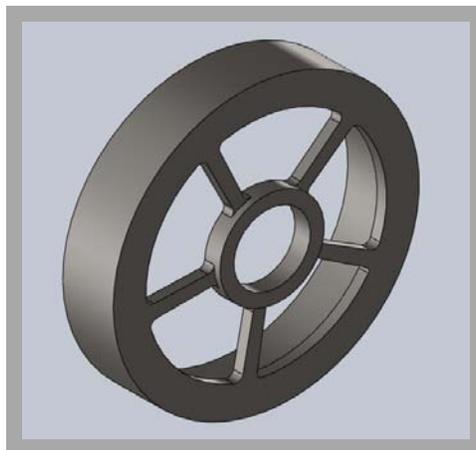


Figura 13. Rueda de balanceo.

- **Porta-baleros de Entrada.**

Este porta-baleros tiene como finalidad dar soporte a la flecha de entrada, por lo que se fija a la estructura del soporte a través de 3 tornillos, quedando centrada con respecto al engrane fijo gracias al contacto entre las superficies cilíndricas de localización de ambas piezas. De igual modo,



la flecha de entrada queda centrada con respecto al engrane fijo gracias al porta-baleros. Este elemento está fabricado con solera y barra redonda de acero al carbono, como se puede observar en la Figura 14.



Figura 14. Porta-baleros de Entrada.

- **Flecha de Entrada.**

La Figura 15 muestra una imagen de la flecha de entrada, la cual está fabricada en barra redonda de acero rolado en frío. En la zona del diámetro mayor van colocados los acoplamientos, tanto de la rueda móvil como de la de balanceo; las caras planas que se observan sirven para asegurar el movimiento cicloidal de ambas ruedas. Casi al final de la flecha se puede observar un rebaje, en el que va inserto un anillo de retención, el cual evita que los acoplamientos se salgan de la flecha de entrada.

Por otra parte, la zona con el segundo diámetro es donde se ensamblan los rodamientos a la flecha. En la cuerda que se observa en la flecha se ensambla una tuerca, con la finalidad de fijar la flecha al porta-baleros, y así evitar movimientos longitudinales.

Finalmente, la zona con el diámetro menor, al igual que en una flecha de un reductor común, sirve para acoplarse a un motor, por lo que tiene maquinado su respectivo cuñero.

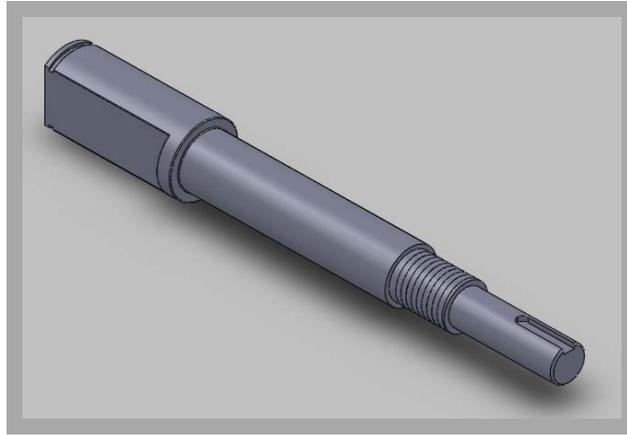


Figura 15. Flecha de entrada.

- **Salida del Reductor.**

La salida del reductor es a su vez un ensamble de tres elementos: la flecha, el plato y 6 pernos (Figura 16).

La flecha de salida está fabricada en barra redonda de acero rolado en frío. El diámetro mayor sirve para acoplarla al plato, el siguiente diámetro corresponde al diámetro interior de los rodamientos; en la cuerda se ensambla una tuerca para evitar movimiento axial, y finalmente en el diámetro menor se observa el cuñero para transmitir el par de salida.

El plato está fabricado en acero al carbono, y básicamente su función es de unión entre la flecha de salida y los pernos, por lo que en su geometría se observan los seis barrenos pasados para alojar los respectivos pernos, y su barreno central donde se fija la flecha.

Los pernos de la salida, fabricados en acero endurecido, permiten filtrar el movimiento cicloidal de la rueda móvil para convertirlo en un movimiento circular. Dichos pernos llevan rodamiento de agujas, los cuales están

siempre en contacto con la superficie interior de los barrenos del engrane móvil.

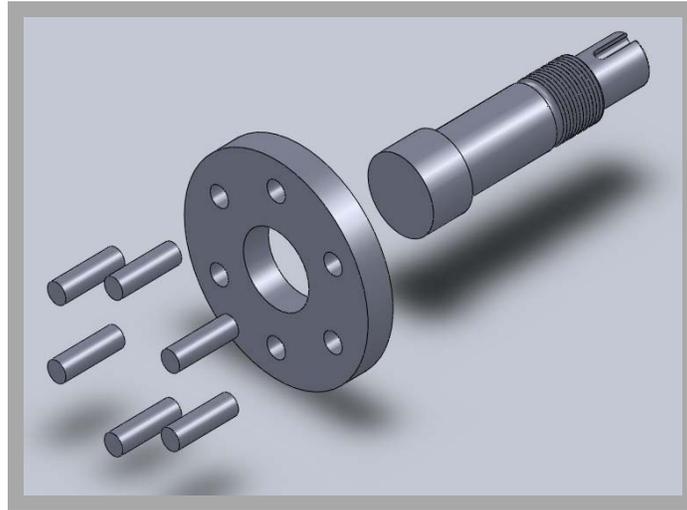


Figura 16. Vista explosiva de la salida del reductor

- **Porta-baleros de Salida**

El porta-baleros de salida cumple las mismas funciones que el porta-baleros de entrada, pero obviamente para la flecha de salida que es de mayor diámetro que la de entrada. Los materiales con los que está fabricado son los mismos que los empleados para el porta-baleros de entrada, es decir solera de acero al carbono y barra redonda de acero rolado en frío (Figura 17).

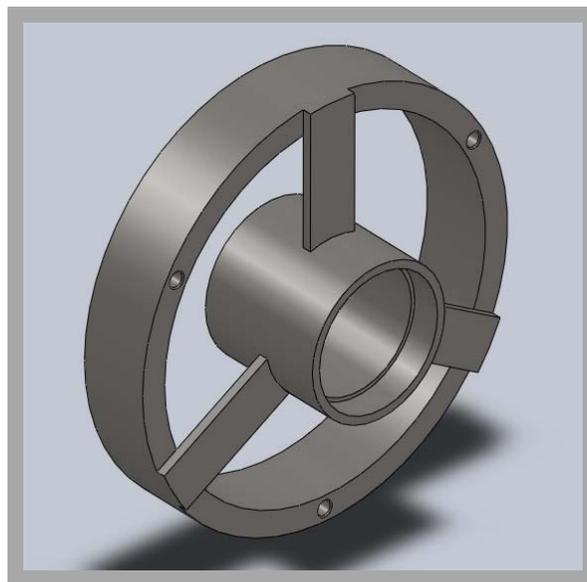


Figura 17. Porta-baleros de Salida.

2.2 Manufactura

La manufactura de las piezas de los subconjuntos y de cada uno de los componentes en general fue planeada cuidadosamente. A continuación se describen los procesos y las secuencias de manufactura de cada uno de los elementos del reductor, así como el proceso de ensamble final.

- Soporte o Estator.

Puesto que el soporte se compone de dos piezas, se describe a continuación el proceso de fabricación de ambos elementos, así como su proceso de ensamble.

Primero se fabricó el anillo de la rueda fija, el cual se aproximó a sus dimensiones en una primera operación mediante corte por chorro de agua o Water Jet; posteriormente se torneó para obtener su diámetro exterior definitivo, y finalmente se le realizaron los barrenos para los imanes (Figura 18). Cabe mencionar que no se maquinó el diámetro interior a su dimensión final con el propósito de poder realizar todos los barrenos sin deformar el anillo.



Figura 18. Fabricación del anillo del engrane fijo.

Para la fabricación del soporte, primero se realizó una aproximación a su geometría y dimensiones por medio de corte por chorro de agua (Figura 19). Esta primera aproximación se llevó a cabo con esta tecnología que resulta

adecuada para cortes aproximados en una placa de 2.5 pulgadas de espesor, ya que con otra tecnología hubiera requerido mayor tiempo y uso de herramientas de corte. El corte por chorro de agua requirió de solamente una hora con 52 minutos.



Figura 19. Fabricación del soporte por corte con chorro de agua.

Una vez obtenida la primera aproximación del soporte, se maquinó el diámetro interior de esta pieza en una fresadora CNC (Figura 20), para posteriormente colocarle su respectivo anillo de acero inoxidable. Para realizar este ensamble, el cual es de interferencia, se enfrió previamente el anillo para contraerlo y poder insertarlo fácilmente en el soporte sin mover éste de la fresadora CNC con el fin de mantener centrado el ensamble. Teniendo el anillo fijo en el soporte se procedió a maquinar el diámetro interior del mismo hasta alcanzar su dimensión final, y posteriormente se insertaron los imanes fijándolos con pegamento industrial. Por último, se maquinó la superficie exterior del soporte y las cajas para los porta-baleros.



Figura 20. Fabricación en CNC del soporte.

- Engrane móvil.

La fabricación del engrane móvil también requirió de más de un proceso de y de una planeación de cada una de sus piezas, así como de su ensamble. Se fabricó primero el anillo siguiendo el mismo procedimiento que se empleó para el anillo fijo, pero en este caso se maquinó su diámetro interior final y el exterior se dejó aproximado (Figura 21).



Figura 21. Anillo móvil.

El centro del engrane móvil también se aproximó primero por corte con chorro de agua (Figura 22), posteriormente se maquinó en un centro de maquinado CNC para lograr sus dimensiones finales, y sin desmontar la pieza de dicho centro de maquinado, se procedió a realizar el ensamble; para ello se calentó el anillo para expandirlo y así lograr un ensamble de interferencia una vez que se enfriara el mismo. Con el anillo en su posición, se maquinó su diámetro exterior y finalmente se insertaron sus imanes y se fijaron.

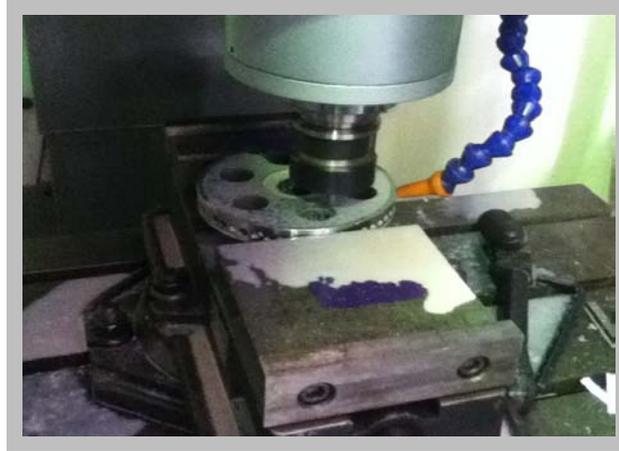


Figura 22. Corte con chorro de agua del centro del engrane móvil.

- **Acoplamientos**

Los procesos de fabricación que requirieron los acoplamientos fueron solo torneado y maquinado CNC. En el torno se dieron las medidas de los diámetros y en la fresa la de los ojales.

- **Rueda de Balanceo**

La rueda de balanceo, al igual que otras piezas, fue aproximada primero por corte con chorro de agua; en este caso sólo se aproximó su diámetro exterior, por lo que se obtuvo un tejo que posteriormente se vació y torneo para obtener sus diferentes diámetros (Figura 23). Finalmente se paso la pieza a la fresa de control numérico donde se realizaron los cortes necesarios para lograr la geometría previamente diseñada.



Figura 23. Fabricación de la rueda de balanceo.

- **Porta-baleros de Entrada**

Para el porta-baleros de entrada, primero se roló una solera (Figura 24), la cual, por su espesor y para lograr una adecuada fabricación, se calentó previamente antes de rolarla. Posteriormente se realizó un chaflán en sus extremos para lograr una adecuada unión con soldadura.



Figura 24. Solera rolada para fabricar el porta-baleros de entrada.

El segundo paso fue aproximar los diámetros interiores del centro del porta-baleros en el torno; se realizó sólo una aproximación, ya que, posteriormente se tornearía el conjunto completo.

Posteriormente se cortaron y soldaron los rayos al anillo, se soldó el centro en su posición, y se intentó tornear el conjunto completo, sin embargo al tratar de maquinar el ensamble, el centro vibraba demasiado y era complicado asegurar la concentricidad entre las piezas, por lo que se optó por colocar una placa circular a modo de tapa en el anillo para darle mayor soporte al centro y evitar las vibraciones al momento de tornear el conjunto.

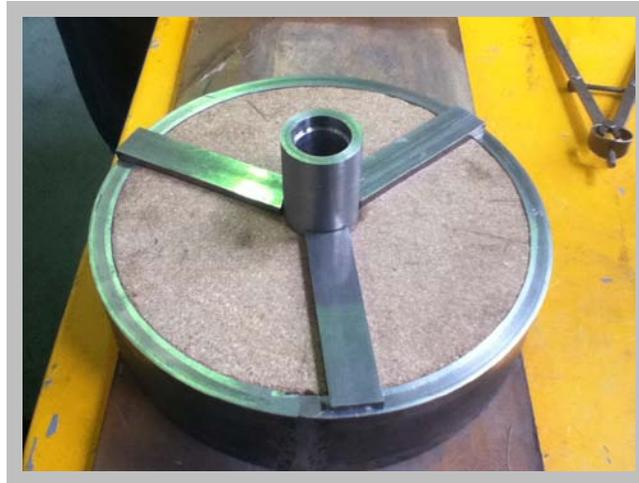


Figura 25. Porta-baleros de entrada con rayos.

Finalmente, se optó por realizar una serie de barrenos con un cortador circular con el fin de reducir peso y poder observar al interior del reductor. Los barrenos realizados fueron 5 de 3 pulgadas de diámetro, por lo que el conjunto quedó como se muestra en la figura 26.



Figura 26. Porta-baleros de entrada final.

- Flecha de entrada

La fabricación de la flecha de entrada sólo requirió de dos procesos de manufactura: torneado y fresado. Con el torno se realizaron los diferentes diámetros así como la cuerda, y con la fresa se fabricaron tanto las superficies planas como el cuñero (Figura 27).



Figura 27. Maquinado de la flecha de entrada.

- **Porta-baleros de Salida**

Para el porta-baleros de salida se realizaron los mismos procedimientos y maquinados que para el porta-baleros de entrada, es decir se roló y soldó una solera, se le soldaron sus respectivos rayos y su centro, el cual se había torneado previamente para aproximar su diámetro interior. Finalmente, se torneó todo el conjunto con la misma finalidad de asegurar colinealidad entre los centros de las piezas (Figura 28). En este caso no se tuvo el problema de la vibración que se presentó en el porta-baleros de entrada, ya que el centro es de mayor diámetro y sobresale menos del anillo, por lo que tiene mayor soporte y menor brazo de palanca.



Figura 28. Fabricación del porta-baleros de salida.

- **Conjunto de Salida**

El conjunto de salida, al igual que otros elementos del reductor, está compuesto por más de una pieza, por lo que también requirió de sub-procesos de ensamble y de varios procesos de manufactura. La primera pieza que se fabricó fue la flecha de salida, la cual se manufacturó básicamente con torno (Figura 29), y sólo se requirió del proceso de fresa para realizar su cuñero.



Figura 29. Flecha de salida.

El plato de la flecha de salida se aproximó primero por corte con chorro de agua (Figura 30), tanto en su diámetro exterior como en sus barrenos, posteriormente se torneó su diámetro exterior, así como el barreno para la flecha, cuidando las tolerancias, ya que la flecha ensambla a presión. A continuación se montó el plato en la fresadora CNC, para lo cual se fabricó un cilindro que ayudara a montar en forma centrada el plato, y se maquinaron los barrenos para los pernos a su diámetro final de 14 mm.



Figura 30. Fabricación del plato de la flecha de entrada.

Los pernos se fabricaron de una barra de acero endurecido que se utiliza normalmente como botador en un troquel, y cuyo diámetro era el requerido. Así, sólo se tuvieron que cortar los pernos a la longitud especificada y carear sus extremos. Finalmente, se realizó el ensamble de todas las piezas, las cuales entraron a presión en sus respectivos barrenos, mediante el uso de una prensa hidráulica (fig. 31).



Figura 31. Ensamble de las diferentes piezas del conjunto de salida.

Una vez fabricadas todas las piezas y ensamblados los subconjuntos, se procedió al ensamble final de todo el reductor. Dicho ensamble fue sencillo debido al diseño del reductor, y no requirió de ninguna herramienta especial o sistema de

alineación, simplemente se ensamblaron las piezas y subconjuntos en el orden preestablecido, y se colocaron tuercas, tornillos y el anillo de seguridad. El ensamble del reductor se puede observar en una vista frontal en la figura 32 (a), y en una vista posterior en la figura 32 (b).



(a)



(b)

Figura 32(a). Vista frontal. (b) Vista posterior del reductor de velocidad final.

PRUEBAS Y RESULTADOS



Para conocer el desempeño del reductor y poder caracterizarlo se realizaron diversas pruebas, las cuales fueron, desde pruebas muy simples para caracterizar los imanes, hasta pruebas más complejas para caracterizar el reductor en su totalidad. Las pruebas realizadas a los imanes fueron necesarias, ya que si bien se conocía su campo magnético, era necesario conocer la fuerza que podrían proporcionar. De igual forma se realizaron algunas simulaciones para prever el desempeño del reductor, así como sus posibles fallas.

3.1 Pruebas a los imanes.

Las pruebas realizadas a los imanes fueron para conocer, tanto la fuerza de separación longitudinal, como la tangencial entre dos imanes, ya que en función de estas fuerzas dependería el par máximo que se podría transmitir con el reductor.

Si bien conociendo la intensidad del campo magnético (B), la permeabilidad magnética del material (μ) y del vacío (μ_0), así como el área de los imanes (A) se podría calcular la fuerza de separación longitudinal entre dos imanes aplicando la siguiente ecuación:

$$F = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu} AB^2 \quad [6]$$

En la cual sustituyendo los valores de los imanes utilizados para el reductor, se obtiene:

$$F = \frac{1}{(4\pi \cdot 10^{-7})(1.05)} (\pi \cdot r^2)(1.17)^2$$

$$F = \frac{(0.003^2)(1.17)^2}{(4 \cdot 10^{-7})(1.05)}$$

$$F = 29.33 \quad [N]$$

Se optó también por obtener dicha fuerza experimentalmente para comprobar el resultado anterior. Para ello, Jesús Omar Sánchez y Jonathan Arenas, colaboradores del proyecto, diseñaron un mecanismo muy sencillo [11], el cual consiste en una viga apoyada en un extremo en una celda de carga y con un apoyo simple en el otro. Dicha barra tiene embebido un imán en un punto

intermedio, el cual está alineado con otro imán incrustado en la punta de un tornillo que al hacerse girar varia la separación entre los dos imanes, y por lo tanto la fuerza de atracción, la cual puede determinarse en función de la reacción generada en la celda de carga (Fig. 33). Una vez realizadas las pruebas, se llegó a la conclusión de que la fuerza longitudinal de atracción máxima entre dos imanes es de 10.78 [N] valor diferente al calculado con la expresión anterior.

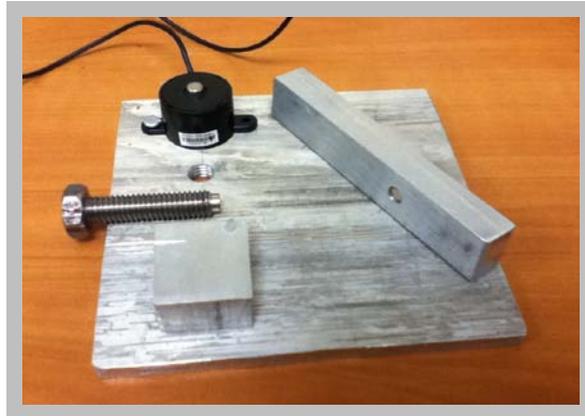


Figura 33. Dispositivo para medir la fuerza longitudinal entre un par de imanes.

Para poder medir la fuerza tangencial se utilizó otro dispositivo [11], el cual como se puede observar en el diagrama de la figura 34(a), consta de una estructura fija y un cuerpo central móvil. La estructura fija tiene en cada lado 3 imanes con polaridades alternadas, al igual que el cuerpo móvil, de modo tal que al desplazar verticalmente este último, se genera una fuerza tangencial en las 6 caras en contacto. Para conocer la fuerza de separación tangencial entre un par de imanes se fueron colgando pequeñas masas a la pieza móvil (figura 34(b)), y el desplazamiento generado se midió con linternas de calibración. Finalmente se concluyó que la fuerza tangencial máxima ofrecida por cada par de imanes es de 3.92 [N] que ocurre con un desplazamiento de 2.3 [mm]

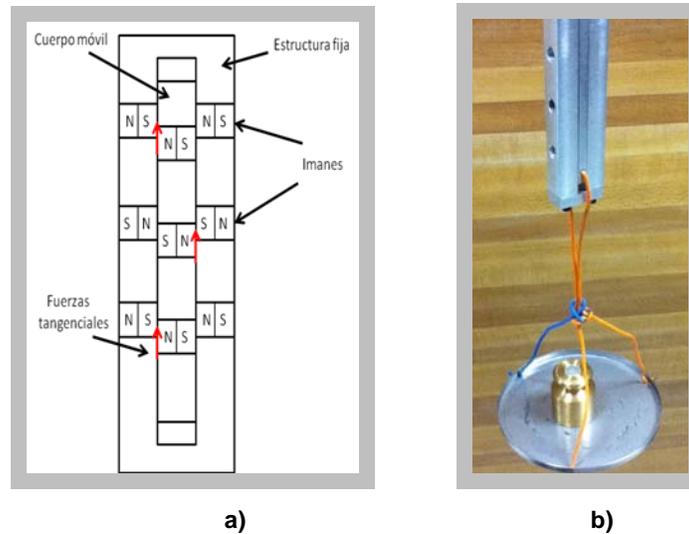


Figura 34. Dispositivo para medir la fuerza tangencial.

3.2 Análisis Estático del Reductor.

Una vez conocidas las fuerzas proporcionadas por cada par de imanes y teniendo como una aproximación que 9 imanes se mantendrían en contacto prácticamente todo el tiempo, se realizó un análisis estático del reductor para calcular el par máximo que sería capaz de entregar.

Para dicho análisis se realizaron los diagramas de cuerpo libre de cada elemento pertinente del reductor en una posición determinada (figura 35), y se plantearon las ecuaciones de equilibrio correspondientes.

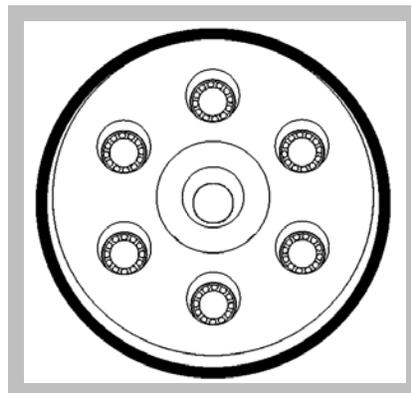


Figura 35. Posición del engrane móvil para el análisis estático.

El primer elemento a analizar es el acople, el cual presenta una reacción debida a la flecha de entrada (R_f) y una reacción del rodamiento (R_r), quedando su diagrama de cuerpo libre como se muestra en la figura 37.

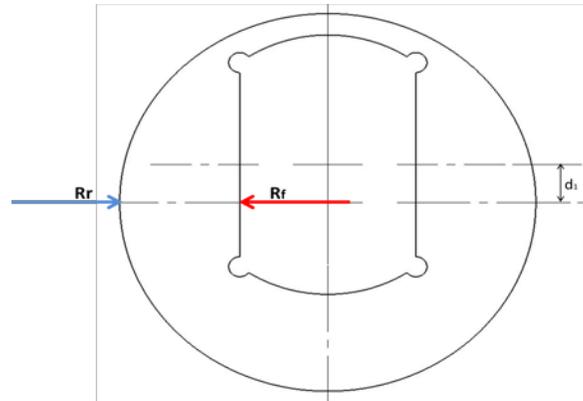


Figura 36. Diagrama de cuerpo libre del acople.

De la figura anterior podemos hacer suma de fuerzas en el eje x para determinar la reacción en el rodamiento (R_r).

$$\sum F_x = 0$$

$$R_r - R_c = 0$$

$$R_r = R_c \dots (1)$$

A continuación analizamos el Rodamiento, el cual se encuentra bajo los efectos de la reacción en el acople (R_r) y la reacción debida al engrane móvil (R_e).

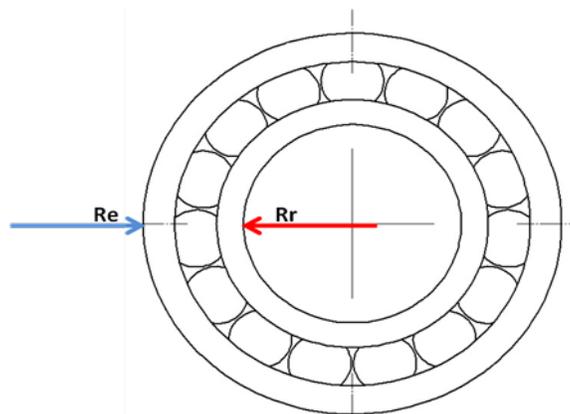


Figura 37. Diagrama de cuerpo libre del rodamiento.

Del diagrama de cuerpo libre anterior, igualmente calculamos la suma de fuerzas en el eje x obteniendo:

$$\sum F_x = 0$$

$$R_e - R_r = 0$$

$$R_e = R_r \dots (2)$$

Finalmente analizamos el diagrama de cuerpo libre del engrane móvil, el cual se ve afectado por la fuerza magnética tangencial de los imanes (F_{mt}), la fuerza de fricción (F_f), La reacción en el rodamiento (R_r), la reacción en el engrane fijo (R_{ef}), la fuerza magnética normal de los imanes (F_{mn}) y la reacción en los pernos (R_{p1} y R_{p2}).

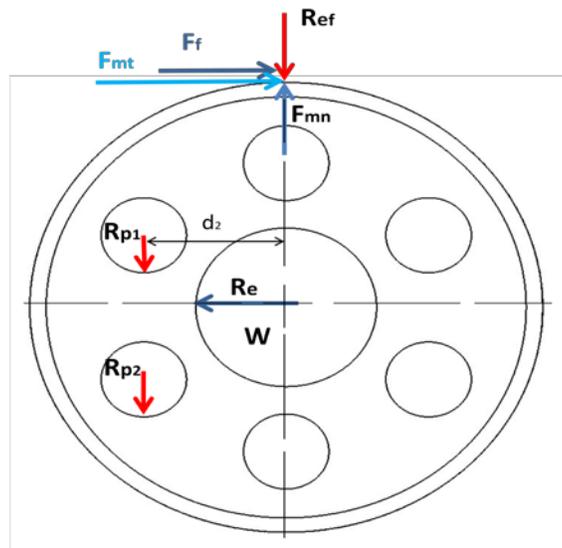


Figura 38. Diagrama de cuerpo libre del engrane móvil

Como se puede observar en el diagrama de cuerpo libre anterior, si bien los seis pernos de la flecha de salida están en contacto con el engrane móvil, solo los dos del lado izquierdo (R_{p1} y R_{p2}) generan reacciones en el instante analizado.

Del diagrama del engrane móvil podemos calcular suma de fuerzas en el eje X, suma de fuerzas en el eje Y, y suma de momentos respecto al centro. Considerando que las dos reacciones en los pernos deben ser iguales y que en el momento analizado ambas fuerzas se encuentran a la misma distancia (d_2) del

centro, se puede simplificar las reacciones en los pernos como una sola reacción (R_p), quedando las ecuaciones estáticas de la siguiente manera.

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{mt} + F_f - R_e = 0 \dots (3)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{mn} - R_{ef} - R_p = 0 \dots (4)$$

$$\sum M_b = 0$$

$$(F_{mt} + F_f) * r - (R_p) * d_2 = 0 \dots (5)$$

De la ecuación 5 despejamos la reacción en el engrane fijo (R_{ef}) como se muestra a continuación:

$$R_{ef} = F_{mn} - R_p$$

Por otra parte se sabe que la fuerza de fricción (F_f) es igual al coeficiente de fricción estático (μ_s) por la normal, por lo que considerando el resultado anterior podemos determinar la fuerza de fricción como:

$$F_f = \mu_s R_{ef}$$

$$F_f = \mu_s (F_{mn} - R_p) \dots (6)$$

Sustituyendo el resultado anterior en la ecuación 6, nos queda la reacción en los pernos (R_p) en función de la fuerza magnética tangencial (F_{mt}) y de la fuerza magnética normal (F_{mn}), como se muestra a continuación:

$$[F_{mt} + \mu_s (F_{mn} - R_p)] * r - (R_p) * d_2 = 0$$

$$F_{mt} * r + (\mu_s * F_{mn} - \mu_s * R_p) * r - (R_p) * d_2 = 0$$

$$F_{mt} * r + r * \mu_s * F_{mn} - \mu_s * R_p * r - (R_p) * d_2 = 0$$

$$R_p * r * \mu_s + R_p * d_2 = F_{mt} * r + r * \mu_s * F_{mn}$$

$$R_p * (r * \mu_s + d_2) = F_{mt} * r + r * \mu_s * F_{mn}$$

$$R_p = \frac{F_{mt} * r + F_{mn} * r * \mu_s}{(r * \mu_s + d_2)} \dots (7)$$

Donde d_2 es la distancia del centro del engrane móvil al centro del perno, y r es el radio del engrane móvil.

Considerando que 9 pares de imanes están en contacto todo el tiempo y sabiendo que la fuerza magnética normal de un par de imanes es de 10.78 [N] y la tangencial de 3.92 [N], tenemos que F_{mn} es igual a 97.02 [N] y F_{mt} de 35.28 [N].

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 7, considerando un coeficiente de fricción de 0.25, y sabiendo que $d_2 = 0.043$ [m] y $r = 0.078$ [m] para este caso, obtenemos R_p :

$$R_p = \frac{35.28 * 0.078 + 97.02 * 0.078 * 0.25}{(0.078 * 0.25 + 0.043)}$$

$$R_p = 74.3 [N]$$

Sustituyendo el resultado anterior en la ecuación 6 podemos obtener la fuerza de fricción (F_f) como se muestra a continuación

$$F_f = 0.25(97.02 - 74.3)$$

$$F_f = 5.68 [N]$$

Sustituyendo el resultado anterior en la ecuación 3 obtenemos la reacción en el engrane móvil (R_e).

$$R_e = F_{mt} + F_f$$

$$R_e = 35.28 + 5.68$$

$$R_e = 40.96$$

Considerando las ecuaciones 1,2 y considerando que la reacción debido a la flecha (R_f) es igual al par de entrada entre la distancia (d_1) podemos decir que

$$R_e = \frac{M_e}{d_1}$$

Donde d_1 es la distancia entre el centro de engrane móvil y el engrane fijo, que en este caso es de 0.003 [m], por lo que sustituyendo este valor en la ecuación anterior podemos obtener el par máximo de entrada (M_e):

$$M_e = R_e * d_1$$

$$M_e = 40.96 * 0.003$$

$$M_e = 0.123 [N \cdot m]$$

El par de salida máximo lo podemos calcular sabiendo que la relación de reducción del reductor es de 1:26, por lo que el par de salida máximo (M_s) será de:

$$M_s = M_e * 26$$

$$M_s = 0.123 * 26$$

$$M_s = 3.198 [N \cdot m]$$

De igual forma podemos calcular el par de salida sabiendo que es igual a la fuerza en los pernos (R_p) multiplicada por el radio al cual se encuentran ubicados (r_2), es decir:

$$M_s = R_p * r_2$$

$$M_s = 74.3 * 0.043$$

$$M_s = 3.195 [N \cdot m]$$

3.3 Diseño de las pruebas

Para poder caracterizar el reductor y conocer su desempeño se tiene planeado realizar una serie de experimentos con un banco de pruebas, el cual está compuesto por un motor de entrada, un dinamómetro e instrumentación necesaria para medir el par de entrada y salida.

El motor de entrada es un motor de corriente directa, lo cual permite variar su velocidad fácilmente al variar el voltaje de alimentación. Este motor tiene su estator montado en un par de rodamientos, los cuales a su vez están fijos a una estructura (figura 40). Esta configuración permite que el estator pueda girar libremente en cierto rango pequeño, y gracias a esto se puede medir el par que entrega a la entrada incorporando una barra a modo de brazo y utilizando una celda de carga para restringirla.



Figura 39. Motor de entrada.

El dinamómetro que se empleará pertenece al laboratorio de Electromecánica del Instituto de Ingeniería, y se ha utilizado para caracterizar motores, reductores y otros equipos similares. Dicho dinamómetro se encuentra instrumentado y con un cople de estrella en su eje, por lo que no requiere ninguna adaptación para su utilización.



Figura 40. Dinamómetro.

La instrumentación necesaria para medir el par de entrada consiste básicamente en una celda de carga, y la electrónica necesaria para acondicionar la señal entregada por la celda y poderla registrar en una computadora. Dicha celda de carga tiene una capacidad máxima de 100 [lbf], y su caracterización y pruebas fueron realizadas como parte de una tesis de licenciatura [11].



Figura 41. Celda de carga.

Para poder conectar el reductor tanto al motor de entrada como al dinamómetro se utilizarán acoples de estrella, por la ventaja que estos ofrecen y porque tanto el dinamómetro como el motor de entrada ya cuentan con dicho acople en sus flechas.

CONCLUSIONES

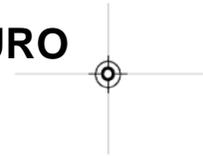


Después de realizar el desarrollo del reductor, las pruebas a los imanes y el análisis estático del mismo, se puede concluir que si bien el reductor no proporciona el par de salida que se esperaba, el reductor trabaja adecuadamente de acuerdo a su principio de funcionamiento; el par de salida tan reducido se debe al bajo campo magnético que ofrecen los imanes, ya que por los datos ofrecidos por el fabricante se esperaba tener una fuerza de atracción mayor entre ellos, y por ende un par de salida superior al obtenido; sin embargo esto sólo se comprobará a futuro una vez que se realicen las pruebas físicas del reductor. Cabe señalar que la finalidad de este trabajo era demostrar el principio de funcionamiento del reductor, por lo que no se intentó obtener la mayor capacidad posible; sin embargo con la utilización de imanes de mayor tamaño y/o varias hileras de imanes en cada engrane, se hubiera podido obtener un mayor par de salida.

Una vez realizado este trabajo, se puede llegar a la conclusión que se cumplieron con los objetivos de la tesis, ya que se diseñó y construyó un reductor de velocidad cicloidal magnético balanceado, se documentó su desarrollo y se solicitaron dos patentes en México [12] y se prepara una solicitud de patente en Estados Unidos. De igual forma se cumplió con los objetivos particulares de este trabajo, los cuales eran realizar los planos necesarios para el desarrollo del reductor, supervisar la fabricación del mismo y participar en las pruebas necesarias para su caracterización. Si bien es cierto que no se logró realizar las pruebas necesarias para caracterizarlo, se obtuvo un gran avance en la planeación de las mismas y se tiene una idea de los resultados que se pueden esperar una vez que se realicen.

Por otra parte la realización de este trabajo contribuyó de manera importante a la formación profesional, no sólo de quien escribe el presente trabajo, sino de todos aquéllos que participaron en él; y del desarrollo del reductor se derivaron dos tesis, una de licenciatura [11] y la presente de maestría; por lo que se cumple uno de los objetivos primordiales de este proyecto, que fue formar recursos humanos.

TRABAJO A FUTURO



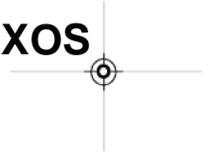
Como se mencionó anteriormente, quedan pendientes algunas pruebas dinámicas para caracterizar adecuadamente el reductor. De dichas pruebas probablemente se deriven algunas mejoras al diseño del reductor para optimizar su desempeño, las cuales se realizarán o no en función de la complejidad de éstas y de las ventajas que ofrezcan.

De igual forma, parte del trabajo a futuro será encontrar aplicaciones adecuadas para el reductor, y ponerlo a prueba en un ambiente industrial o en una aplicación que lo someta a condiciones de trabajo más extremas. Una posible aplicación para el reductor podría ser en generadores eólicos, aunque en ese caso se usaría como amplificador de velocidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Chicurel, R., & Vázquez, L. (2012). *Patente n° MX/a/2012/001596*. México.
- [2] Frank T. Jørgensen, T. O. (2008). The Cycloid Permanent Magnetic Gear. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* , 1659-1665.
- [3] Furlani, E. P. (1997). A Two-Dimensional Analysis for the Coupling of Magnetic Gears. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS* , 2317-2321.
- [4] Gareth P Hatch, P. (2010). Recent Developments In Permanent Magnet Gear Systems & Machines. *The Magnetics 2010 Conference*, (págs. 2-30). Florida, USA.
- [5] Geartech. (2001). Gear and Gear Drives. *Motion System Design* , 145-168.
- [6] GmbH, W. (2008). *Supermagnete*. Recuperado el 20 de agosto de 2012, de <http://www.supermagnete.de/magnetismus/magnetkraefte>
- [7] Heller, W. H. (1995). *Patente n° 5,401,220*. U.S.A.
- [8] Peter Omand Rasmussen, T. O. (2005). Development of a High-Performance Magnetic Gear. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS* , 764-770.
- [9] Piovan, D. I. (2005). Trenes de Engranajes, Reductores Planetarios y Diferenciales. En D. I. Piovan, *Elementos de Máquinas* (pág. 150). Buenos Aires-Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
- [10] Pitchford, E. T. (1983). *Patente n° 4,379,976*. U.S.A.
- [11] Sánchez, O. (2012). Pruebas para Evaluar un Reductor Cicloidal de Engranés Magnéticos. México, D.F.
- [12] Sang-Hyun Park, B. (Diciembre de 2005). FUNDAMENTAL DEVELOPMENT OF HYPOCYCLOIDAL GEAR TRANSMISSIONS. Austin-Texas, USA.

ANEXOS



Los planos y demás documentos relacionados con el desarrollo de este proyecto son confidenciales y propiedad del Dr. Ricardo Chicurel Uziel. Para su consulta favor de ponerse e contacto con él (rchicurel@gmail.com).