



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PRUEBAS PARA EVALUAR UN  
REDUCTOR CICLOIDAL DE ENGRANES  
MAGNÉTICOS**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A :

**Jesús Omar Sánchez Morfín**

DIRECTOR:

**Dr. Ricardo Chicurel Uziel**



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F. OCTUBRE 2013

# AGRADECIMIENTOS

## **A Dios:**

Por haberme dado la fortaleza y capacidad para conseguir este anhelado triunfo, por poner en mi camino a todas esas personas que han sido fundamentales para que crezca como persona, por la familia que me otorgó, por mostrarme siempre un camino de luz en etapas difíciles y por tantas bendiciones recibidas.

## **A mi madre:**

Por su amor, por estar día a día motivándome para alcanzar mis metas, por darme la oportunidad de formarme como ser humano, del que puede sentirse orgullosa. Por estar a mi lado en todo momento.

## **A mi padre:**

Por su impulso y apoyo incondicional, por el enorme esfuerzo y sacrificio que hizo por darme siempre más de lo necesario en la vida. Por ser mi mayor ejemplo de lucha y valor.

## **A mi hermano:**

Por estar siempre juntos en las buenas y en las malas, por regalarme parte de tu tiempo para convivir, aprender y divertirnos. Por ser mi mejor amigo. Te quiero hermano.

## **A mi amor, Denisse:**

Por creer en mí, por fortalecerme día a día con su cariño, por su tiempo y apoyo incondicional, por permitirme estar todos los días a su lado en este reto maravilloso que es la vida, por hacerme sentir que llena todo mi ser y porque se ha convertido en más que una motivación para seguir adelante.....ahora es mi TODO. Te amo mi princesa.

## **A mi director de tesis, Dr. Ricardo Chicurel Uziel:**

Por su paciencia, por la oportunidad de integrarme a este proyecto y por ayudarme a concluir este reto personal.

**Al Ing. Rodolfo Peters Lammel:**

Por ser tan buena persona conmigo, por brindarme su amistad y la oportunidad de aprender cosas nuevas. Mi más sincero aprecio, respeto y admiración.

**Al Ing. Jonathan Arenas:**

Por su excelente guía en el desarrollo de esta tesis, por el tiempo brindado y contribuir con sus ideas en este proyecto.

**A mis compañeros de carrera:**

Por su amistad y apoyo, brindados durante esta formación académica.

**A cada profesor**

Por compartir parte de sus conocimientos, por establecer en mí una parte del profesionista que esta universidad y el país exige.

**A la UNAM**

Por haber formado en mí no solo la mente, sino el espíritu, por todas las experiencias vividas y gratos recuerdos.

# SÍNTESIS

La presente tesis se realizó dentro de las instalaciones del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET) y del Instituto de Ingeniería (II) pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con el fin de diseñar y realizar las pruebas para evaluar el desempeño de un prototipo de reductor de velocidad cicloidal de engranes magnéticos (RVCEM).

Este trabajo aborda el diseño de diferentes tipos de pruebas que se aplicaron al RVCEM, así como un análisis para conocer el comportamiento de sus componentes principales antes y después de ser ensamblado. Se describen los pasos que se siguieron en cada una de las pruebas realizadas, desde el diseño de éstas, hasta su implementación al RVCEM.

Finalmente se realiza un análisis de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas, para conocer si el diseño propuesto funciona como se espera y dar un diagnóstico de lo que se puede mejorar del RVCEM para su óptimo desempeño.

# ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Fundamentos teóricos.....	4
2.1 El reductor de velocidad.....	5
2.2 El reductor de velocidad cicloidal de engranes magnéticos (RVCEM).....	5
3. Objetivo.....	9
4. Análisis dinámico.....	10
4.1 Especificaciones del engrane móvil y rueda de balanceo.....	11
4.2 Centro de masa del engrane móvil y rueda de balanceo.....	17
5. Determinación experimental de las características de los imanes.....	20
5.1 Medición de la fuerza de atracción tangencial entre los imanes.....	21
5.2 Calibración del sistema para medir la fuerza de atracción normal de los imanes....	25
5.3 Medición de la fuerza de atracción normal de los imanes.....	28
5.4 Análisis de fuerzas.....	36
6. Pruebas dinamométricas del reductor.....	40
6.1 Puntos a considerar antes de realizar las pruebas dinamométricas.....	41
6.2 Resultados de las pruebas dinamométricas.....	44
7. Conclusiones y mejoras.....	47
8. Referencias.....	50

# ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Reductor de velocidad a base de engranes .....	5
Fig. 2. Reductor Cicloidal CIATEQ (Juan Carlos Jáuregui).....	6
Fig. 3. Configuración de la rueda de balanceo y del engrane móvil en que sus fuerzas centrífugas se neutralizan porque actúan en sentidos opuestos.....	7
Fig. 4. Reductor de velocidad cicloidal de engranes magnéticos (RVCEM).....	8
Fig. 5. Dimensiones rueda de balanceo.....	12
Fig. 6. Dimensiones engrane móvil.....	14
Fig. 7. Rueda de balanceo.....	17
Fig. 8. Engrane móvil.....	18
Fig. 9. Posicionamiento del engrane móvil y de la rueda de balanceo para que coincidan sus centros de masa.....	19
Fig. 10 Reductor de velocidad cicloidal SUMITOMO.....	20
Fig. 11. Dispositivo para calcular la fuerza tangencial entre los imanes, con 6 superficies interfaciales magnéticas activas.....	22
Fig. 12. Montaje de las pruebas para determinar la fuerza de atracción tangencial entre los imanes.....	23
Fig. 13. Gráfica del desplazamiento del cuerpo móvil.....	25
Fig. 14. Gráfica fuerza de atracción tangencial máxima entre imanes.....	26
Fig. 15. Celda de carga de 25 libras fuerza.....	27
Fig. 16. Gráfica voltaje contra peso.....	27
Fig. 17. Circuito para probar las celdas de carga .....	28
Fig. 18. Calibración de las celdas de carga.....	29
Fig. 19. Dispositivo para calcular la fuerza de atracción normal de los imanes.....	30
Fig. 20. Montaje del experimento atracción normal de imanes.....	31
Fig. 21. Fuerza sobre la celda de carga (acercamiento y alejamiento).....	33
Fig. 22. Diagrama de cuerpo libre, experimento atracción normal de imanes.....	33
Fig. 23. Fuerza de atracción normal entre un par de imanes.....	34
Fig. 24. Posición del engrane móvil para la prueba de fuerza normal en la transmisión.....	36
Fig. 25. Ensamble esquemático del RVCEM.....	37
Fig. 26. Diagrama de cuerpo libre del engrane móvil, simplificado.....	38

Fig. 27. Fijación de los tornillos en la base.....	42
Fig. 28. Nivelación de la base.....	43
Fig. 29. Motor-dinamómetro para medir el par de entrada al RVCEM.....	44
Fig. 30. Calibración del dinamómetro de banco DYNAMATIC.....	45
Fig. 31. Acoplamiento del reductor de velocidad entre los dinamómetros.....	45
Fig. 32. Gráfica de la segunda prueba dinamométrica (eficiencia-par de salida).....	47

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del RVCEM.....	7
Tabla 2. Lista de materiales utilizados para el engrane móvil y rueda de balanceo.....	11
Tabla 3. Masa y volumen de la rueda de balanceo.....	13
Tabla 4. Masa y volumen del engrane móvil.....	15
Tabla 5. Peso de los rodamientos.....	16
Tabla 6. Fuerza centrífuga del engrane móvil.....	16
Tabla 7. Fuerza centrífuga de la rueda de balanceo.....	16
Tabla 8. Centro de masa de la rueda de balanceo.....	17
Tabla 9. Centro de masa del engrane móvil.....	19
Tabla 10. Desplazamiento transversal del cuerpo móvil con 6 interfases magnéticas activas.....	23
Tabla 11. Fuerza de atracción tangencial de los imanes.....	25
Tabla 12. Datos capturados de la prueba de atracción normal de los imanes.....	31
Tabla 13. Fuerza de atracción normal entre un par de imanes.....	34
Tabla 14. Fuerza de atracción normal de los imanes en la transmisión.....	35
Tabla 15. Primeras pruebas dinamométricas al RVCEM.....	45
Tabla 16. Segunda prueba dinamométrica al RVCEM.....	46
Tabla 17. Resultados de las fuerzas centrífugas.....	48
Tabla 18. Comparación del par de salida.....	50

# 1. INTRODUCCIÓN



El reductor de velocidad cicloidal de engranes magnéticos (RVCEM) que se sometió a las pruebas descritas en este trabajo para su evaluación, es un modelo propuesto por el Dr. Ricardo Chicurel Uziel (investigador del II), cuyo diseño contó con la colaboración del Ing. Luis Alberto Vázquez (estudiante de maestría), y el cual fue fabricado dentro de las instalaciones del II y del CECADET.

Los elementos principales del RVCEM fueron fabricados de acero rolado en frío y acero inoxidable austenítico, materiales debidamente seleccionados por sus características que se ajustan al diseño propuesto.

El acero rolado en frío se utilizó para la mayoría de las piezas, debido a que es un material de fácil manipulación y muy comercial. Mientras que el acero inoxidable se seleccionó por ser un material muy poco magnético, lo que permitió usarlo para los anillos donde van alojados los imanes.

Los engranes de contacto en esta configuración del RVCEM son anillos que tienen incrustados imanes cilíndricos colocados radialmente en su periferia con polaridades alternantes. El acero inoxidable del cual están hechos los anillos no distorsiona los campos magnéticos y permite que los imanes interactúen exclusivamente entre ellos. Este material que cuenta con alta resistencia mecánica es ideal para los anillos que están en contacto.

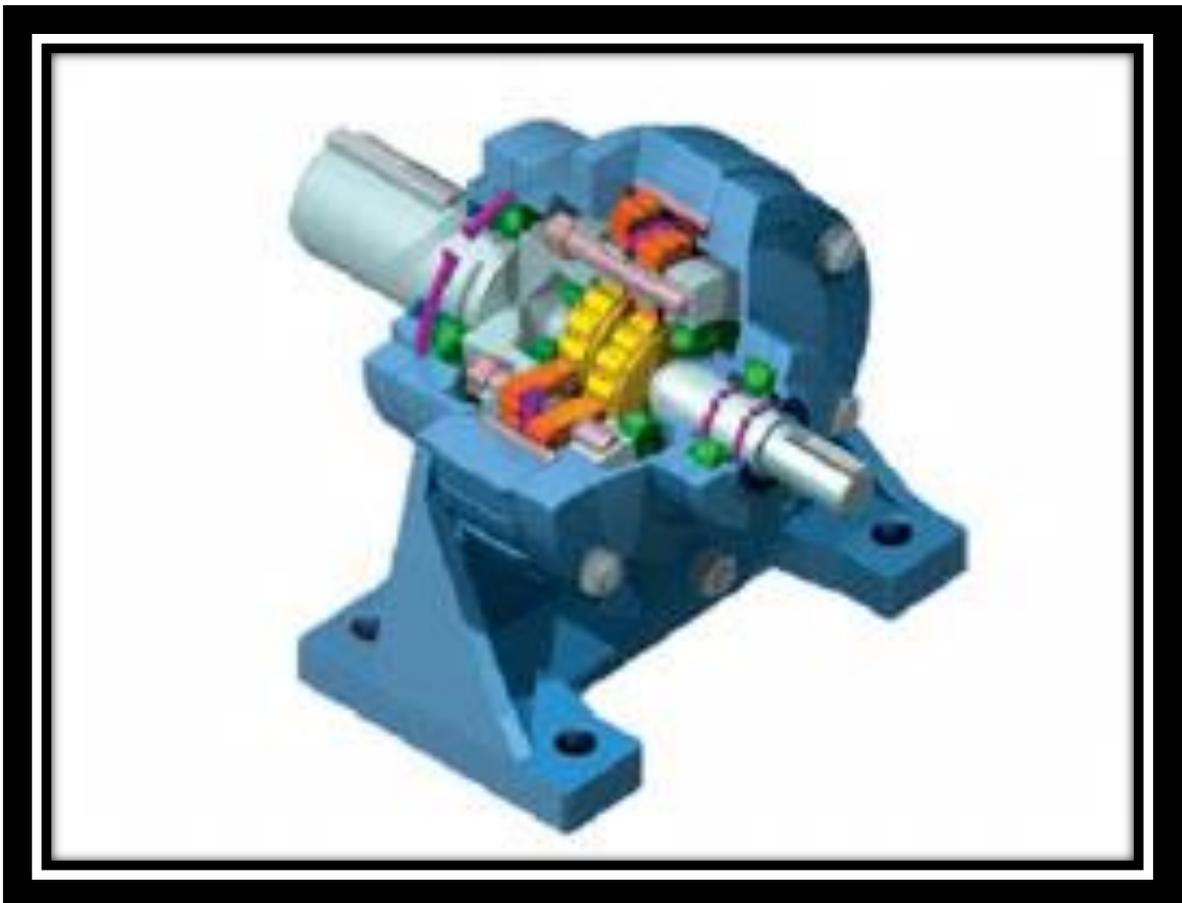
Al implementar una transmisión magnética se seleccionaron imanes permanentes de neodimio, ya que éstos, al realizar un trabajo equivalente al de los dientes de los engranes, pueden proporcionar la fuerza magnética necesaria para que el engrane móvil se apoye sobre el engrane fijo y ruede sobre él.

El diseño del RVCEM propuesto tiene que ser evaluado por diferentes tipos de pruebas, una vez conocido el material y sus dimensiones, para saber si este diseño de RVCEM funciona como se espera. Para cada prueba realizada resultó necesario idear, fabricar y acoplar varios dispositivos.

Las pruebas realizadas tuvieron como finalidad obtener algunos datos como, la fuerza tangencial y de atracción normal de los imanes, así como el par suministrado en la entrada y entregado a la salida del RVCEM, para posteriormente evaluar el reductor. Antes de proceder a la realización de cada una de las pruebas se calibraron todos los dispositivos utilizados.

Resulta necesario conocer, analizar y prever el comportamiento del RVCEM. Por ello fue de gran importancia realizar los análisis y experimentos descritos en este trabajo. En el primer capítulo se describirá el análisis del engrane móvil y la rueda de balanceo, para calcular los centros de masa y la fuerza centrífuga, apoyado en el material bibliográfico y conocimientos previos de la materia, mientras que en los capítulos siguientes se describirá la realización de las pruebas que se aplicaron tanto a los imanes como al reductor una vez ensamblado.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS



## **2.1 EL REDUCTOR DE VELOCIDAD.**

Casi podría decirse que los motores son como el “corazón de la industria”. Pero ese “corazón” tiene diferentes ritmos y funciona a distintas velocidades, dependiendo del uso que se le quiera dar. Por esto, los reductores de velocidad son indispensables en todas las industrias, tienen una amplia gama de aplicaciones y los podemos encontrar habitualmente en todo lugar donde haya un motor. Esto se debe a que generalmente no se utiliza la velocidad nominal de un motor, 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. Rara vez las máquinas funcionan de acuerdo con las velocidades que les ofrece el motor (eléctrico, combustión interna u otro) por ejemplo, a 1800, 1600 o 3600 revoluciones por minuto (rpm). La función de un reductor de velocidad es disminuir esta velocidad hasta adecuarla a los requerimientos de las máquinas (50, 60, 100 rpm).

## **2.2 EL REDUCTOR DE VELOCIDAD CICLOIDAL DE ENGRANES MAGNÉTICOS (RVCEM).**

Los reductores son diseñados a base de engranajes, mecanismos circulares y dentados con geometrías especiales de acuerdo con su tamaño y la función en cada motor, un ejemplo de éstos se muestra en la figura 1.



**Fig. 1. Reductor de velocidad a base de engranes.**

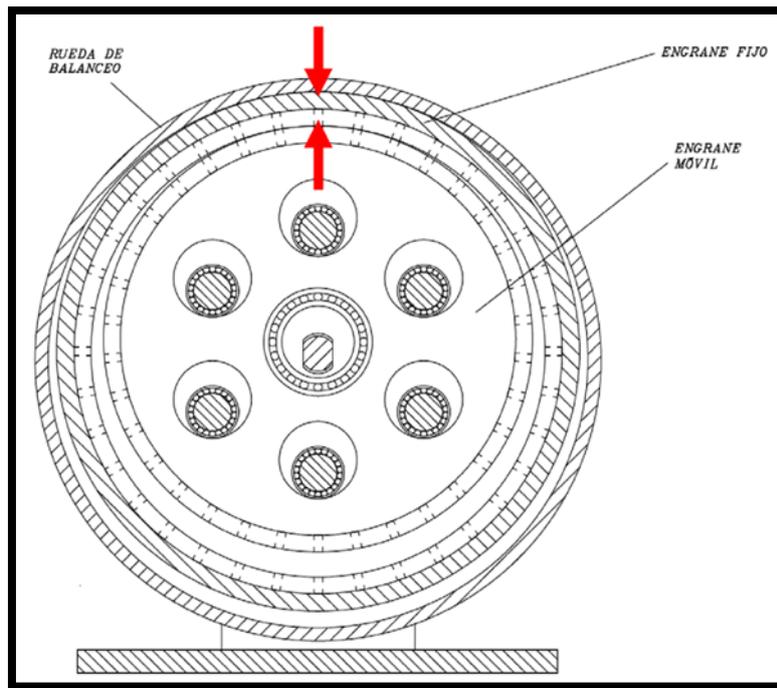
Un reductor de engranes cicloidal es una transmisión planetaria muy sencilla. La entrada de alta velocidad es una manivela que imparte un movimiento circular al eje de un engrane de dientes externos, que se suele llamar engrane de potencia. Este último enlaza con un engrane fijo de dientes internos, causando una rotación del primer engrane sobrepuesta a la translación circular como se muestra en la figura 2. La rotación se transmite a la flecha de salida, la cual es colineal con la de entrada, a través de un mecanismo simple, el cual consta de los pernos de salida, que filtran el movimiento de translación.



**Fig. 2. Reductor Cicloidal CIATEQ (Juan Carlos Jáuregui) [8].**

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 convencional, también llamado planocéntrico, 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 analiza 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, en la figura 3 se muestra la configuración de la posición del engrane móvil y la rueda de balanceo.



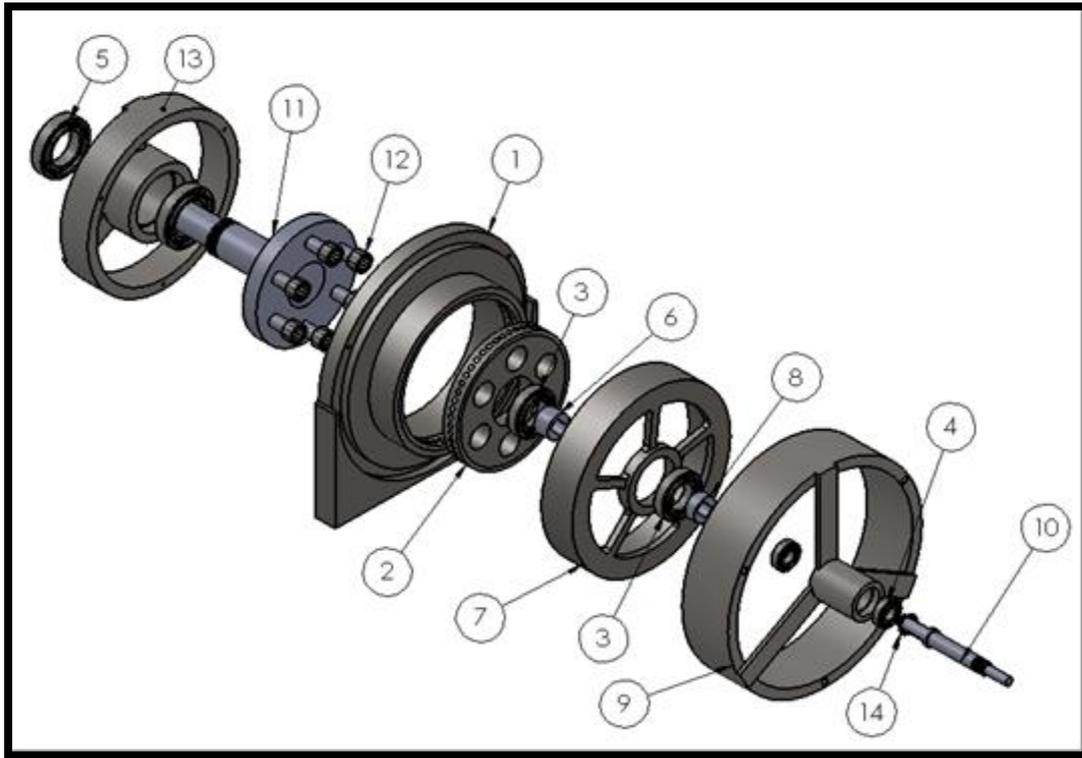
**Fig. 3. Configuración de la rueda de balanceo y del engrane móvil en que sus fuerzas centrífugas se neutralizan porque actúan en sentidos opuestos. [8].**

El arreglo presenta la ventaja de que los centros de masa del engrane móvil y de la rueda de balanceo están en un mismo plano.

En la tabla 1 se enlistan las piezas de las que está compuesto el RVCEM.

No. del elemento en la Fig. 4	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	Cople excéntrico 1	1
7	Rueda de Balanceo	1
8	Cople excéntrico 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. Componentes del RVCEM.**



**Fig. 4. Reductor de velocidad cicloidal de engranes magnéticos (RVCEM).**

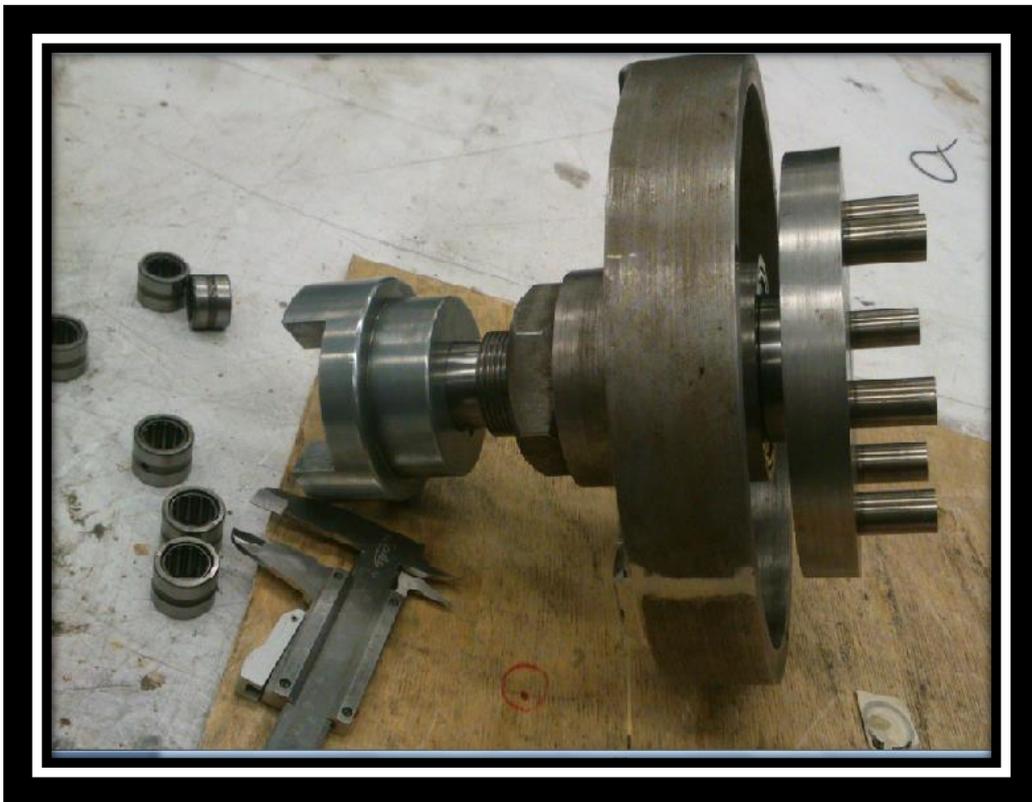
En el reductor presentado se obtienen tres ventajas significativas [1]: la capacidad de transmisión de fuerza por efecto magnético es mayor que en otros reductores magnéticos porque la separación entre polos activos se reduce a cero, se logra añadir capacidad por efecto de la fuerza de fricción adicional 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.

### 3. OBJETIVO



- Diseñar y realizar las pruebas necesarias para determinar la capacidad y eficiencia de un prototipo de reductor de velocidad cicloidal de engranes magnéticos para posteriormente dar un diagnóstico sobre su desempeño.

## 4. ANÁLISIS DINÁMICO



Esta parte comprende el análisis de algunos de los componentes del RVCEM. Se debe comprobar que los componentes del prototipo cumplen con las especificaciones del diseño propuesto del engrane móvil y la 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 debe ser aproximadamente el doble de la masa del engrane móvil.

De igual modo, la posición del centro de masa de la rueda de balanceo estaba restringida, de modo tal que en el ensamble, tanto el centro de masa del engrane móvil como el de la rueda de balanceo debían localizarse en el mismo plano transversal con respecto al soporte del sistema, todo esto para tener un balanceo perfecto y evitar vibraciones cuando el reductor esté funcionando.

#### 4.1 ESPECIFICACIONES DEL ENGRANE MÓVIL Y RUEDA DE BALANCEO.

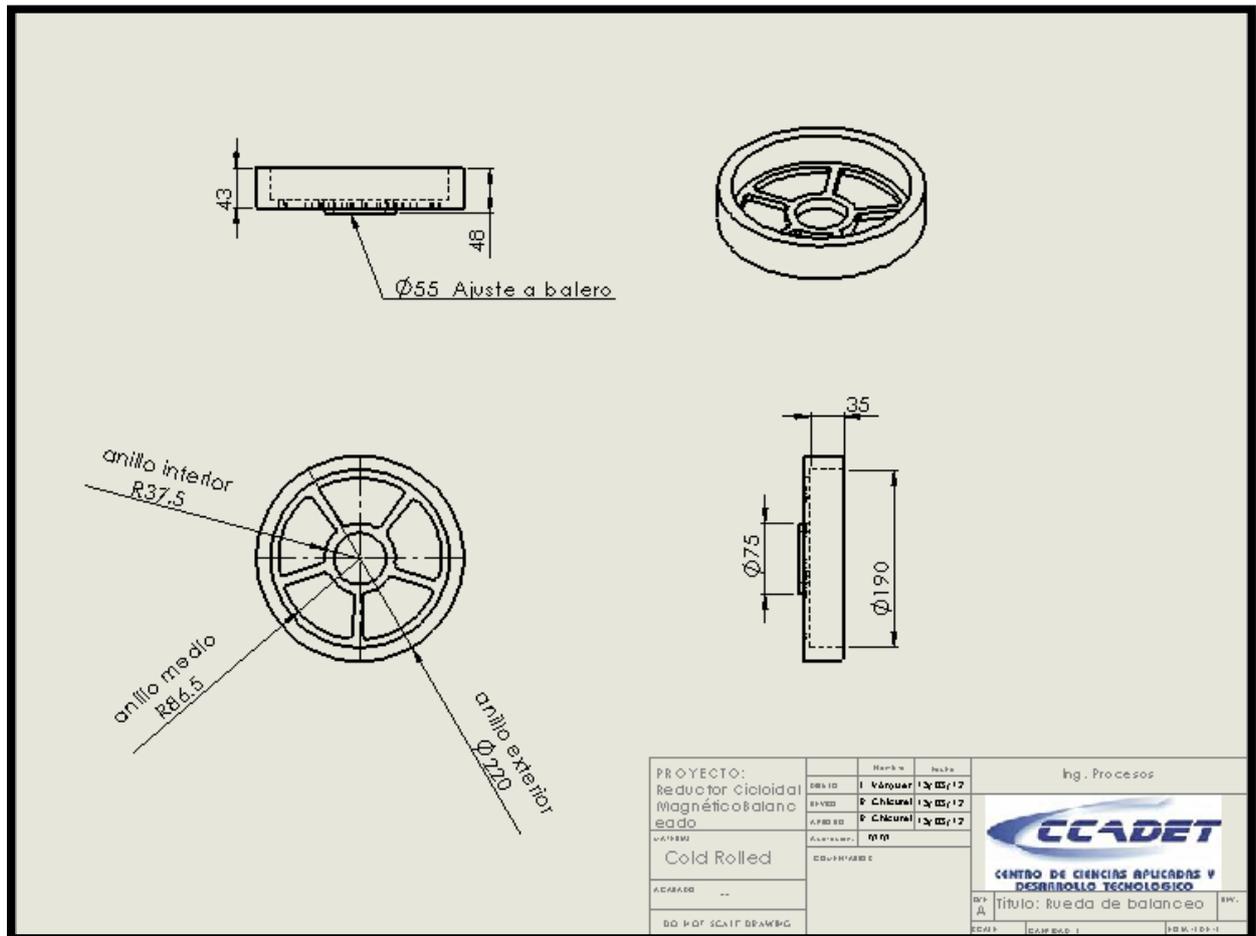
Una vez conocidas las dimensiones de ambas piezas y el material con el que se desean fabricar [2], se obtienen algunos datos para poder calcular el volumen y el peso que tendrán, para posteriormente calcular la fuerza centrífuga con respecto al eje de rotación. El cálculo de estas fuerzas centrífugas tiene que arrojar el mismo resultado, con la finalidad de que dichas fuerzas se cancelen para evitar el desbalanceo del sistema.

En la tabla 2 se enlistan los materiales que se utilizaron para la construcción del engrane móvil y la rueda de balanceo:

MATERIAL UTILIZADO	DENSIDAD
Acero inoxidable	$8.00 \frac{kg}{m^3}$
Acero rolado en frio	$7.85 \frac{kg}{m^3}$
Imanes de neodimio	$6.80 \frac{kg}{m^3}$

**Tabla 2. Lista de materiales utilizados para el engrane móvil y rueda de balanceo.**

- **RUEDA DE BALANCEO:** Para su fabricación se utilizó sólo acero rolando en frío, en la figura 5 se muestran las dimensiones [2]:



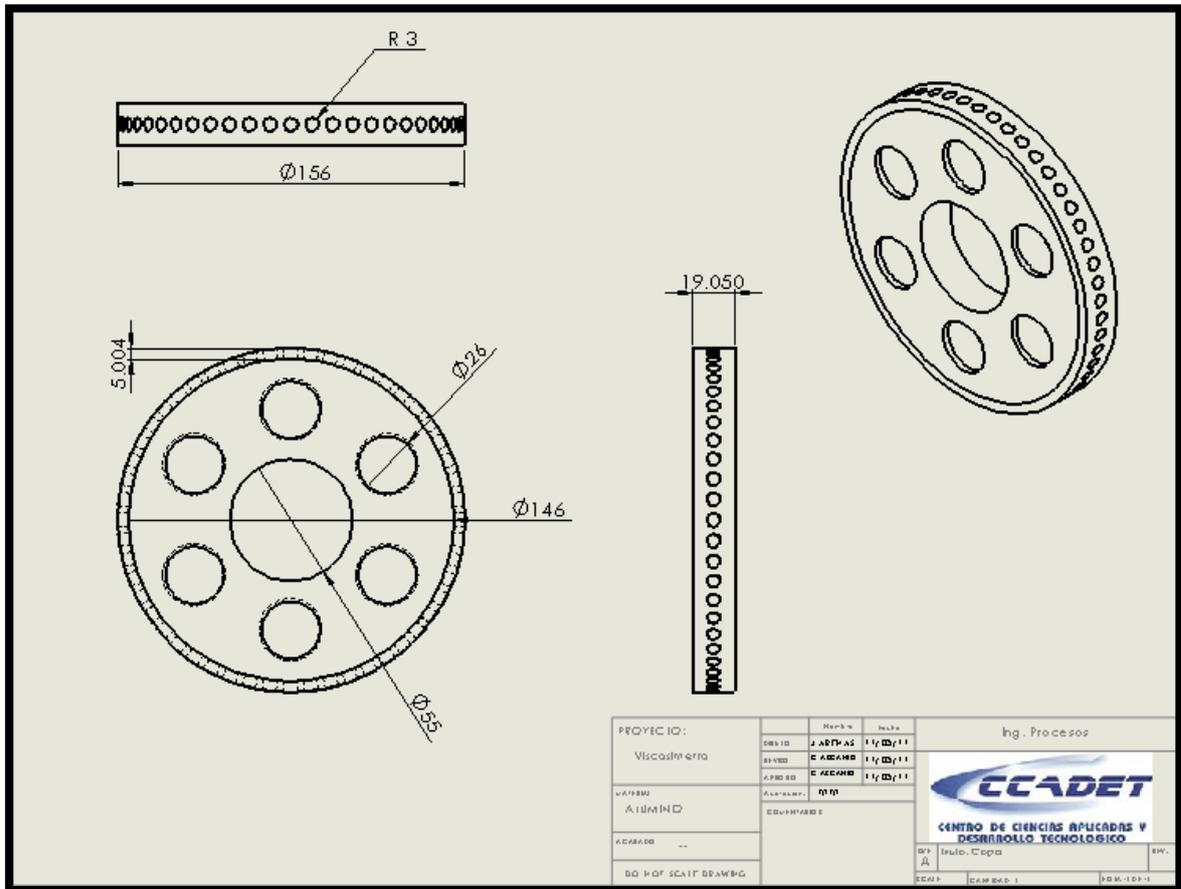
**Fig. 5. Dimensiones rueda de balanceo.**

Para simplificar el cálculo del volumen y la masa de la rueda de balanceo se divide la pieza en partes, para posteriormente obtener los totales. Los cálculos tanto de masa como de volumen se muestran en la tabla 3:

PIEZA	VOLUMEN	MASA
Anillo exterior	$V = \pi R^2 h - \pi r^2 h$ $V = \pi(110mm)^2(43mm) - \pi(95mm^2)(43mm)$ $V = 415397.09mm^3$	$m = \rho * V$ $m = 7.85 \frac{kg}{m^3} * 415397.09mm^3$ $m = 3260.87 g$
Anillo medio	$V = \pi R^2 h - \pi r^2 h$ $V = \pi(95mm)^2(8mm) - \pi(86.5mm^2)(8mm)$ $V = 38773.54mm^3$	$m = \rho * V$ $m = 7.85 \frac{kg}{m^3} * 38773.54mm^3$ $m = 304.37 g$
Uniones anillo medio y anillo central	$V = a * l * h * 5$ $V = (12.5mm)(45mm)(8mm)(5)$ $V = 22500 mm^3$	$m = \rho * V$ $m = 7.85 \frac{kg}{m^3} * 22500mm^3$ $m = 176.62g$
Anillo central	$V = \pi R^2 h - \pi r^2 h$ $V = \pi(37.5mm)^2(13mm) - \pi(27.5mm^2)(13mm)$ $V = 26546.46mm^3$	$m = \rho * V$ $m = 7.85 \frac{kg}{m^3} * 26546.46mm^3$ $m = 208.39g$
Total	$V = 500877.09 mm^3$	$m = 3950.25g$

**Tabla 3. Masa y volumen de la rueda de balanceo.**

- **ENGRANE MÓVIL:** Para esta pieza se usaron tres materiales diferentes, el acero rolado en frío para el centro del engrane, el acero inoxidable para el anillo exterior y 52 imanes de neodimio los cuales se insertaron en la parte exterior del anillo, las medidas de esta pieza [2] se muestran en la figura 6:



**Fig. 6. Dimensiones engrane móvil.**

Para esta pieza también se realizó el cálculo por separado de cada uno de sus componentes, estos cálculos se muestran en la tabla 4.

PIEZA	VOLUMEN	MASA
Anillo exterior	$V = \pi R^2 h - \pi r^2 h - V_i$ $V = \pi(78mm)^2(19.05mm) - \pi(73mm)^2(19.05mm) - 7351.33mm^3$ $V = 37833.41mm^3$	$m = \rho * V$ $m = 8 \frac{kg}{m^3} * 37833.41mm^3$ $m = 302.67 g$
Centro	$V = \pi R^2 h - \pi r^2 h - \pi r h(6)$ $V = \pi(73mm)^2(19.05mm) - \pi(27.5mm)^2(19.05mm) - \pi(13mm)^2(19.05mm)(6)$ $V = 212981.72 mm^3$	$m = \rho * V$ $m = 7.85 \frac{kg}{m^3} * 212981.72mm^3$ $m = 1671.91 g$
Imanes	$V_i = \pi R^2 h(52)$ $V_i = \pi(3mm)^2(5mm)(52)$ $V_i = 7351.33m m^3$	$m = \rho * V$ $m = 6.8 \frac{kg}{m^3} * 7351.33 mm^3$ $m = 49.99g$
Total	$V = 258166.19mm^3$	$m = 2024.57g$

**Tabla 4. Masa y volumen del engrane móvil.**

Una vez calculada la masa de ambas piezas se puede calcular la fuerza centrífuga, este cálculo se puede realizar con la siguiente ecuación:

$$F = m * d * w^2$$

Donde:

F: fuerza centrífuga

m: masa

d: distancia desplazada del eje de rotación.

w: velocidad angular

Si las dos piezas tienen el mismo resultado podremos decir que éstas están balanceadas.

El cálculo de la fuerza centrífuga para la rueda de balanceo y el engrane móvil, se realizó tanto con los datos que nos proporciona el programa donde se diseñó (solid works) y con los obtenidos anteriormente. Además se toma en cuenta el peso del rodamiento y el cople excéntrico que lleva cada una de las piezas, los cuales se muestran en la tabla 5.

Peso del rodamiento y cople excéntrico del engrane móvil.	Peso del rodamiento y cople excéntrico de la rueda de balanceo
164 [g]	176 [g]

**Tabla 5. Peso de los rodamientos.**

En las tablas 6 y 7 se muestran los cálculos del engrane móvil y la rueda de balanceo.

- Engrane móvil:

	Datos del programa	Datos calculados
Velocidad de rotación	1000 [rpm]	1000 [rpm]
Distancia desplazada	3 [mm]	3 [mm]
Masa (incluye rodamiento y cople)	2.13962 [kg]	2.18857 [kg]
Fuerza centrífuga	7.18 [kg]	7.34 [kg]

**Tabla 6. Fuerza centrífuga del engrane móvil.**

- Rueda de balanceo:

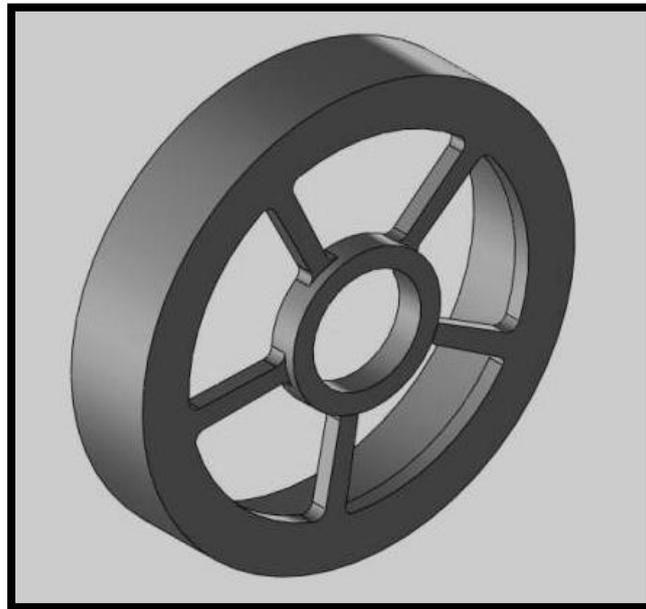
	Datos del programa	Datos calculados
Velocidad de rotación	1000 [rpm]	1000 [rpm]
Distancia desplazada	1.5 [mm]	1.5 [mm]
Masa (incluye rodamiento y cople)	4.10416 [kg]	4.12625 [kg]
Fuerza centrífuga	6.89 [kg]	6.92[kg]

**Tabla 7. Fuerza centrífuga de la rueda de balanceo.**

#### **4.2 CENTRO DE MASA DEL ENGRANE MÓVIL Y RUEDA DE BALANCEO**

El centro de masa del engrane móvil y el de la rueda de balanceo deben localizarse en el mismo plano transversal con respecto al soporte. Para realizar el análisis para ubicar el centro de masa de cada pieza [3], se seccionó en partes cada una de ellas facilitando así el cálculo. Conociendo el resultado final se puede posicionar cada una de las piezas haciendo coincidir el centro de masa en el mismo plano transversal.

- **RUEDA DE BALANCEO:** En la tabla 8, se muestran los valores obtenidos del centro de masa de la rueda de balanceo, la cual se visualiza en la figura 7.

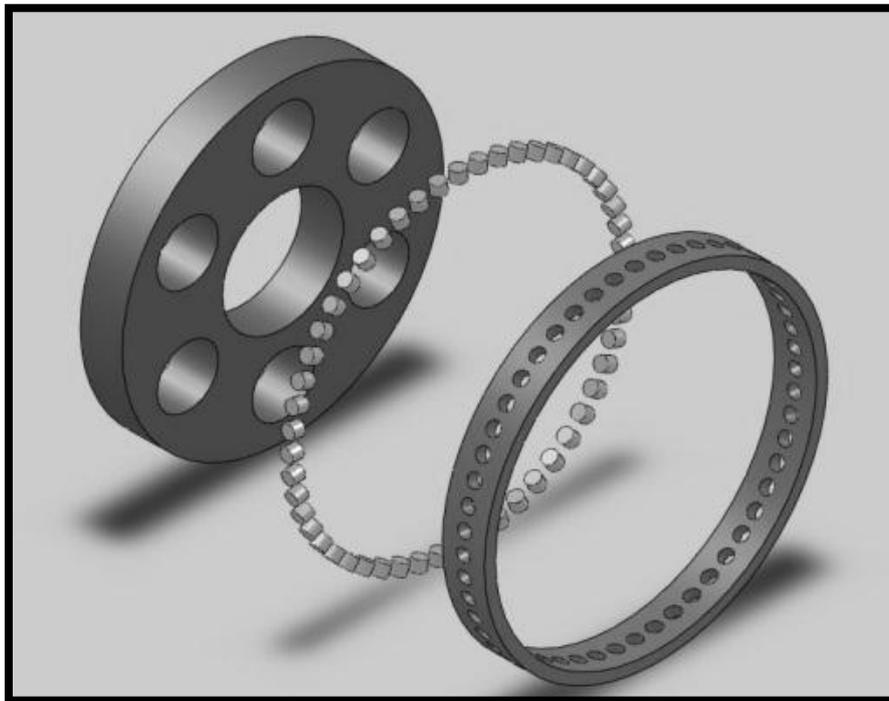


**Fig. 7. Rueda de balanceo.**

$m$ [Kg]	$\tilde{x}$ [mm]	$\tilde{y}$ [mm]	$\tilde{z}$ [mm]	$\tilde{x}m$	$\tilde{y}m$	$\tilde{z}m$
12.83	0	0	21.5	0	0	275.84
-9.87	0	0	21.5	0	0	-212.2
1.84	0	0	4	0	0	7.36
-1.48	0	0	4	0	0	-5.92
0.04	62	58.96	4	2.48	2.36	0.16
0.04	19.16	36.44	4	0.77	16.4	0.16
0.04	-50.16	-36.44	4	-2.01	-16.4	0.16
0.04	-50.16	-58.96	4	-2.01	-2.36	0.16
0.04	19.16	0	4	0.77	0	0.16
0.45	0	0	-1.5	0	0	-0.67
-0.24	0	0	-1.5	0	0	0.36
$\tilde{x} = \frac{\sum xm}{\sum m}$				0		
$\tilde{y} = \frac{\sum ym}{\sum m}$				0		
$\tilde{z} = \frac{\sum zm}{\sum m}$				17.57		

**Tabla 8. Centro de masa de la rueda de balanceo.**

- **ENGRANE MÓVIL:** En la tabla 9, se muestran los valores obtenidos del centro de masa del engrane móvil. En la figura 8 se muestra el engrane móvil con cada uno de los elementos que lo conforman.

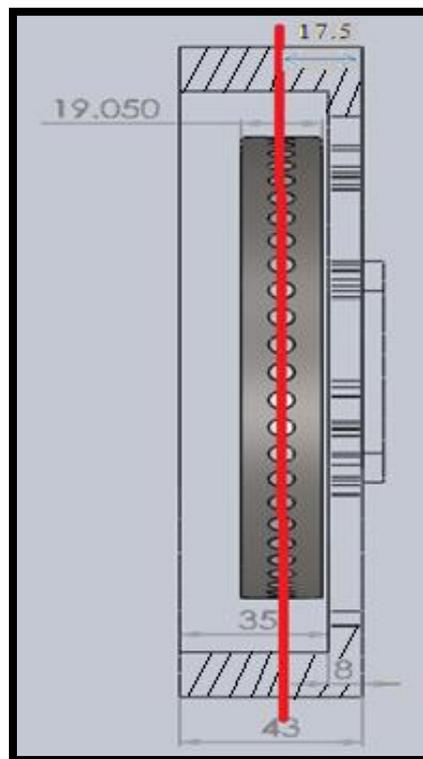


**Fig. 8. Engrane móvil.**

$m$ [Kg]	$\tilde{x}$ [mm]	$\tilde{y}$ [mm]	$\tilde{z}$ [mm]	$\tilde{x}m$	$\tilde{y}m$	$\tilde{z}m$
2.84	0	0	9.52	0	0	27.05
-0.35	0	0	9.52	0	0	-3.33
-0.091	43.3	25	9.52	-3.98	-2.3	-0.87
-0.091	0	50	9.52	0	-4.6	-0.87
-0.091	-43.3	25	9.52	3.98	-2.3	-0.87
-0.091	-43.3	-25	9.52	3.98	2.3	-0.87
-0.091	0	-50	9.52	0	4.6	-0.87
-0.091	43.3	-25	9.52	-3.98	2.3	-0.87
$\tilde{x} = \frac{\sum xm}{\sum m}$				0		
$\tilde{y} = \frac{\sum ym}{\sum m}$				0		
$\tilde{z} = \frac{\sum zm}{\sum m}$				9.52		

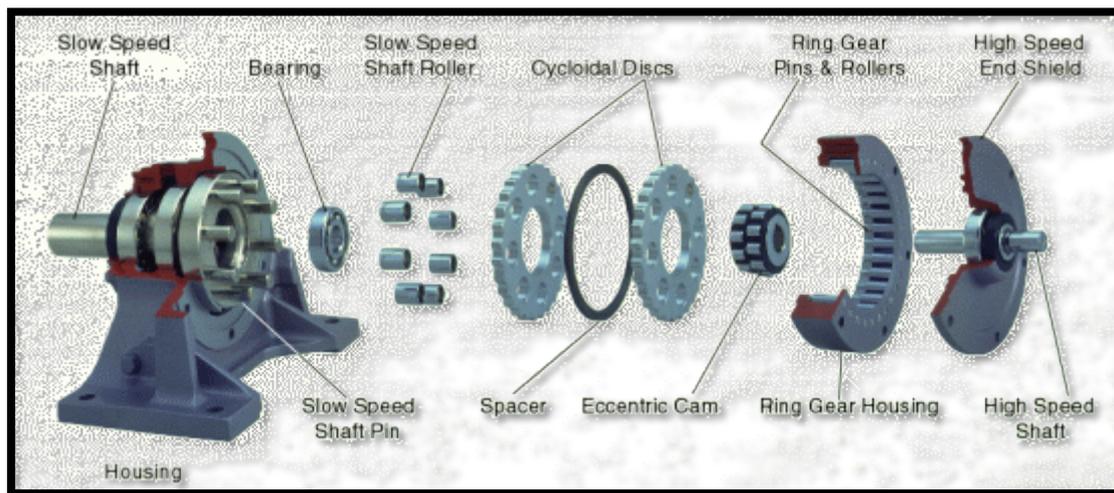
**Tabla 9. Centro de masa del engrane móvil.**

Una vez que se han obtenido las coordenadas del centro de masa, tanto del engrane móvil como el de la rueda de balanceo, se puede conocer la posición que tendrán dentro del RVCEM, esta posición se ilustra, una vez ensambladas las piezas, en la figura 9 (la línea roja tiene como único objetivo señalar el plano transversal).



**Fig. 9. Posicionamiento del engrane móvil y de la rueda de balanceo para que coincidan sus centros de masa.**

En comparación con otros reductores de velocidad cicloidales donde se utiliza un doble engrane como se muestra en la figura 10 para evitar vibraciones, la implementación del engrane móvil y de la rueda de balanceo y su posicionamiento en el RVCEM, además de evitar dichas vibraciones evita el momento que se puede generar si se utiliza el doble engrane.



**Fig. 10 Reductor de velocidad cicloidal SUMITOMO**

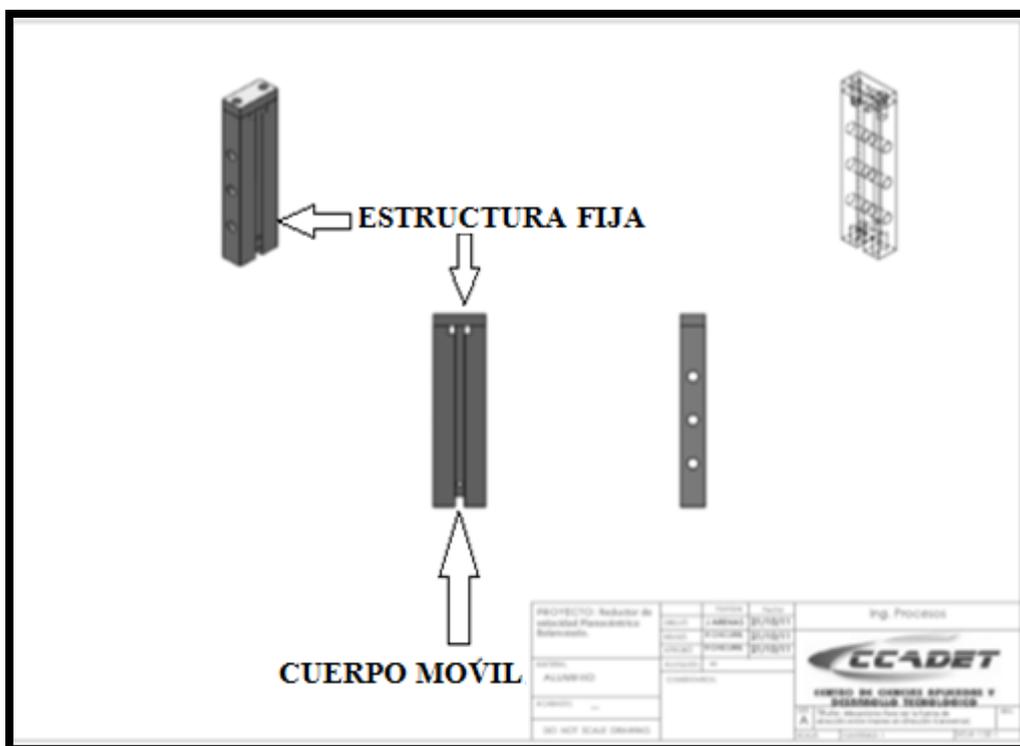
## 5. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS IMANES



Comprender el comportamiento de los imanes permanentes de neodimio es una parte importante para evaluar el RVCEM, ya que es en ellos donde se transmitirá la potencia entre la entrada y la salida. Para ello se realizaron diferentes pruebas para estos imanes cuya fabricación consta de la aleación de neodimio, hierro y boro. Los imanes de neodimio son los más poderosos imanes permanentes hechos por el hombre [5]. Han reemplazado a otros tipos de imanes en muchísimas aplicaciones de la industria moderna que requieren imanes permanentes de gran poder.

### 5.1 MEDICION DE LA FUERZA DE ATRACCION TANGENCIAL ENTRE LOS IMANES.

Para determinar la fuerza tangencial que ejercerán los imanes cuando el engrane móvil rueda sobre el engrane fijo, se propuso la construcción de un pequeño dispositivo de aluminio el cual se ilustra en la figura 11. Cuenta con una estructura fija que consta de dos paredes donde se incrustarán 6 imanes de neodimio distribuidos a la misma altura y a la misma distancia a lo largo de la pared, además de un cuerpo móvil, el cual se deslizará entre las dos partes fijas, con 3 imanes a la misma altura.



**Fig. 11** Dispositivo para determinar la fuerza tangencial entre los imanes, con 6 superficies interfaciales magnéticas activas.

Una vez diseñado y construido el dispositivo, fue necesario adaptarlo para realizar las pruebas correspondientes. El dispositivo cuenta con un orificio en la parte inferior del cuerpo móvil, el cual ayudó a sostener un plato donde gradualmente se fueron colocando pequeñas pesas. Las lecturas se tomaron desde que la placa móvil se comenzó a deslizar hasta vencer la fuerza de atracción de los imanes.

Durante las pruebas realizadas se fue quitando y poniendo peso y se tomaron las mediciones de deslizamiento del cuerpo móvil. El montaje del experimento se muestra en la figura 12.



**Fig. 12. Montaje de las pruebas para determinar la fuerza de atracción tangencial de los imanes.**

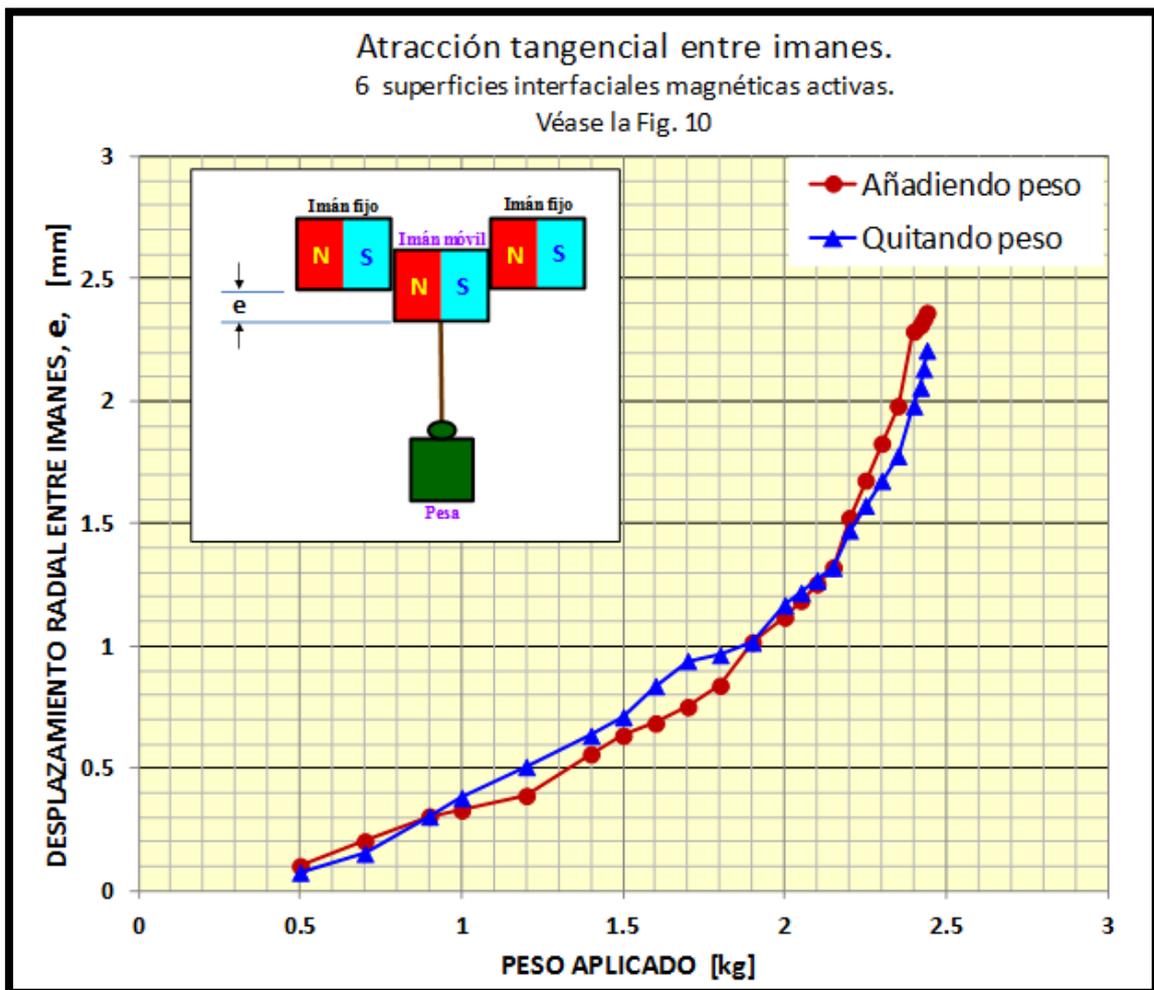
Las pesas graduadas que se utilizaron en este experimento fueron desde los 100 gramos hasta los 2 kilogramos, realizando las combinaciones necesarias con ellas, para obtener datos precisos y desplazamientos pequeños. También se utilizó un aceite lubricante para facilitar el deslizamiento de la parte móvil y así evitar fricción.

Para tomar las lecturas del desplazamiento del cuerpo móvil se contó con linternas graduadas las cuales permitieron tomar la medida del espacio que, en la parte superior, dejaba la parte móvil al ir colocando y quitando peso. Las lecturas tomadas se presentan en la tabla 10.

Peso [Kg]	desplazamiento [mm]	
	Quitando Peso	Poniendo Peso
0.50	0.076	0.102
0.70	0.153	0.203
0.90	0.305	0.305
1.00	0.381	0.330
1.20	0.508	0.389
1.40	0.635	0.559
1.50	0.711	0.635
1.60	0.838	0.685
1.70	0.94	0.752
1.80	0.965	0.839
1.90	1.016	1.016
2.00	1.168	1.118
2.05	1.219	1.186
2.10	1.27	1.254
2.15	1.321	1.322
2.20	1.473	1.524
2.25	1.575	1.677
2.30	1.676	1.828
2.35	1.778	1.981
2.40	1.981	2.286
2.42	2.057	2.311
2.43	2.133	2.336
2.44	2.209	2.362

**Tabla 10. Desplazamiento transversal del cuerpo móvil con 6 interfases magnéticas activas.**

En la tabla 10 se muestra cómo al ir incrementando el peso se va desplazando la parte móvil hasta vencer la fuerza de atracción tangencial de los imanes con un peso de 2.44 Kg, al igual que al ir quitando regresan a su posición original. Para visualizar que la prueba al ir quitando y poniendo peso tiene un efecto similar en el dispositivo se grafican los valores obtenidos, los cuales se muestran en la figura 13.



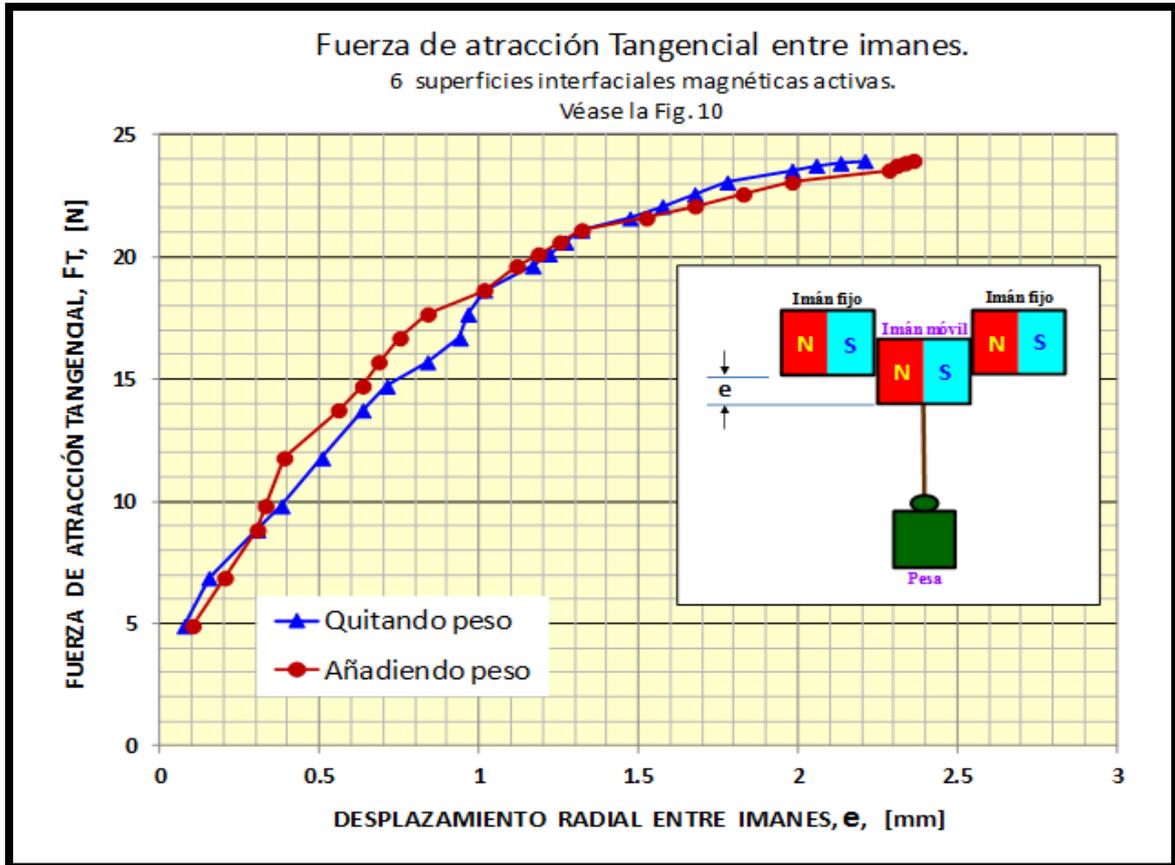
**Fig. 13. Gráfica del desplazamiento del cuerpo móvil.**

Se puede observar que, debido a la fricción, existe una pequeña variación al ir poniendo y quitando peso. Esto podría deberse a que cuando ponemos peso le resulta más fácil a la placa móvil deslizarse hacia abajo, que cuando le quitamos, que es cuando tiene que subir.

La fuerza máxima necesaria para vencer la atracción de los imanes al deslizarlos transversalmente uno sobre otro, se muestra en la tabla 11; además se presenta el comportamiento de esta fuerza en la figura 14.

PESO APLICADO [KG]	FUERZA TANGENCIAL MÁXIMA [N]
2.44	23.94

**Tabla 11. Fuerza de atracción tangencial de los imanes.**



**Fig. 14. Gráfica fuerza de atracción tangencial entre imanes.**

Ya que el dispositivo cuenta con 6 superficies interfaciales magnéticas, es necesario dividir la fuerza total entre 6, para obtener la fuerza de atracción tangencial por imán; el valor máximo es:

$$23.94 [N]/6 = 3.99 [N]$$

## 5.2 CALIBRACIÓN DEL SISTEMA PARA MEDIR LA FUERZA DE ATRACCIÓN NORMAL DE LOS IMANES.

Para poder realizar las pruebas correspondientes para la caracterización de los imanes se tuvo que calibrar debidamente las celdas de carga que se utilizaron. Las celdas con las que se contaron fueron celdas de la marca Digi-Key, las cuales manejaban rangos máximos de medición de 25, 250 y 500 libras fuerza [6].

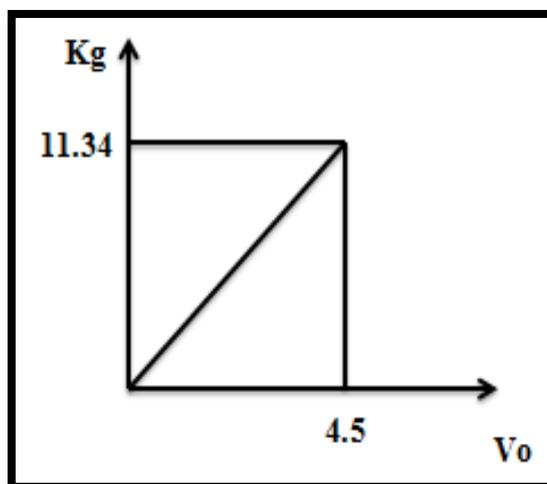


**Fig. 15. Celda de carga de 25 libras fuerza.**

Para la caracterización de los imanes se utilizó la celda de 25 libras fuerza, la cual se muestra en la figura 15, ya que se esperaban fuerzas pequeñas. Las celdas de 250 y 500 libras fuerza resultan muy sobradas para capturar los datos del experimento.

Con la ayuda de la hoja de datos del fabricante, la cual se encuentra disponible en internet, se pudieron obtener algunos datos, los cuales nos ayudaron a comprobar que las celdas de carga midieran la fuerza que indica el proveedor al ejercer presión sobre ellas.

Se construyó primero una gráfica con los datos proporcionados por el fabricante de la celda, que indica el cambio de voltaje al colocar peso sobre la celda, esto se realizó para cada una de las celdas de carga.

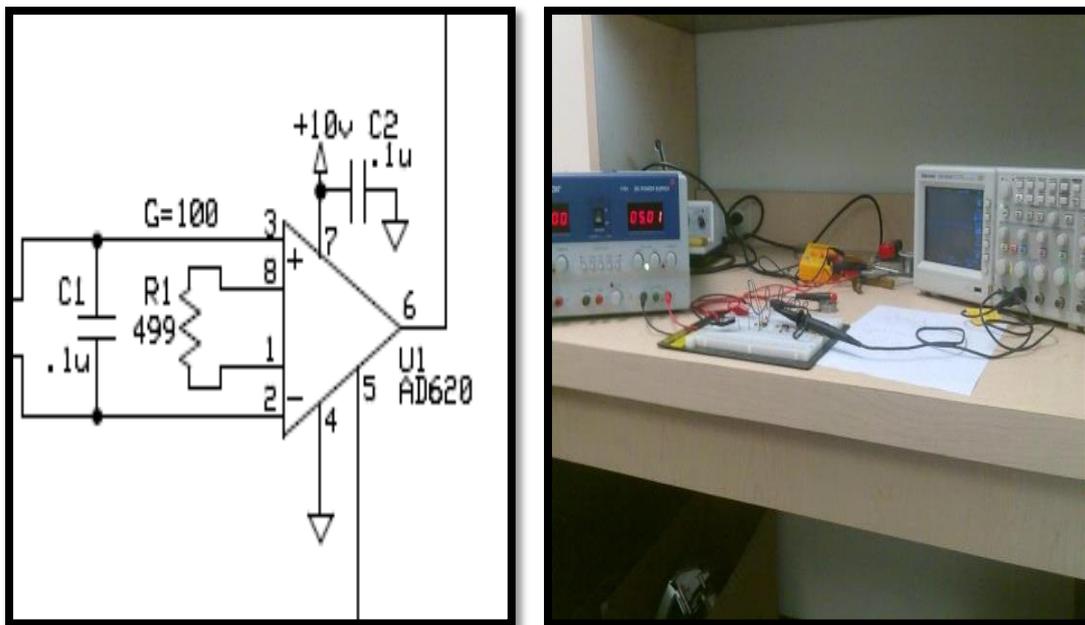


**Fig. 16. Gráfica voltaje contra peso.**

La gráfica de la figura 16 muestra el comportamiento de la celda de carga de 25 libras fuerza. En ella se puede observar que al ejercer un peso de 11.34 kg la celda de carga deberá entregar un voltaje de salida de 4.5 volts. Con esto se obtiene la siguiente relación:

$$V_o = \frac{4.5}{11.34} x$$

Donde x es el peso que se aplica a la celda de carga y  $V_o$  el voltaje correspondiente a dicho peso. Se construyó el circuito amplificador mostrado en la figura 17, el cual conectado a un osciloscopio registraba un cambio en el voltaje al colocar peso sobre la celda, este cambio de voltaje era más evidente cuando la celda de carga era de menor capacidad.



**Fig. 17. Circuito para probar las celdas de carga.**

Una vez probadas las celdas de carga y teniendo la certeza de que funcionaban correctamente, se necesitó armar otro circuito amplificador, el cual se acopló a un programa diseñado en Visual Studio 8 para poder recuperar los datos de cada una de las pruebas. Este ambiente de trabajo nos proyectaría en la pantalla de PC los datos obtenidos para posteriormente graficarlos e interpretar los resultados.

Una vez conectada la celda de carga con el circuito armado y el programa que nos permitió visualizar los datos, se fueron colocando pequeñas pesas graduadas para ajustar la medición en gramos, como se muestra en la figura 18.



**Fig. 18. Calibración de las celdas de carga.**

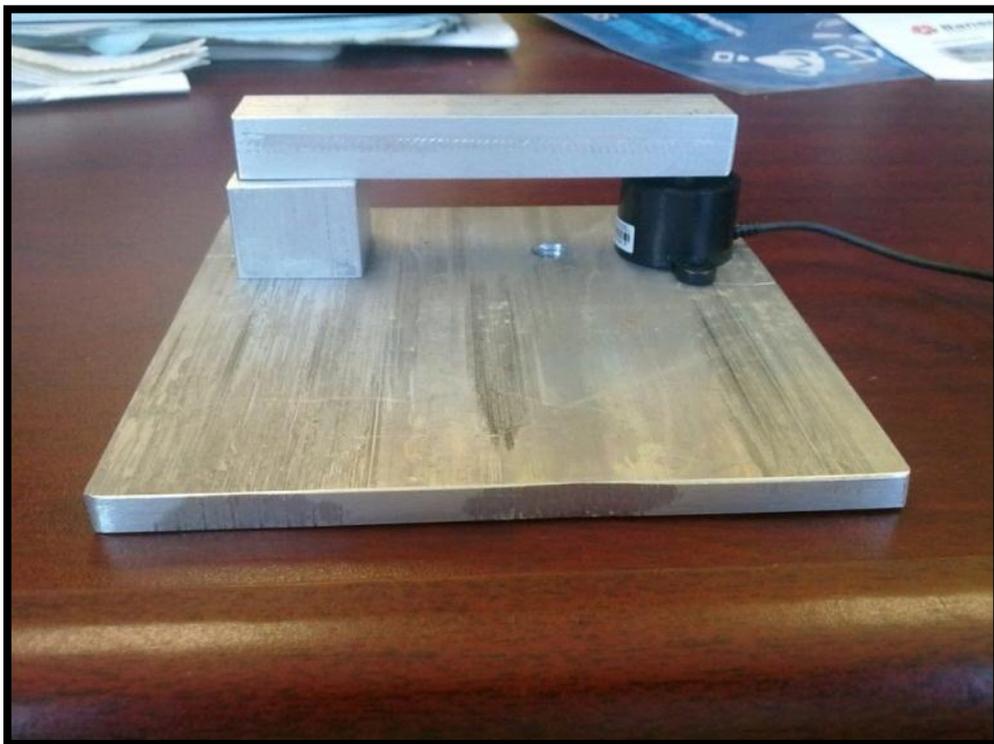
Se calibra para descartar el peso de la barra que tiene el imán integrado y poder hacer la medición de la fuerza de atracción en la caracterización de los imanes.

### **5.3 MEDICION DE LA FUERZA DE ATRACCIÓN NORMAL DE LOS IMANES.**

Para realizar las pruebas y determinar con qué fuerza se atraen los imanes al ir acercando uno al otro, se tuvo que diseñar y elaborar un pequeño dispositivo el cual se construyó dentro del CCADET.

Consta de una barra de aluminio, sostenida en un extremo por un cubo truncado (para tener el apoyo de la barra en una arista definida) y en el otro extremo por una celda de carga (la cual fue calibrada debidamente) que nos ayudará a determinar la fuerza de atracción. La barra tendrá insertado un imán por debajo, al cual se le irá acercando gradualmente un tornillo que tiene en su parte superior otro imán pegado.

Se fabricó también una base donde se montó este dispositivo, la cual tiene un orificio roscado donde entró el tornillo que contiene el imán. Al ir dándole vueltas, éste se va acercando y atrayendo al imán de la barra, la cual ejerce una fuerza en los extremos. La fuerza en uno de estos extremos fue medida por la celda de carga.



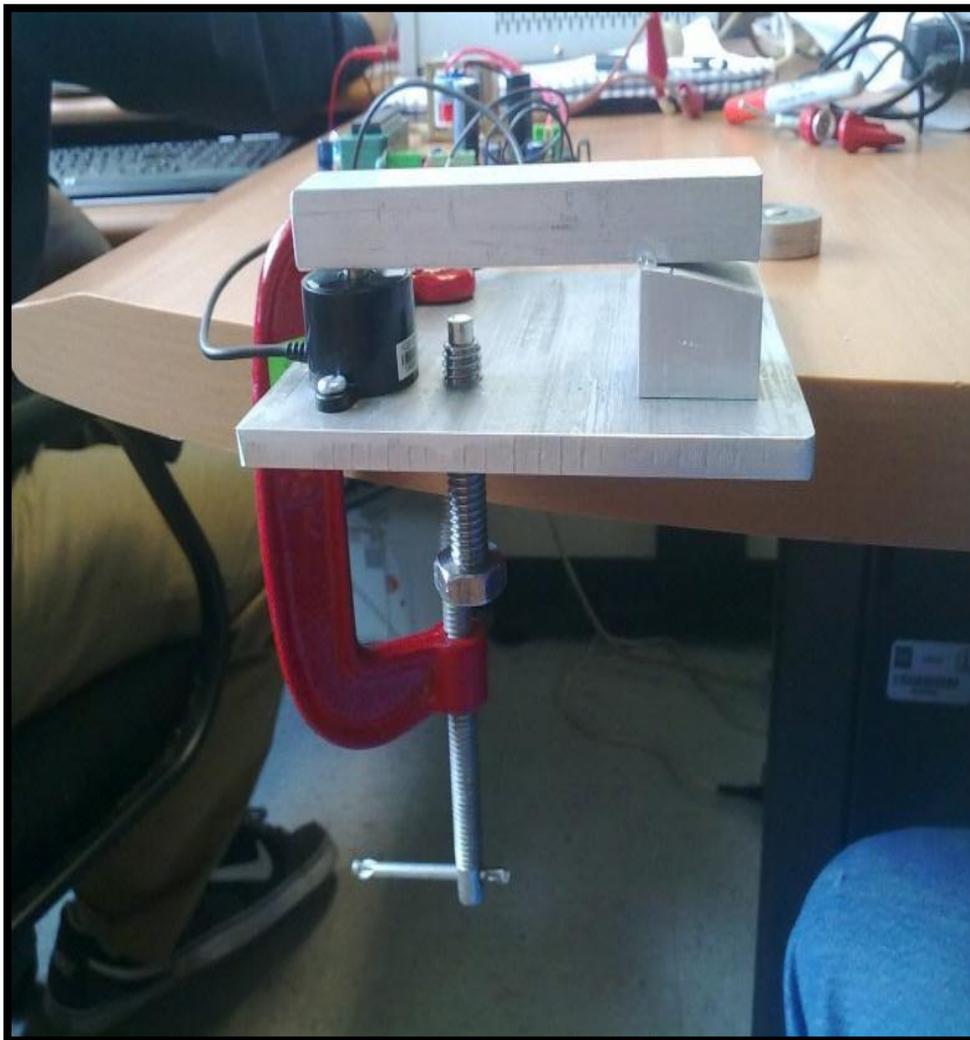
**Fig. 19. Dispositivo para calcular la fuerza de atracción normal de los imanes.**

El dispositivo que se diseñó se muestra en la figura 19. Se puede observar todavía el prisma completo, al cual se le tuvo que hacer un corte transversal para obtener una arista bien definida y evitar una distribución indeterminada de fuerzas.

Implementando el uso de la celda de carga, se pudo obtener lecturas suficientemente precisas de la fuerza de atracción normal de los imanes a diferentes distancias.

La celda de carga arroja los datos en gramos de la fuerza ejercida en ese extremo, los cuales se capturaron en un programa de cómputo con el que ya se contaba en CCADET, proporcionado por el Ing. Benjamín Varela.

Una vez montado el experimento y usando prensas para sujetar la base y poder así acercar el tornillo, se realizaron las pruebas correspondientes. En la figura 20 se muestra el montaje del experimento.



**Fig. 20. Montaje del experimento de atracción normal de imanes.**

Los datos obtenidos se van guardando en el programa utilizado como se muestra en la tabla 12.

Separacion entre imanes [mm]	Desplazamiento (vueltas)	Fuerza sobre la celda de carga [g]
18.352	1	0.00
16.704	2	0.00
15.656	3	0.00
14.008	4	0.00
12.36	5	3.64
10.712	6	3.64
9.064	7	7.27
8.24	7.5	14.55
7.416	8	21.82
6.592	8.5	29.09
5.768	9	36.36
4.944	9.5	50.91
4.12	10	76.36
3.296	10.5	112.73
2.472	11	170.91
2.06	11.25	210.91
1.648	11.5	254.55
1.236	11.75	330.91
0.824	12	432.73
0.618	12.125	509.09
0.61	12.13	629.09
0.824	12	480.00
1.238	11.75	407.27
1.648	11.5	312.73
2.06	11.25	232.73
2.472	11	196.36
3.296	10.5	123.64
4.12	10	80.00
4.944	9.5	50.91
5.768	9	32.73
6.592	8.5	18.18
7.416	8	7.27
8.24	7.5	3.64
9.064	7	-3.64
10.712	6	-10.91
12.36	5	-10.91
14.008	4	-14.55
15.656	3	-18.18
17.304	2	-18.18
18.952	1	-18.18

**Tabla 12. Datos capturados de la prueba de atracción normal de los imanes.**

Con los datos arrojados se construye la gráfica mostrada en la figura 21. Se puede observar que al acercar el tornillo a la barra, la fuerza en el extremo donde se encuentra la celda de carga comienza a aumentar, llegando a un máximo cuando están a una distancia mínima sin tocarse (0.61 mm).

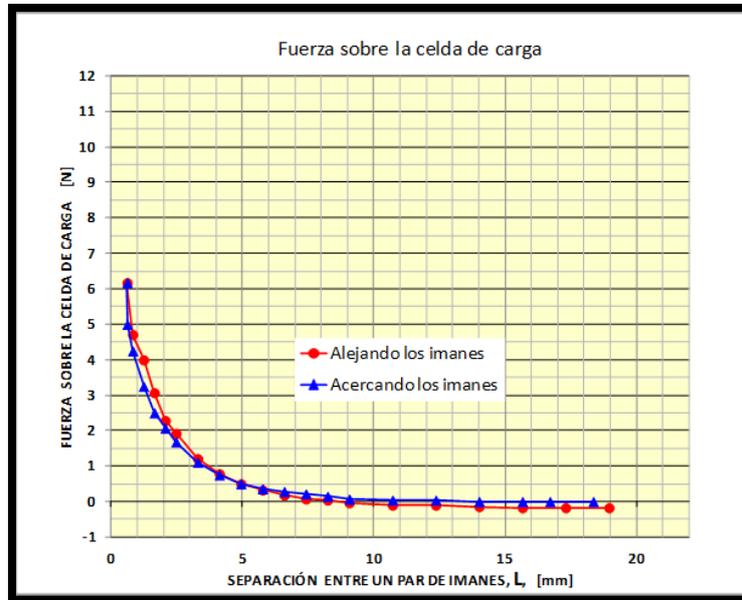


Fig. 21. Fuerza sobre la celda de carga (acercamiento y alejamiento).

Realizando un análisis de momentos en el arreglo que se muestra en la figura 22 se determina la fuerza de atracción normal de los imanes. En el extremo de la barra donde está colocada la celda de carga se medirá una fuerza de reacción  $R_A$ , la cual se podrá despejar para determinar la fuerza ( $F$ ) que queremos. El análisis se realiza a continuación:

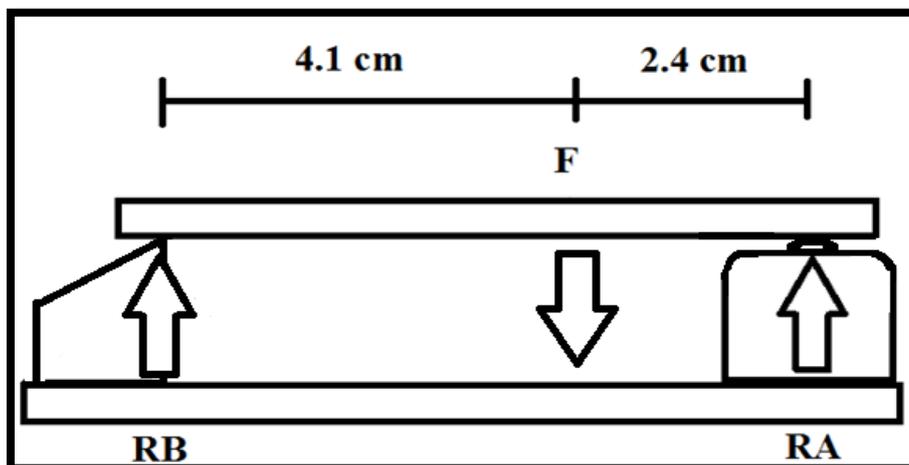


Fig. 22. Diagrama de cuerpo libre, experimento atracción normal de imanes.

- $\sum M_B = 0$

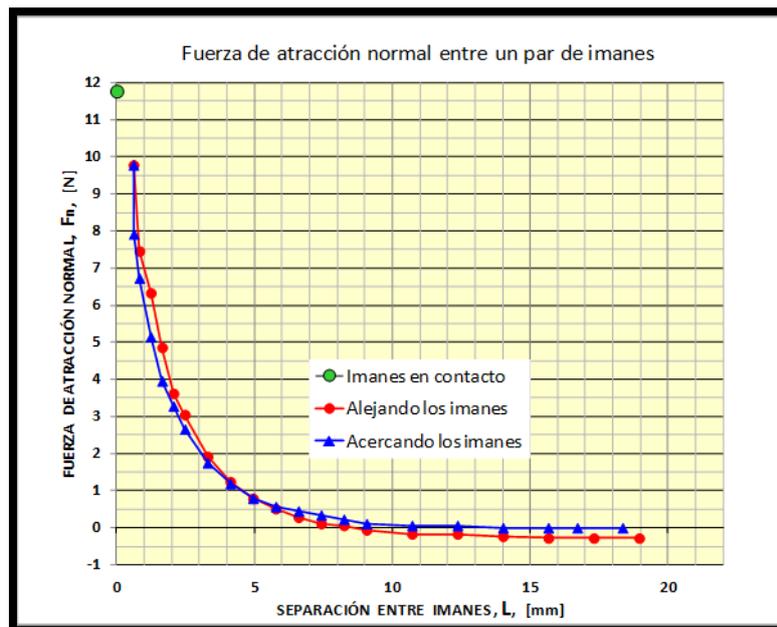
$$-(4.1 \text{ [cm]})(F) + (6.5)(R_A) = 0$$

$$F = \frac{(6.5 \text{ [cm]})(R_A)}{4.1 \text{ [cm]}} = 1.5853R_A$$

Con los datos obtenidos, se determina la fuerza máxima normal que existe cuando los imanes están separados por la mínima distancia, el valor máximo que registra la celda de carga es la fuerza de reacción  $R_A$ . Se sustituye este valor en la fórmula y se llega al siguiente resultado:

- $R_A = 629.09 \text{ [g]} = 6.17 \text{ [N]}$
- $F = 997.34 \text{ [g]} = 9.78 \text{ [N]}$

El resultado que se calcula con los datos obtenidos es el peso que podría soportar un imán, el cual es de 0.997 [kg]. Con esta prueba no fue posible encontrar la fuerza máxima cuando los imanes se encuentran previamente en contacto. Para esto se usaron las pesas graduadas para saber qué tanto peso podía sostener un imán. El resultado usando las pesas graduadas fue de 1.2 kilogramos. Por lo tanto, la fuerza de atracción normal máxima es de 11.77 [N]. Los resultados de la prueba en que cambia la separación entre imanes se presentan en la tabla 13 y en la figura 23.



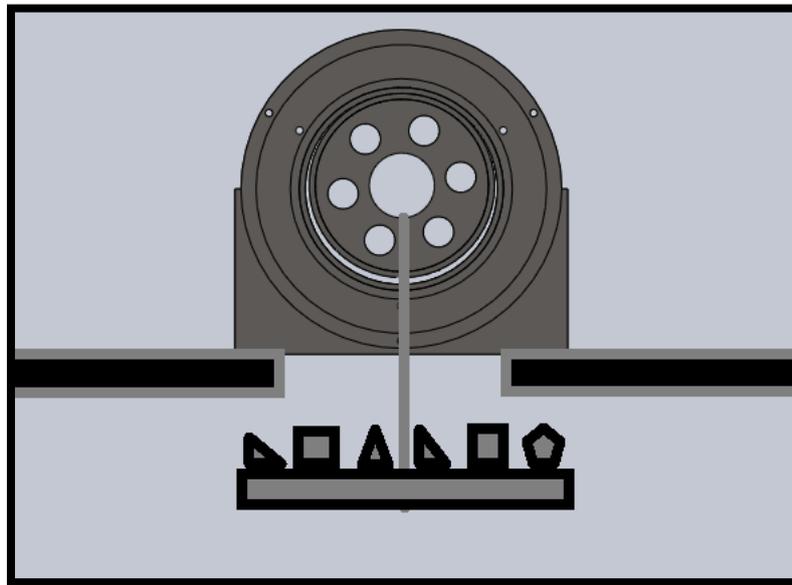
**Fig. 23. Fuerza de atracción normal entre un par de imanes.**

Separación entre imanes [mm]	Fuerza de atracción normal [N]
18.352	0.00
16.704	0.00
15.656	0.00
14.008	0.00
12.36	0.06
10.712	0.06
9.064	0.11
8.24	0.23
7.416	0.34
6.592	0.45
5.768	0.57
4.944	0.79
4.12	1.19
3.296	1.75
2.472	2.66
2.06	3.28
1.648	3.96
1.236	5.15
0.824	6.73
0.618	7.92
0.61	9.78
0.824	7.46
1.238	6.33
1.648	4.86
2.06	3.62
2.472	3.05
3.296	1.92
4.12	1.24
4.944	0.79
5.768	0.51
6.592	0.28
7.416	0.11
8.24	0.06
9.064	-0.06
10.712	-0.17
12.36	-0.17
14.008	-0.23
15.656	-0.28
17.304	-0.28
18.952	-0.28

**Tabla 13. Fuerza de atracción normal entre un par de imanes.**

Sin embargo, la fuerza de atracción normal en cada uno de los 9 pares de imanes que aproximadamente están en contacto entre el engrane móvil y el engrane fijo no es la misma, ya que depende de su posición dentro de la circunferencia de la transmisión. Por tal motivo, para determinar la fuerza normal que ejercen esos imanes se llevó a cabo la siguiente prueba.

La prueba consistió en hacer que los imanes del engrane fijo y del engrane móvil hicieran contacto en la parte superior como se muestra en la figura 24, para posteriormente ir colocando peso al engrane móvil hasta que éste comenzara a desplazarse hacia alguno de los lados o hasta que el peso hiciera que el engrane móvil se desprendiera de la parte superior.



**Fig. 24. Posición del engrane móvil para la prueba de fuerza normal en la transmisión.**

Esta prueba experimental se realizó más de una vez para tener más exactitud en el resultado. Al conseguir el objetivo de vencer la fuerza entre los engranes, se pesó tanto el engrane móvil como los materiales que se ocuparon y así se pudo realizar el cálculo de la fuerza. La tabla 14 indica la fuerza que se obtuvo:

PESO PROMEDIO OBTENIDO [KG]	FUERZA [N]
10.47	102.71

**Tabla 14. Fuerza de atracción normal de los imanes en la transmisión.**

## 5.4 ANÁLISIS DE FUERZAS.

En esta parte analizaremos el diagrama de cuerpo libre del engrane móvil, el cual se ve afectado por la fuerza magnética tangencial de los imanes ( $F_{TI}$ ), la fuerza de fricción ( $F_{FR}$ ), la reacción en el rodamiento ( $R_R$ ), la reacción en el engrane fijo ( $R_{EF}$ ), la fuerza magnética normal a los imanes ( $F_{NI}$ ) y la reacción de los pernos ( $R_{P1}$  y  $R_{P2}$ ). Aunque en la figura 25, se muestra que los seis pernos de la flecha de salida están en contacto con el engrane móvil, sus respectivas fuerzas de reacción no son iguales [7]. Aunque cuando todos los pernos de salida están en el contacto con la superficie del engranaje móvil, sólo la mitad de ellos participa en la transmisión del momento de rotación; la fuerza transmitida en cada uno de estos pernos es diferente debido al movimiento orbital de engrane móvil.

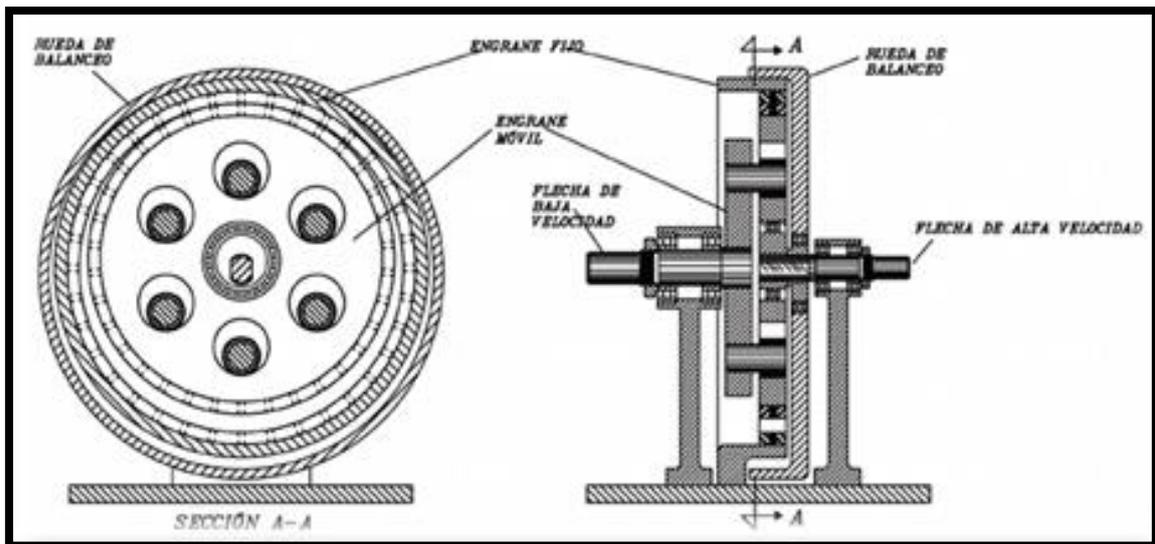


Fig. 25. Ensamble esquemático del RVCEM.

A partir del diagrama de cuerpo libre del engrane móvil, figura 26, se puede calcular la suma de fuerzas en el eje X, suma de fuerzas en el eje Y, y suma de momentos respecto al centro. Se puede simplificar las reacciones de los pernos como una sola reacción ( $R_P$ ) como se muestra en la figura 26, quedando las ecuaciones estáticas de la siguiente manera:

$$\sum F_x = 0$$

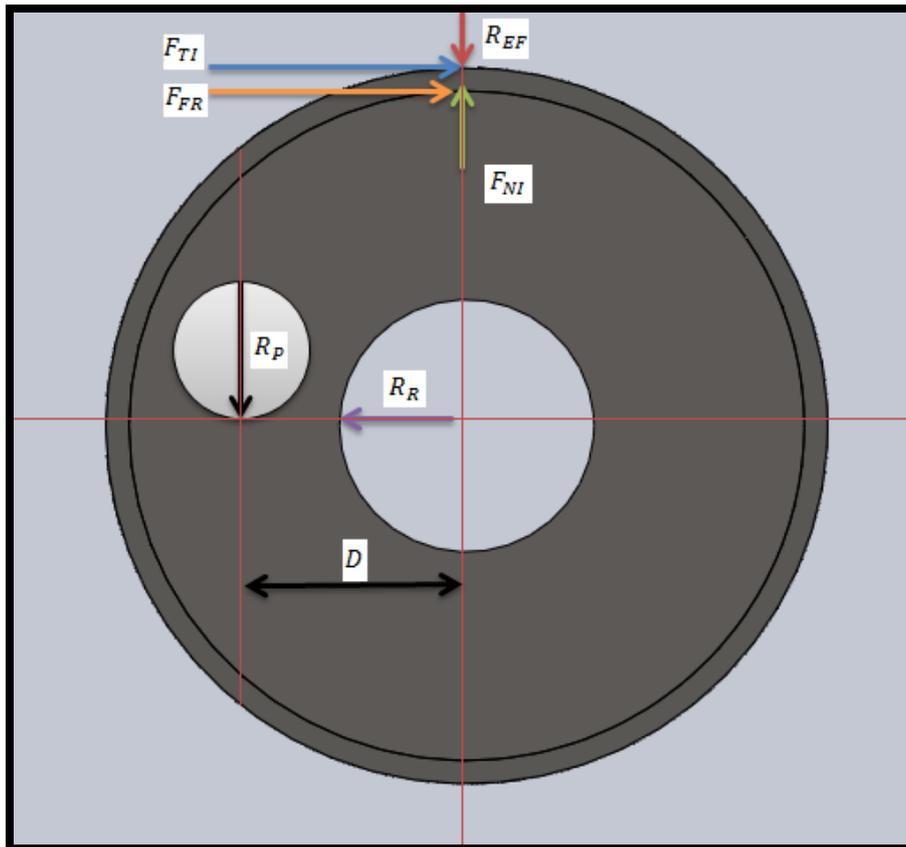
$$F_{FR} + F_{TI} - R_R = 0 \dots (1)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{NI} - R_{EF} - R_P = 0 \dots (2)$$

$$\sum M = 0$$

$$(F_{TI} + F_{FR}) * r - (R_P) * D = 0 \dots (3)$$



**Fig. 26. Diagrama de cuerpo libre del engrane móvil, simplificado.**

De la ecuación 2 despejamos la reacción en el engrane fijo ( $R_{EF}$ ) como se muestra a continuación:

$$R_{EF} = F_{NI} - R_P$$

Por otro parte, se sabe que la fuerza de fricción ( $F_{FR}$ ) es igual al coeficiente de fricción estático ( $\mu_s$ ) multiplicado por la fuerza normal, por lo que considerando el resultado anterior podemos determinar la fuerza de fricción como:

$$F_{FR} = \mu_s R_{EF}$$

$$F_{FR} = \mu_s (F_{NI} - R_P) \dots (4)$$

Sustituyendo el resultado anterior en la ecuación 3, nos queda la reacción en los pernos ( $R_P$ ) en función de la fuerza magnética tangencial ( $F_{TI}$ ) y de la fuerza magnética normal ( $F_{NI}$ ), como se muestra a continuación:

$$[F_{TI} + \mu_s(F_{NI} - R_P)] * r - (R_P) * D = 0$$

$$R_P = \frac{F_{TI} * r + r * \mu_s * F_{NI}}{\mu_s * r + D} \dots (5)$$

Donde D es la distancia que hay desde el centro del engrane móvil al centro del perno, y r es el radio del engrane móvil.

Considerando que aproximadamente 9 pares de imanes están en contacto todo el tiempo y conociendo que la fuerza magnética normal de los 9 imanes es de 102.71 [N] y que la fuerza tangencial de un imán es de 3.99 [N], tenemos que  $F_{NI}$  es igual a 102.71 [N] y que  $F_{TI}$  tiene un valor de 35.91 [N]. Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación 5, considerando un coeficiente de fricción de 0.25, y conociendo que  $D = 0.050$  [m] y  $r = 0.078$  [m] para este caso, se puede obtener  $R_P$ :

$$R_P = \frac{35.91 * 0.078 + 102.71 * 0.25 * 0.078}{0.078 * 0.25 + 0.050}$$

$$R_P = 69.12 [N]$$

Sustituyendo el resultado anterior en la ecuación 4 se puede obtener la fuerza de fricción  $F_{FR}$  como se muestra a continuación:

$$F_{FR} = 0.25(102.71 - 69.12)$$

$$F_{FR} = 8.40 [N]$$

Sustituyendo el resultado anterior en la ecuación 1 se obtiene la reacción en el rodamiento debida al engrane móvil:

$$R_R = F_{FR} + F_{TI}$$

$$R_R = 8.40 + 35.91$$

$$R_R = 44.31 [N]$$

Además, considerando que la reacción en el rodamiento de la flecha del engrane móvil es igual al par de entrada dividido entre la distancia (d) podemos decir que:

$$R_R = \frac{M_e}{d}$$

Donde d es la distancia entre el centro del engrane móvil y el centro del 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 ( $M_e$ ):

$$\begin{aligned}M_e &= R_R * d \\M_e &= 44.31 * 0.003 \\M_e &= 0.1329 [N * m]\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}M_s &= M_e * 26 \\M_s &= 0.1329 * 26 \\M_s &= 3.455 [N * m]\end{aligned}$$

Además se puede calcular el par de salida, sabiendo que es igual a la fuerza en los pernos ( $R_p$ ) multiplicada por la distancia radial a la cual se encuentran ubicados, es decir:

$$\begin{aligned}M_s &= R_p * D \\M_s &= 69.12 * 0.05 \\M_s &= 3.456 [N * m]\end{aligned}$$

## 6. PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS DEL REDUCTOR



## **6.1 PUNTOS A CONSIDERAR ANTES DE REALIZAR LAS PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS.**

Para estas pruebas se tomaron en cuenta los siguientes puntos:

- Montar las unidades sobre bases firmes para eliminar vibraciones y desalineamientos de los ejes.

Se cuenta con una base de acero dentro de las instalaciones del II, la cual se utiliza para realizar diversas pruebas de otros proyectos, como se muestra en la figura 27. Para este trabajo, se utilizó la base para montar el reductor y poder medir el par de entrada y de salida con ayuda de dos dinamómetros acoplados.

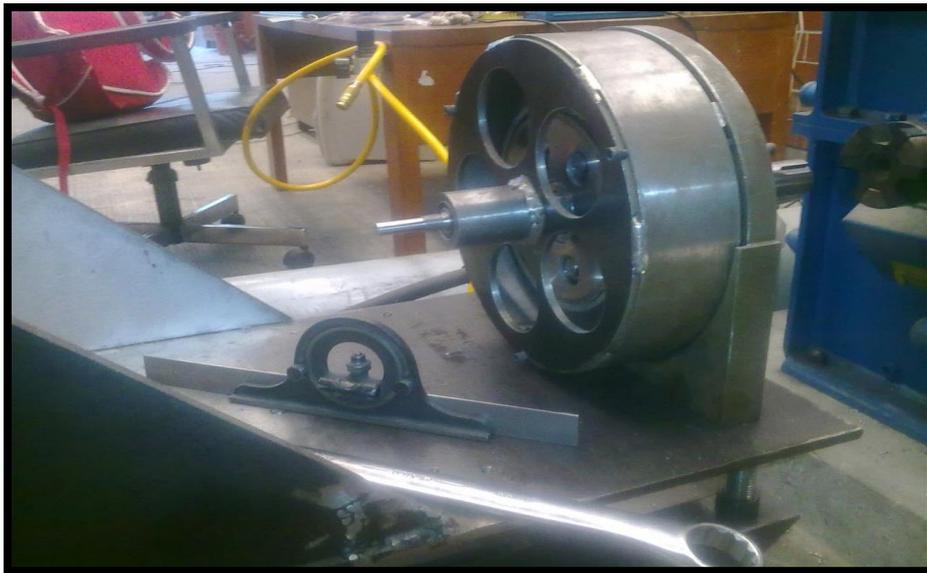
Esta base es ajustable, tanto en altura como en cercanía con el dinamómetro de banco DYNAMATIC. Para los fines de este trabajo se le tuvieron que realizar algunas modificaciones, ya que el reductor no contaba con el apoyo necesario. Se tuvo que perforar la base para insertar tornillos los cuales sujetan el reductor por debajo, consiguiendo el apoyo necesario.



**Fig. 27. Fijación de los tornillos en la base.**

- Si la transmisión de potencia entre el reductor y los dinamómetros se lleva a cabo mediante acoplamiento directo de sus ejes es indispensable garantizar una perfecta alineación y centrado.

Para garantizar que la base no se encontrara desequilibrada y poder alinear el reductor con el dinamómetro DYNAMATIC, se tuvo que nivelar como se muestra en la figura 28, usando los instrumentos necesarios y verificando cada una de las esquinas.



**Fig. 28. Nivelación de la base**

- Las unidades de acoplamiento deben montarse cuidadosamente sobre los ejes para no dañar los rodamientos y lo más cerca de la carcasa para evitar cargas de flexión sobre los ejes. Para este punto se tuvieron que comprar coples tipo estrella y se maquinaron para ajustarlos a los dinamómetros y al reductor.
- Antes de poner en marcha el reductor de velocidad, es necesario verificar que el suministro de energía eléctrica para el motor sea el adecuado.

El laboratorio de electromecánica del II cuenta con la fuente de energía eléctrica necesaria para realizar este tipo de pruebas. Para alimentar el motor que impulsará al reductor, se utilizó un banco de baterías conectadas en serie para alcanzar el voltaje necesario.

- Contar con el equipo adecuado con el que se realizarían las mediciones correspondientes y poder así registrar los datos del experimento.

Para realizar las pruebas dinamométricas y registrar el par de entrada y de salida del reductor de velocidad, se tuvieron grandes facilidades. Se disponía de una pequeña báscula digital la cual se utilizó para medir el par de entrada que nos proporcionaría el motor-dinamómetro.

El motor-dinamómetro se muestra en la figura 29, y cuenta con un brazo que se utiliza para medir la fuerza de reacción al giro del rotor, del propio motor; dicho brazo ejerce una carga sobre la báscula digital cuando el motor está en funcionamiento; los datos obtenidos se fueron capturando conforme aumentaba la velocidad del motor. Al motor se le tuvo que fabricar una base de acero para que alcanzara la altura del reductor cuando se hizo el montaje para las pruebas.



**Fig. 29. Motor-dinamómetro para medir el par de entrada al RVCEM.**

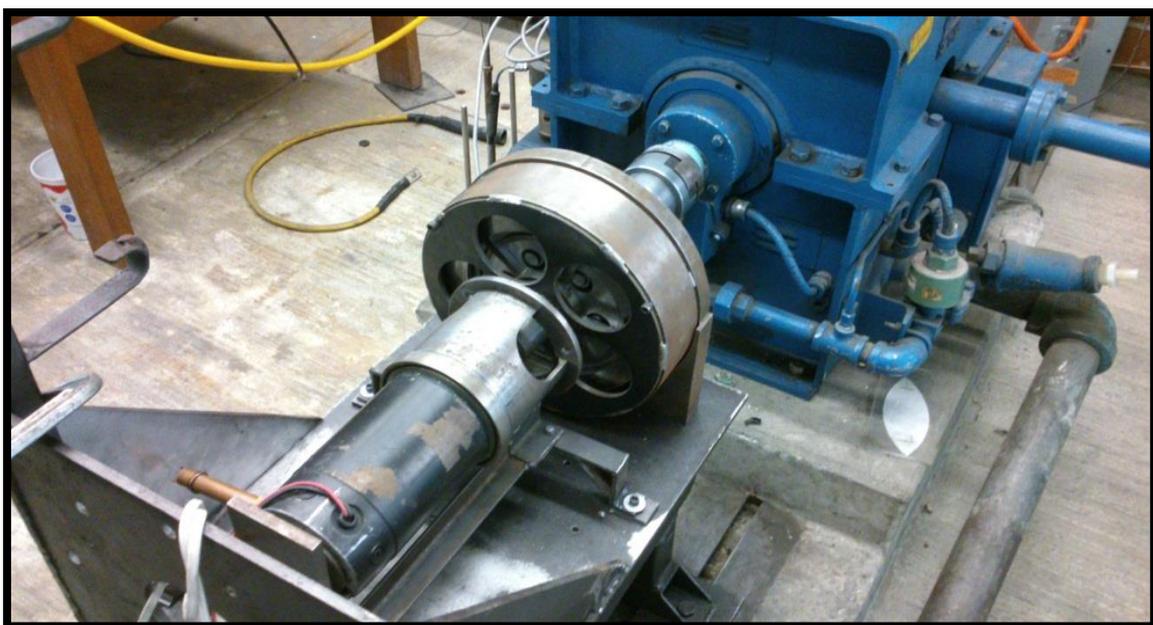
Otra de las facilidades fue tener un dinamómetro de banco DYNAMATIC ubicado en laboratorio de electromecánica del II, para medir el par de salida del reductor. Antes de comenzar a realizar las pruebas se calibró el dinamómetro como se muestra en la figura 30, para posteriormente ir capturando los datos del par de salida con el programa de cómputo con el que estaba adaptado el dinamómetro de banco DYNAMATIC.



**Fig. 30. Calibración del dinamómetro de banco DYNAMATIC.**

## **6.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS**

Una vez que se calibraron los instrumentos de medición, se instaló cada uno de los componentes como se muestra en la figura 31, para poder proceder a realizar las pruebas correspondientes. Las pruebas que se realizaron constan de ir capturando los datos del par de entrada y del par de salida al ir aumentando la velocidad de entrada, o la carga de frenado impuesta por el dinamómetro de salida.



**Fig. 31. Acoplamiento del reductor de velocidad entre los dinamómetros.**

Los resultados obtenidos en las primeras pruebas son los siguientes:

Velocidad (RPM) a la entrada	Par de entrada motor [N*m]	Par de salida Dinamometro[N*m]	EFECIENCIA %
488	0.188	0.29	5.93
496	0.172	0.23	5.03
500	0.165	0.17	3.85
505	0.247	0.47	7.32
512	0.144	0.13	3.47
513	0.247	0.53	8.25
516	0.227	0.44	7.46
517	0.227	0.42	7.12
518	0.247	0.48	7.47
519	0.220	0.46	8.04
520	0.144	0.10	2.67
870	0.398	1.20	11.60
900	0.275	0.75	10.49
904	0.371	1.30	13.48
920	0.316	1.00	12.17
965	0.199	0.65	12.56
967	0.227	0.67	11.35
1470	0.600	9.00	57.69
1480	0.707	7.50	40.80
1500	0.584	7.50	49.39
1550	0.227	4.00	67.77
1550	0.267	2.80	40.33
1580	0.227	2.60	44.05
1631	0.247	2.40	37.37
1590	0.240	1.60	25.64
1940	0.740	8.00	41.58
2000	0.500	5.00	38.46
2059	0.227	2.50	42.36

**Tabla 15. Primeras pruebas dinamométricas al RVCEM**

Para el cálculo de la eficiencia del RVCEM se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia del reductor} = \frac{\text{Par de salida}}{(\text{Par de entrada})(\text{Relación de reducción})} * (100)$$

Después de haber realizado esta prueba y analizado los resultados obtenidos 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.

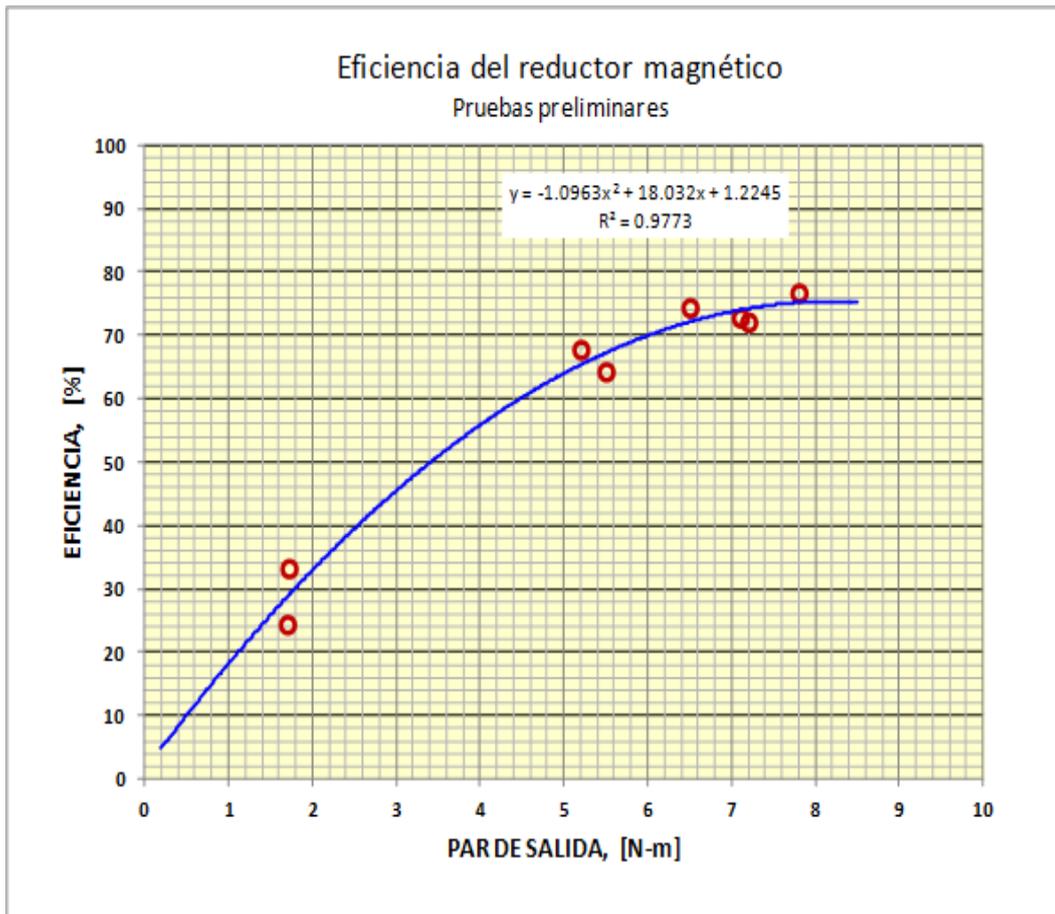
Se decide analizar el equipo a bajas revoluciones para dar un diagnóstico más exacto de las condiciones de funcionamiento, así como, desarmar el RVCEM para verificar las dimensiones de cada una de las piezas nuevamente, con el fin de hacer las correcciones

necesarias. Se calibra nuevamente cada uno de los dispositivos acoplados al montaje del RVCEM en las pruebas dinamométricas.

Una vez realizadas algunas de las correcciones al RVCEM se procede a realizar una segunda prueba, cuyos resultados obtenidos se muestran en la tabla 16 y en la gráfica mostrada en la figura 32.

VELOCIDAD (RPM) DE ENTRADA	PAR DE SALIDA DINAMÓMETRO [N·m]	PAR ENTRADA MOTOR [N·m]	EFICIENCIA DEL REDUCTOR [%]
1436	1.70	0.268	24.397
1296	1.72	0.199	33.243
1245	5.50	0.329	64.297
1225	5.20	0.295	67.797
1224	6.50	0.336	74.405
1213	7.10	0.375	72.821
1213	7.20	0.384	72.115
1213	7.80	0.391	76.726

**Tabla 16. Segunda prueba dinamométrica al RVCEM.**



**Fig. 32. Gráfica de la segunda prueba dinamométrica (eficiencia-par de salida).**

## 7. CONCLUSIONES Y MEJORAS



Una vez que se analizó el funcionamiento del RVCEM, se llegó a la conclusión que los resultados insatisfactorios fueron causados por errores de diseño y de fabricación, algunos de los cuales se fueron corrigiendo sobre la marcha. Las correcciones que se realizaron al RVCEM se describen a continuación junto con el resumen de los resultados de cada una de las pruebas.

- Al realizar un análisis comparativo de los resultados de la fuerza centrífuga de la rueda de balanceo y el engrane móvil los cuales se muestran en la tabla 17:

	Datos del programa	Datos calculado
Fuerza centrífuga engrane móvil	7.18 [kg]	7.34 [kg]
Fuerza centrífuga rueda de balanceo	6.89 [kg]	6.92[kg]

**Tabla 17. Resultados fuerza centrífuga.**

Se puede observar que la fuerza centrífuga del engrane móvil y de la rueda de balanceo no son las mismas, tanto en los resultados arrojados por el programa como en el caso de los calculados; esta variación puede provocar un desbalance durante la operación del reductor, se sugiere corregir el peso para balancear ambas piezas, lo que ocurrirá cuando presenten la misma fuerza centrífuga.

- La rueda de balanceo y el engrane móvil, se pesaron nuevamente para comprobar que las piezas contaran con las dimensiones correctas. El peso de la rueda de balanceo ya fabricada es de 3.678 [Kg], lo cual no corresponde al calculado 3.950 [Kg], esto conllevará a que se produzcan vibraciones cuando la pieza sea ensamblada al reductor. El motivo del error fue que la pieza se maquinó mal en el taller, el radio interno es mayor al que debería ser, por lo tanto el peso es menor. Para solucionar el problema se incrementó el radio interno y luego se insertó un anillo para ajustar a la medida y peso necesarios, así las piezas quedaron en óptimas condiciones para ser ensambladas y poder operar.

- El cálculo de los centros de masa del engrane móvil y de la rueda de balanceo sirvió para ubicar correctamente ambas piezas compensando la fuerza centrífuga generada, para ello se verificó que los centros de masa del engrane móvil y la rueda de balanceo estén diametralmente opuestos y situados en el lugar que les corresponde. Lo que no se tomó en cuenta fue, que al ensamblar las piezas existe un rozamiento entre el engrane móvil y la rueda de balanceo, lo que produce fricción entre ambas piezas y provoca calentamiento y desgaste. Se recomendó dejar un pequeño espacio entre ambas piezas para evitar esto.
- Al montar el equipo para realizar las pruebas dinamométricas se presentó un desalineamiento entre el engrane fijo y el engrane móvil, provocando un pequeño desplazamiento de éste hacia dentro, esto lleva a que el reductor no opere de la mejor manera.
- Los imanes del engrane fijo se tuvieron que rebajar ya que sobresalían de la cavidad destinada, esta operación se realizó con herramientas abrasivas, algunos de los imanes sufrieron daño y quedaron cascados. El reemplazo de estos últimos no se realizó ya que los imanes estaban incrustados a presión en el engrane fijo y era difícil sacarlos de su lugar.
- Los rodamientos de los pernos de salida del reductor tienen un poco de juego dentro de los orificios del engrane móvil, en ocasiones no hacen contacto cuando el reductor está en funcionamiento.
- Con una celda de carga de menor capacidad se pueden obtener mediciones más pequeñas, lo cual nos daría mayor resolución y nos arrojaría datos más exactos en cuanto a la fuerza de atracción de los imanes.
- Se puede observar que las correcciones realizadas en la segunda prueba condujeron a una mejoría del reductor, obteniéndose una mayor eficiencia. El par de salida tan reducido se debe al bajo campo magnético que ofrecen los imanes. Con la incorporación de imanes de mayor tamaño y/o varias hileras de imanes en cada engrane, se hubiera podido obtener un mayor par de salida.

- Haciendo la comparación entre el par máximo de salida calculado y un promedio del obtenido en las pruebas dinamométricas, los cuales se muestran en la tabla 18, se puede observar que el par calculado es únicamente el 48% del par experimental, Esta diferencia tan notable podría estar relacionada con los datos empleados en el cálculo, ya que no se consideró que en la operación del RVCEM, al irse desfasando la posición de los engranes, se producen fuerzas de repulsión entre los imanes. Como las fuerzas de repulsión se suman a las fuerzas de atracción, aumenta la fuerza tangencial entre los imanes, lo que lleva a que el par experimental sea mayor.

Par máximo de salida calculado	Par promedio máximo de salida obtenido en pruebas
3.456 [N*m]	7.2 [N*m]

**Tabla 18. Comparación del par de salida.**

El reductor falla cuando se rompe el orden de interacción entre los imanes del engrane fijo y el engrane móvil, es decir cuando la fuerza magnética entre imanes no es suficiente para resistir el par que opone la flecha de salida del reductor; esto provoca que el engrane móvil se deslice sobre el engrane fijo, pasando sobre los polos magnéticos alternados, lo que ocasiona un golpeteo constante con el engrane fijo.

- Una vez hechas algunas de las correcciones correspondientes, la eficiencia obtenida en el RVCEM fue del 76%; corrigiendo algunos otros errores de diseño y fabricación esta eficiencia podría aumentar.
- Se llega a la conclusión de que se cumplió el objetivo de esta tesis, ya que se diseñaron cada una de las pruebas que se aplicaron al RCEM, obteniéndose los resultados que sirvieron para determinar la capacidad y la eficiencia del prototipo. Se identificó la causa de los primeros resultados insatisfactorios y posteriormente se mejoró la operación del RVCEM.

## 8. REFERENCIAS

- [1] Chicurel, Ricardo., (Marzo 2012) “Reductor de velocidad de engranes magnéticos”, Gaceta del II, No. 78, ISSN 1870-347X. (págs. 19-20).
- [2] Vazquez, Luis (Febrero 2013). “Diseño y construcción de un reductor de velocidad cicloidal magnético balanceado”. Tesis de maestría, Ingeniería Mecánica, UNAM, México, D.F.
- [3] Hibbeler, R. C. (2004) “Mecánica Vectorial para Ingenieros”, Décima edición. Editorial Pearson, México.
- [4] Geartech. (2001) Gear and Gear Drives. Motion System Design.
- [5] Gareth P. Hatch, P. (2010). Recent Developments In Permanent Magnet Gear Systems and Machines. The Magnetics 2010 Conference. Florida, USA.
- [6]<http://www.digikey.com.mx/product-search/es/sensors/transducers/force-sensors/1966743?k=celda%20de%20carga>
- [7] Davoli P., Gorla C. and Chiozzi F. Theoretical and experimental analysis of a cycloidal speed reducer. Proceedings of PTG 2007. ASME 2007 10<sup>th</sup> ASME International Power Transmission and Gearing Conference. September 4-7, 2007, Las Vegas, USA.
- [8]<http://www.iingen.unam.mx/esmx/Investigacion/Proyectos/Lists/Proyectos/Attachments/150/PresentacionRicardoChicurel.pdf>