

**UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**



**DISEÑO COMPUTACIONAL DE ENGRANAJES  
MAGNÉTICOS PARA UNA TRANSMISIÓN E-  
CVT EN LOS VEHICULOS HÍBRIDOS**

**TESIS**

Para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico

**AUTOR**

Walter Edgardo Huiza Zárate (ORCID: 0000-0002-6665-8150)

**ASESOR**

Emir Vela Saavedra (ORCID: 0000-0002-9397-2452)

Lima – Perú

2021

*Dedicatoria:*

Dedico este trabajo a mi familia, a mi padre Walter Huiza, mi madre Emma Zárate, mi hermano Adán Huiza, mis abuelos Simon y Walter, mis abuelas Isabel y Petronila, mis tíos Adán, Walter, Fernando y Antonio, mis tías Jessica y Carmen, mis primos Jessica, Abraham, Gabriela y Catalina. También a mis amigos y profesores que me han apoyado a lo largo de toda mi vida académica.

*Agradecimientos:*

Agradezco principalmente a mis padres y hermano por darme la fortaleza a seguir adelante en mi camino al éxito. También agradezco a mi tío Adán Zárate por su apoyo incondicional y que en paz descanse. Asimismo, me gustaría agradecer a mi asesor, el profesor Emir Vela, quien me apoyo y guio en todo este trabajo de investigación.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN .....	3
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....	9
1.1. Sistema de transmisión continuamente variable de tipo electrónico .....	9
1.1.1. Estructura del sistema e-CVT.....	9
1.1.2. Interacción con las máquinas eléctricas y el motor de combustión interna....	10
1.2. Engranajes magnéticos .....	11
1.2.1. Funcionamiento de los engranajes magnéticos .....	11
1.2.2. Tipos de engranaje magnético .....	12
1.3. Curva de histéresis de los imanes permanentes .....	14
1.4. Engranaje coaxial magnético .....	16
1.4.1. Estructura del engranaje magnético coaxial .....	16
1.4.2. Funcionamiento del engranaje magnético coaxial.....	17
1.4.3. Dimensionamiento de los engranajes magnéticos coaxiales .....	19
1.4.4. Relación de velocidades .....	23
1.4.5. Campos magnéticos del engranaje magnético coaxial .....	23
1.4.6. Torque magnético .....	27
1.4.7. Eficiencia de los engranajes magnéticos coaxiales .....	28
1.5. Modelo Matemático .....	29
1.5.1. Magnetización radial .....	29

1.5.2.	Magnetización de Halbach .....	29
1.6.	Armónicos espaciales .....	30
1.7.	Principio de análisis a través de simulación multifásica.....	31
1.8.	Principio de ANOVA.....	31
CAPÍTULO II METODOLOGÍA .....		32
2.1	Diseño conceptual.....	34
2.2	Requerimientos iniciales de diseño.....	37
2.2.1	Características del engranaje planetario en el MG2 .....	38
2.2.2	Selección de los imanes permanentes.....	38
2.3	Diseño de los engranajes magnéticos coaxiales .....	40
2.3.1	Cálculo del dimensionamiento de los engranajes magnéticos coaxiales.....	41
2.3.2	Cálculo del Torque magnético.....	43
2.4	Diseño preliminar .....	44
2.5	Análisis de eficiencia .....	45
2.5.1	Análisis del torque magnético y velocidad.....	46
2.6	Análisis de la saturación magnética.....	47
CAPÍTULO III RESULTADOS .....		48
3.1.	Diseño del engranaje magnético coaxial.....	48
3.1.1.	Variación del entrehierro .....	50
3.1.2.	Variación del espesor de los imanes permanentes.....	52
3.1.3.	Variación del espesor de las piezas polares ferromagnéticas .....	54
3.1.4.	Diseño final .....	55
3.2.	Torque magnético transmitido.....	57
3.3.	Eficiencia de los engranajes magnéticos .....	59

3.4. Saturación magnética.....	60
CONCLUSIONES.....	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
ANEXO .....	70

# ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Generación de posibles soluciones.....	34
Tabla 2.2 Densidad de torque de los diferentes tipos de engranaje magnético.....	35
Tabla 2.3 Parámetros iniciales del tren motriz híbrido.....	37
Tabla 2.4 Características del engranaje planetario.....	38
Tabla 2.5 Tipo de PMs.....	39
Tabla 2.6 Comparación de las propiedades magnéticas.....	39
Tabla 2.7 Comparación de torque.....	40
Tabla 2.8 Posibles combinaciones para los PMs y PPs.....	41
Tabla 2.9. Diseño inicial del engranaje magnético.....	42
Tabla 2.10. Selección de las combinaciones para los PMs y PPs.....	43
Tabla 2.11 Relación de velocidades ideal.....	46
Tabla 3.1 Tabla de regresión de ANOVA de la longitud del entrehierro interno y externo	51
Tabla 3.2 Tabla de regresión de ANOVA del espesor de los imanes permanentes de alta y baja velocidad.....	53
Tabla 3.3 Tabla de regresión de ANOVA del espesor de las piezas polares ferromagnéticas .....	55
Tabla 3.4 Diseño final del engranaje magnético.....	55
Tabla 3.5 Resultados del torque magnético y la velocidad de giro.....	59
Tabla 3.6 Resultados de la eficiencia y de las potencias.....	59

# ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión .....	10
Figura 1.2 Interacción magnética del imán de accionamiento con el imán conducido .....	12
Figura 1.3 Engranaje magnético convertidos: a) Engranaje magnético de tornillo b) Engranaje de cremallera y piñón c) Engranaje magnético cónico d) Engranaje magnético cilíndrico externo e) Engranaje recto interno f) Engranaje magnético planetario.....	13
Figura 1.4 Engranajes con campo magnético variable a) Engranaje concéntrico lineal b) Engranaje magnético axial c) Engranaje magnético coaxial .....	14
Figura 1.5 B/H características de un imán permanente .....	15
Figura 1.6 Estructura de los engranajes magnéticos coaxiales.....	16
Figura 1.7 Estructura de los engranajes magnéticos coaxiales.....	17
Figura 1.8 Movimiento del engranaje magnético coaxial .....	18
Figura 1.9 Ondas con armónicos impares .....	20
Figura 1.10 Modelo analítico en el sistema de coordenadas pseudopolares .....	21
Figura 1.11 Direcciones de los campos magnéticos en el entrehierro externo e interno .....	27
Figura 1.12 Configuración de flujo de los engranajes magnéticos.....	30
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología .....	33
Figura 2.2 Resumen del diseño conceptual .....	34
Figura 2.3 Diseño preliminar del engranaje magnético coaxial .....	45
Figura 3.1 Diseño del engranaje magnético coaxial en base al modelo inicial .....	49
Figura 3.2 Variación del entrehierro interno y externo .....	50
Figura 3.3 Variación del espesor de los imanes permanentes de alta y baja velocidad .....	52
Figura 3.4 Variación del espesor de las piezas polares ferromagnéticas.....	54
Figura 3.5 Diseño final del engranaje magnético .....	57
Figura 3.6 Torque magnético vs tiempo.....	58
Figura 3.7 Curva BH .....	60
Figura 3.8 Comparación de saturación magnética entre el diseño inicial y final .....	61

## ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1: Resultados con los variables <i>Gin</i> , <i>Gout</i> y <i>Tout</i> .....	71
ANEXO 2: Resultados con los variables <i>Lm in</i> , <i>Lm out</i> y <i>Tout</i> .....	72
ANEXO 3: Resultados con los variables <i>Lp</i> y <i>Tout</i> .....	72
ANEXO 4: Tabla ANOVA de las variables <i>Gin</i> y <i>Gout</i> .....	73
ANEXO 5: Tabla ANOVA de las variables <i>Lm in</i> y <i>Lm out</i> .....	73
ANEXO 6: Tabla ANOVA de las variables <i>Lp</i> .....	74

## **RESUMEN**

En la presente investigación se abordan los problemas de los engranajes planetarios en los vehículos híbridos, principalmente en la eficiencia; debido a que disminuye por el sonido, vibración, calor y diseño del perfil del diente. Por ello, el objetivo principal es diseñar de manera computacional engranajes magnéticos como una alternativa a los engranajes planetarios. Para realizar dicho propósito es necesario comprender el funcionamiento del sistema de transmisión continuamente variable de tipo electrónico (e-CVT por sus siglas en inglés) dado que, en su estructura, se utiliza dos engranajes planetarios cuya principal función es transmitir la potencia de los motores, tanto eléctricos como de combustión interna, hacia las ruedas. Se analizará y escogerá el motor principal del sistema de transmisión e-CVT con la finalidad de diseñar un engranaje magnético capaz de reemplazar y superar al engranaje planetario utilizado. Para ello, se analizará el torque magnético generado por los imanes permanentes; a fin de obtener un dimensionamiento que tenga la capacidad de transmitir la potencia necesaria para mover un vehículo híbrido modelo sedan. Asimismo, se analizará la eficiencia de los engranajes magnéticos como también la saturación magnética de los imanes permanentes. Como resultado, se propuso un engranaje magnético coaxial que tiene la capacidad de generar 249.75 Nm a una eficiencia del 98.7% y con un rango de saturación magnética de 0.5 – 4 T, llegando a superar a los engranajes planetarios en eficiencia y siendo viables para la instalación en el sistema de transmisión e-CVT

### **PALABRAS CLAVES:**

Vehículo híbrido modelo sedan, sistema de transmisión e-CVT, engranajes planetarios, engranaje magnético coaxial, diseño computacional, torque magnético, campos magnéticos, eficiencia.

## **ABSTRACT**

### **COMPUTATIONAL DESIGN OF MAGNETIC GEARS FOR AN E-CVT TRANSMISSION IN HYBRID VEHICLES**

In the present investigation the problems of planetary gears in hybrid vehicles are addressed, mainly in efficiency; because it is diminished by sound, vibration, heat and the design of the tooth profile. Therefore, the main objective is to computationally design magnetic gears as an alternative to planetary gears. To achieve this purpose, it is necessary to understand the operation of the electronic-type continuously variable transmission system (e-CVT) since, in its structure, it uses two planetary gears whose main function is to transmit the power of the engines, both electrical and internal combustion, towards the wheels. The main motor of the e-CVT transmission system will be analyzed and chosen in order to design a magnetic gear capable of replacing and surpassing the planetary gear used. For this, the magnetic torque generated by the permanent magnets will be analyzed; in order to obtain a sizing that has the capacity to transmit the necessary power to move a hybrid vehicle model sedan. Likewise, the efficiency of magnetic gears as well as the magnetic saturation of permanent magnets will be analyzed. As a result, a coaxial magnetic gear was proposed that has the capacity to generate 249.75 Nm at an efficiency of 98.7% and with a magnetic saturation range of 0.5 - 4 T, surpassing planetary gears in efficiency and being viable for installation. in the e-CVT transmission system.

#### **Keywords:**

Hybrid vehicle model sedan, e-CVT transmission system, planetary gears, coaxial magnetic gear, computational design, magnetic torque, magnetic fields, efficiency.

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad, varias empresas automotrices tienen la responsabilidad de reducir los gases contaminantes producidos por los vehículos Diésel debido a que los gobiernos crean e implementan normas que regulan estas emisiones dañinas para la salud. La norma Euro (conocida en Europa) y Tier (conocida en Estados Unidos) tienen diferentes niveles de eficiencia correspondiente a las emisiones vehiculares siendo el Euro VI, el más exigente y el que se encuentra vigente en los países más desarrollados [2]. En el Perú, por medio del decreto supremo N°010-2017-MINAM, se está aplicando la norma Euro IV y tier 2 a partir del mes de abril del 2018 [3] debido a que los vehículos con motores Euro IV reduce casi a la mitad las emisiones contaminantes de un vehículo con motores Euro III [1]. Con los avances tecnológicos de las industrias automotrices, se ha conseguido reducir los gases contaminantes emitidos por los vehículos Diésel; sin embargo, cada vez las leyes son más severas, por ende, a largo plazo se requerirá de nuevas fuentes de energía no contaminantes.

Los motores propulsados a vapor, hidrogeno o electricidad son alternativas de energía que se pueden utilizar en los autos siendo los motores eléctricos, los que están mejor posicionado en la industria automotriz [5]; sin embargo, la poca autonomía que ofrece los vehículos eléctricos (Electric vehicle - EV) más recientes y la falta de estacionamientos públicos para la recarga de las baterías hacen que no reemplacen, en su totalidad, a los vehículos de gasolina [7]. Del mismo modo, no solucionarían el problema de la contaminación ambiental, debido a que las centrales termoeléctricas utilizan combustibles fósiles o gas natural (existen otras formas de obtener energía eléctrica; sin embargo, las centrales termoeléctricas tienen una alta potencia instalada y una es sustentable) para la generación de la electricidad [7]. Por ello, hasta que se desarrolle la tecnología para generar energía eléctrica sin la utilización de los combustibles fósiles, la mejor propuesta fue crear un vehículo compuesto con un motor de combustión interna (MCI) y motor eléctrico denominado autos híbridos (Hybrid electric vehicle - HEV). El principio de funcionamiento de los HEV es la utilización del motor eléctrico en los arranques para luego utilizar el MCI en velocidades media y altas. Para realizar dicho funcionamiento se requerirá un sistema de

transmisión que tenga la capacidad alternar dichos motores sin crear ningún tipo de conflicto. El resultado fue la transmisión continuamente variable de tipo electrónico (e-CVT por sus siglas en inglés). El sistema e-CVT fue implementada en los autos híbridos, los cuales cuentan con un motor a combustión interna, un generador y un motor eléctrico [8]. Los autos híbridos tienen tres diferentes tipos de conducción, los cuales son el modo EV, ECO y PWR siendo el modo ECO, el que proporciona una mayor autonomía, ahorrando hasta un 20% de gasolina además de reducir en un 15% las emisiones de  $CO_2$  a la atmósfera. Estas características son posibles debido a que el sistema e-CVT emplea un engranaje planetario en su estructura siendo este capaz de utilizar un MCI, un motor eléctrico (MG2) y un generador eléctrico (MG1) a la vez [8]. Asimismo, tiene la ventaja de recargar las baterías del motor eléctrico al momento de frenar; sin embargo, los autos híbridos tienen varias desventajas; por ejemplo, son más pesado y complejos en su funcionamiento que un auto con un MCI [8]. Además, cuentan con poco espacio en la zona del motor haciendo que la transmisión entre la corona del engranaje planetario y el eje diferencial de las ruedas se haga por medio de una cadena de transmisión siendo así la parte que tiende a romperse con mayor facilidad en la transmisión e-CVT [8]. Adicionalmente, un problema significativo es el ruido que emiten los engranajes planetarios en altas velocidades; el cual, se encuentra entre los 76 dB y 110 dB siendo una forma de desperdiciar energía (eficiencia) en forma de sonido [10]. El ruido es producido por las fuerzas rotacionales (vibración torsional) y las fuerzas radiales (vibración de flexión) en los engranajes planetarios [10]. En la actualidad, los fabricantes tratan de resolver el problema del ruido, modificando el perfil del diente; por ejemplo, la rugosidad de la cara del diente como también, aplicando una fase diferencial de engranaje. Los resultados del experimento fueron una disminución del ruido en 3 dB – 7 dB [10, 20]. Aunque se redujo el ruido en un 4% - 9.21%, no se podría tomar como una solución al problema debido a que se debe de maquinar a todos los engranajes que lo conforman (perfil del diente) [20], aumentando significativamente el costo y la complejidad, pero a su vez reduciendo el sonido y aumentando la eficiencia de los engranajes planetarios.

Por todo lo mencionado, se utilizará los engranajes magnéticos como una alternativa para los engranajes planetarios. Los engranajes magnéticos tienen la característica de ser silenciosos debido a que la transmisión es magnética (Fuerzas magnéticas); asimismo, no

produce vibraciones dado que no hay contacto entre el engranaje pequeño y el engranaje grande [13]. Por último, tendrá un menor costo de mantenimiento dado que no utiliza un lubricante para su funcionamiento [16, 19].

## **Alcance**

El presente trabajo de tesis se focaliza únicamente en el diseño computacional de engranaje magnético para los vehículos híbridos del modelo sedán con la configuración híbrida dual. El diseño de los engranajes magnéticos se hará con el propósito de solo reemplazar los engranajes planetarios analizando los aspectos más importantes (Eficiencia para la transmisión del torque). Para ello, se utilizará el programa COMSOL como herramienta de simulación. En él se estudiará el dimensionamiento, los campos magnéticos, el torque magnético y la eficiencia. Esto se hará con el fin de obtener una simulación funcional que cumpla los mismos parámetros de los engranajes planetarios y a su vez que resuelvan la problemática del sistema actual.

## **Antecedentes**

El diseño del perfil del diente, la fricción, el calor, el ruido, las vibraciones y el mantenimiento de los engranajes mecánicos son factores perjudiciales que afectan a la transmisión mecánica. Por lo cual se realizaron varios estudios para obtener diferentes formas de poder transmitir el torque con un menor costo de mantenimiento, un menor ruido y un mejor rendimiento [16].

En el año 1901, el concepto de la transmisión de torque por medio de imanes fue sugerido por Armstrong C. G. en su patente 687292 [21]. Fue uno de los primeros conceptos para la transmisión magnética utilizando electroimanes en su estructura. El principio de funcionamiento es la misma al de los engranajes mecánicos, con la diferencia del contacto entre el engrane y el piñón se dará por medio los campos magnéticos.

En la década de 1980, la mayoría de las patentes presentadas en esta época utilizaban ferrita como imanes permanentes debido a que era fácil de producir y era de bajo costo; sin embargo, la transmisión de potencia, asimismo su inducción magnética era baja. Con el descubrimiento de la aleación de neodimio, hierro y boro (NdFeB), los engranajes

magnéticos pueden transmitir un torque mayor debido a que los imanes permanentes tienen mejores propiedades magnéticas [16]. Por lo cual, a partir del año 2005, se demostró que puede existir otra forma de transmisión de potencia debido a que Rasmussen, Andersen, Joergensen y Nielsen mostraron el primer prototipo de engranajes magnéticos coaxiales. Esta tenía la capacidad de producir una reducción de velocidad de 5:1, con una eficiencia del 81% y teniendo una densidad de torque cercana a  $90 \text{ kN/m}^3$  [22].

Cuando surgió los primeros HEV, la única forma de conectar el motor eléctrico y el generador con el MCI era por medio de un engranaje planetario. Sin embargo, este tipo de mecanismo posee varios factores negativos que afectan tanto al rendimiento como en la estructura [16]. Por ello, en el año 2016, la empresa Magnomatics diseñó una máquina eléctrica con engranaje magnético denominada MAGSPLIT (En sus siglas MS) [17]. El sistema de propulsión basado en MS tiene la finalidad de sustituir al MG2 y al engranaje planetario, cumpliendo los mismos parámetros de funcionalidad. Con ello se logró la simplificación de la estructura en la transmisión y se mejoró la confiabilidad de los componentes al igual que el rendimiento del sistema de propulsión [19]. Sin embargo, el nuevo sistema de propulsión basado en MS carece de un componente mecánico o eléctrico que proporcione la recarga de las baterías del motor eléctrico dado que no cuenta con un generador eléctrico, disminuyendo su autonomía en el modo EV y ECO. Aunque resuelve varios problemas que tiene el sistema e-CVT, deja de lado una de sus principales características que le hace destacar por encima del resto que era la recarga de las baterías al momento de frenar.

La presente tesis se enfocará en la reducción de velocidad, la eficiencia al transmitir el torque y el dimensionamiento de los engranajes magnéticos. Diferenciándose de los anteriores estudios dado que se centrará en el tamaño del engranaje magnético y en la eficiencia. Con la finalidad de que exista una alternativa para el engranaje planetario utilizado en los autos híbridos.

## **Justificación y motivación**

En los últimos años, la demanda de los vehículos eco-amigables es alta debido a la concientización de los consumidores y de los gobiernos con respecto al cuidado al medio ambiente. Por ello, la mayoría de las empresas automotrices fabricaron vehículos alternativos, el cual están los HEV y los EV [4, 5]. Estos vehículos garantizan un menor impacto ambiental que los vehículos a gasolina [8]. Además, según los estudios realizados en [15], el 44% de los conductores compraron un vehículo por la movilidad. Por lo cual, la autonomía de un vehículo como también su impacto sobre el medio ambiente son fundamentales para su compra siendo los HEV, la mejor opción en el mercado actual dado que tiene una mejor autonomía que los EV y emiten una menor contaminación que los vehículos Diésel. Por ello, se quiere mejorar el sistema de transmisión debido a que el actual posee varias deficiencias; por ejemplo, la complejidad del funcionamiento, el costo de mantenimiento, el desperdicio de energía a través del sonido, vibraciones, calor y el diseño del perfil del diente [10, 16]. Por ello, el presente trabajo de tesis se centrará en reemplazar al engranaje planetario debido a que es uno de los principales componentes que generan el problema del ruido y de la eficiencia del torque transmitido hacia las ruedas. La opción que se plantea es el engranaje magnético dado que resuelve los problemas del engranaje planetario.

## **Objetivo general**

Diseñar de manera computacional engranajes magnéticos para un sistema de transmisión continuamente variable de tipo electrónico (e-CVT por sus siglas en inglés) como alternativa a los engranajes planetarios en los autos híbridos.

## **Objetivos específicos**

- Dimensionar, a través de simulaciones con el software COMSOL, el número y el tamaño de los imanes permanentes y de los imanes ferromagnéticos que se utilizan en los engranajes magnéticos.
- Analizar la eficiencia de los engranajes magnéticos para una transmisión e-CVT utilizando el software COMSOL.
- Analizar la saturación magnética de los imanes permanentes para determinar las pérdidas de flujo en los engranajes magnéticos.
- Comprobar si la capacidad de transmisión del torque de un engranaje magnético coaxial puede mover un vehículo híbrido modelo sedan.

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se investigará el funcionamiento de la transmisión continuamente variable de tipo electrónico (Siglas en inglés e-CVT) con el propósito de explicar la interacción entre los motores de propulsión y el engranaje planetario. Asimismo, se desarrollará la teoría de los engranajes magnéticos para comprender su funcionamiento a fin de diseñar un sistema de transmisión magnético como propuesta para reemplazar la transmisión mecánica estándar.

### **1.1. Sistema de transmisión continuamente variable de tipo electrónico**

El sistema e-CVT es un sistema de transmisión totalmente automático implementado exclusivamente en los vehículos híbridos que dispongan la configuración híbrida dual [9]. Sus principales beneficios son el cambio de marcha automática sin la necesidad de utilizar un embrague y la capacidad de utilizar de manera conjunta o intercalada un motor eléctrico y un gasolinero [23]. En los siguientes párrafos se explicará a detalle su estructura y la interacción en el sistema.

#### **1.1.1. Estructura del sistema e-CVT**

En esta transmisión híbrida, el sistema e-CVT representa el componente mecánico más importante del tren motriz híbrido. Permite utilizar la potencia obtenida del motor de combustión interna (MCI) y del motor eléctrico (MG2) de manera conjunta o intercalada [9]. Esto se debe a que el sistema e-CVT es un engranaje planetario que está conectado a los diferentes motores que se utilizan en los vehículos híbridos [23]. El esquema electromecánico del sistema e-CVT se compone de dos máquinas eléctricas y un motor de combustión interna (MCI) de ciclo Atkinson. Las dos máquinas eléctricas que se utilizarán son un generador y un motor eléctrico denominados MG1 y MG2 respectivamente. Además, el generador eléctrico estará acoplado al porta-satélites del engranaje planetario 1 y el motor eléctrico estará acoplado al sol del engranaje planetario 2. Cabe resaltar que en la configuración híbrida



Para regular la potencia enviada por la corona del engranaje planetario 1, el MG1 hará una resistencia al movimiento, con la finalidad de dividir la potencia en dos trayectos diferentes. La parte principal es enviada directamente hacia las ruedas del vehículo y la parte restante es convertida en energía eléctrica para incrementar el tiempo de operación del motor eléctrico [24]. Para convertir energía mecánica a energía eléctrica, se utilizará un generador eléctrico (MG1). A medida que incrementa la velocidad del vehículo, disminuirá la resistencia que opone. Por lo cual, en altas velocidades, solo el porta-satélites y la corona de ambos engranajes planetarios enviarán la potencia hacia las ruedas. Cuando el vehículo esté frenando, el porta-satélite se mantendrá fijo, mientras que la corona del engranaje planetario 1 seguirá girando, asimismo, se recargarán las baterías por la desaceleración dado que solo el MG1 seguirá funcionando [8].

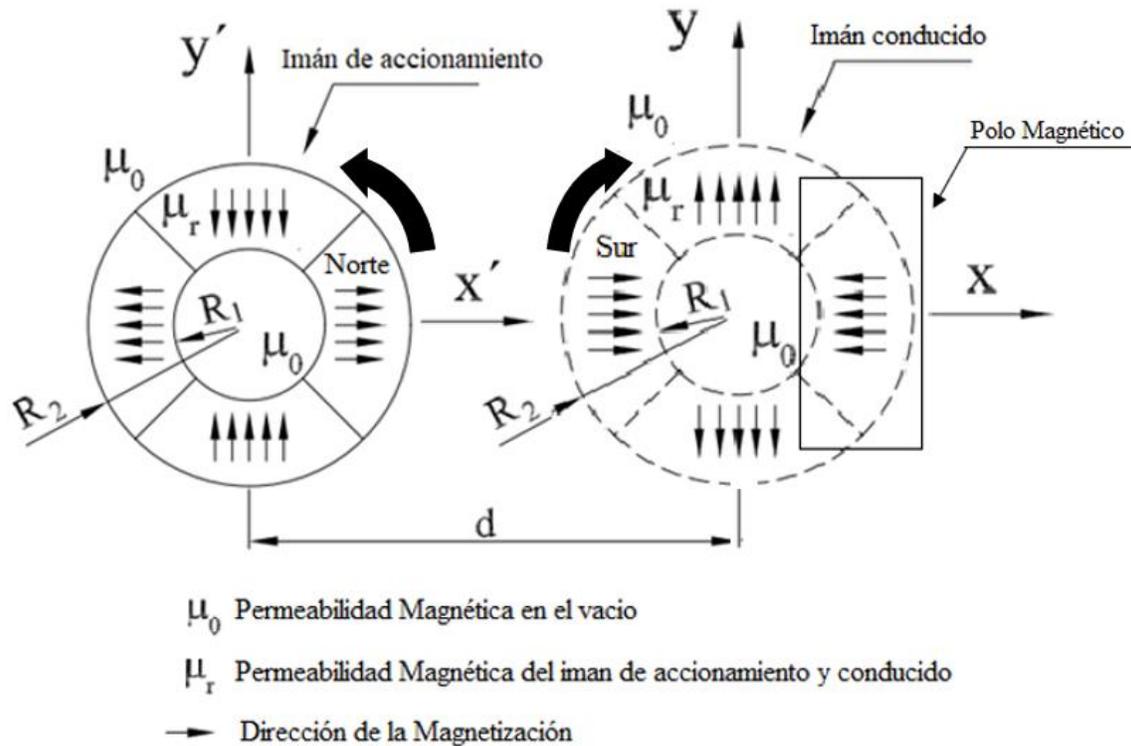
## **1.2. Engranajes magnéticos**

Un engranaje magnético se asemeja al engranaje mecánico tradicional en geometría y función con la diferencia de que la transmisión de potencia se dará por medio de un conjunto de imanes permanente que interactúan por una fuerza magnética [31]. A diferencia de la reacción de contacto convencional, el engranaje magnético tiene una reacción flexible. Aunque proporcionan una relación de movimiento como un engranaje tradicional, tales engranajes funcionan sin tocarse y, por lo tanto, son inmunes al desgaste de las superficies de acoplamiento, no generan ruido y pueden deslizarse sin sufrir daños cuando superan su velocidad de diseño [26].

### **1.2.1. Funcionamiento de los engranajes magnéticos**

El funcionamiento de los engranajes magnéticos se debe al accionamiento de un engranaje hacia el otro por medio de los imanes permanente ubicado en la superficie del engranaje. Como se muestra en la **Figura 1.2**, el imán superior e inferior se cruzan entre sí tangencialmente y a su vez, las superficies periféricas están cercas entre sí, separadas por un espacio de aire relativamente pequeño. Cuando el engranaje magnético pequeño (denominado piñón) empiece a girar, de forma similar a los engranajes mecánico, el engranaje magnético grande (denominado engranaje) empezará a girar dado que, en este caso, los polos magnéticos se engranan (de positivo a negativo), lo que hace que gire de

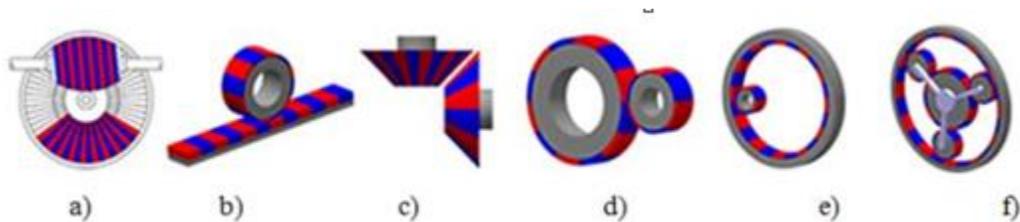
forma sincrónica produciéndose la transmisión de potencia. Este fenómeno se le denomina enganche magnético y se da cuando el polo positivo (Norte) del piñón atrae al polo negativo (sur) del engranaje para luego alternar con el polo negativo del engranaje (ver **Figura 1.2**)



**Figura 1.2** Interacción magnética del imán de accionamiento con el imán conducido [31]

### 1.2.2. Tipos de engranaje magnético

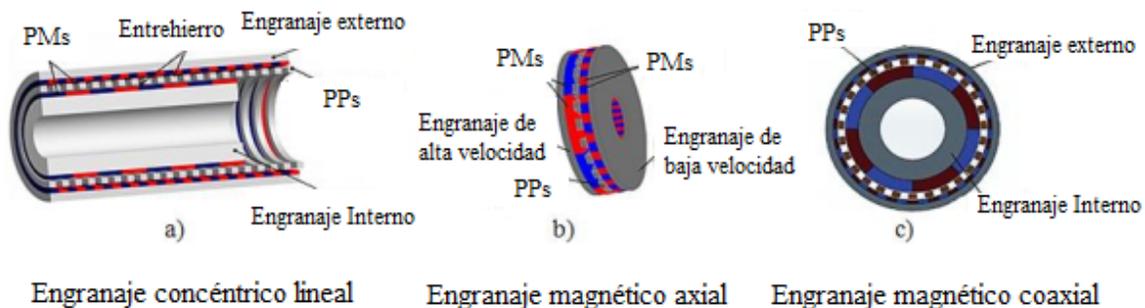
Los engranajes magnéticos se dividen en dos tipos: Engranajes magnéticos convertidos y los engranajes con campo magnético variable. Los engranajes magnéticos convertidos son engranajes que simulan a los engranajes mecánicos con la excepción de que, en lugar de dientes, utilizan imanes con polos definidos. Como se muestra en la **Figura 1.3**, la mayoría de configuración que se utilizan para los engranajes mecánicos, se pueden utilizar para los engranajes magnéticos.



**Figura 1.3** Engranaje magnético convertidos: a) Engranaje magnético de tornillo b) Engranaje de cremallera y piñón c) Engranaje magnético cónico d) Engranaje magnético cilíndrico externo e) Engranaje recto interno f) Engranaje magnético planetario [16]

Además de estas configuraciones, también existen engranajes magnéticos que modifican la geometría de los imanes permanentes (PM), imitando así a los engranajes helicoidales. Los engranajes magnéticos convertidos también incluyen a los engranajes mecánicos con estructuras complejas, como los engranajes hiperboloides y planetarios [16]. Dentro del conjunto de todos los engranajes convertidos, los engranajes magnéticos planetarios (siglas en inglés MPG) son los que pueden transmitir una potencia alta debido a una alta relación de transmisión y una alta densidad de par. Estos poseen una alta densidad de par debido al número de satélites que puede poseer en su estructura. Esto trae como consecuencia que el diseño estructural del MGP se complique, además de aumentar el momento de inercia [16]. La mayor ventaja de los engranajes magnéticos convertidos es que pueden realizar la mayoría de las tareas de los diferentes tipos de engranajes mecánico.

Por otro lado, los engranajes magnéticos con campo magnético variable son engranaje guiados por un flujo magnético. A diferencia de los engranajes anteriormente descrito, no requiere de una distancia corta para su funcionamiento dado que utilizan material de hierro. Adicionalmente, su funcionamiento es totalmente diferente a los engranajes magnéticos convertidos puesto que el flujo magnético ya no viaja a través del espacio de aire. En cambio, utilizan materiales ferromagnéticos para la conducción del flujo magnético de un engranaje a otro.



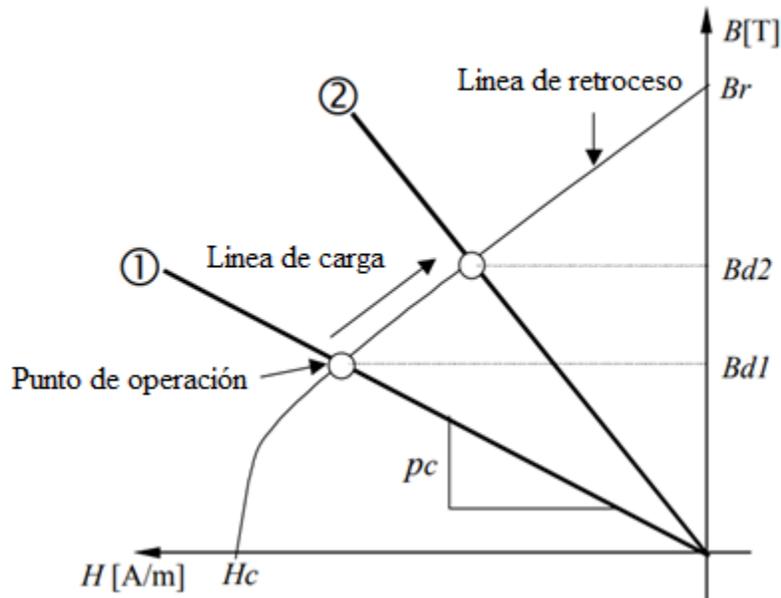
**Figura 1.4** Engranajes con campo magnético variable a) Engranaje concéntrico lineal b) Engranaje magnético axial c) Engranaje magnético coaxial [16]

Como se muestra en la **Figura 1.4**, se han propuesto estas configuraciones de engranajes magnéticos dado que aprovechan de una mejor manera los PM. Al no depender de un espacio libre entre los PM que delimitan la creación del campo magnético, se puede proporcionar una mayor densidad de torque y una alta eficiencia de transmisión [16, 35]. La mayoría de los engranajes con campo magnético variable utilizan las principales características de los engranajes magnéticos coaxiales dado a su topología; por lo cual se estudiará a detalle estos aspectos en los siguientes párrafos.

### 1.3. Curva de histéresis de los imanes permanentes

Los imanes permanentes (en sus siglas en inglés PMs) son materiales magnéticos caracterizados por tener grandes curvas de histéresis y a su vez, tener fuerzas magnéticas altas [31]. Estos materiales pueden almacenar energía magnética que no será consumida en su funcionamiento siempre y cuando funcione dentro de sus límites establecidos. Por lo cual, las condiciones de operación pueden afectar a las propiedades magnéticas de los PMs dado que pueden alterar la permeabilidad magnética [32].

A continuación, se presentará la curva de histéresis del segundo cuadrante conocida como la curva de desmagnetización.



**Figura 1.5** B/H características de un imán permanente [32]

Como se muestra en la **Figura 1.5** denominada el segundo cuadrante de la curva de histéresis, se puede estudiar la pendiente de la permeabilidad al retroceso como también la línea de carga. La pendiente es el coeficiente de permeabilidad ( $pc$ ) y esta depende de las propiedades magnéticas utilizadas en el circuito magnético para la ruta del flujo conducido por el imán permanente. El  $pc$  estará expresado de la siguiente forma:

$$pc = \frac{\sigma A_m I_m}{f A_g I_g} \quad (1.1)$$

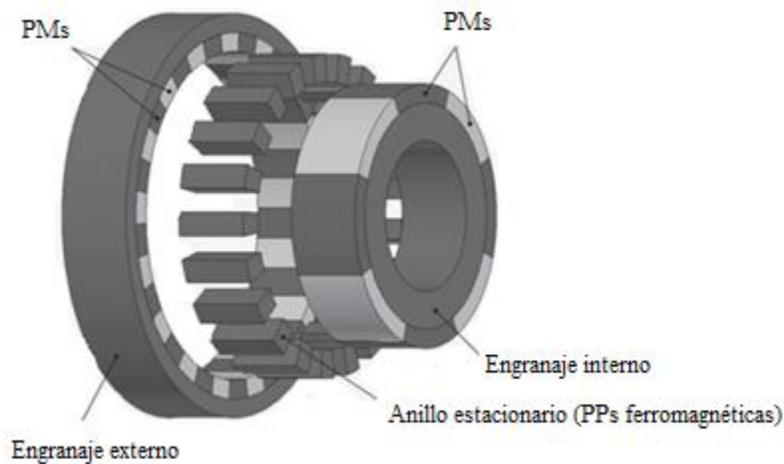
Donde  $\sigma$  es el coeficiente de fuga,  $f$  es el coeficiente de caída de la fuerza magnetomotriz (MMF),  $A_m$  es el área del polo en imán permanente,  $A_g$  es el espacio de aire,  $I_m$  es el grosor de la dirección de magnetización y  $I_g$  es el espacio de aire. En el punto de operación (ver **Figura 1.5**) denominado: flujo disponible en el imán, estará determinado por la línea de carga y del retroceso. Al incrementar la temperatura, las propiedades magnéticas del imán se degradan provocando cambios reversibles en su remanencia magnética. Por lo cual, en condiciones de operación adversas, el imán permanente deberá de poseer una alta retención del magnetismo que le fue inducido, dado que nos dará una mayor fiabilidad de los componentes magnéticos. Por lo cual, la búsqueda de una mayor fuerza de coercitiva ( $H_c$ )

será importante para la selección del PM dado que nos otorgará la resistencia que posee antes de ser desimantado [34].

#### 1.4. Engranaje coaxial magnético

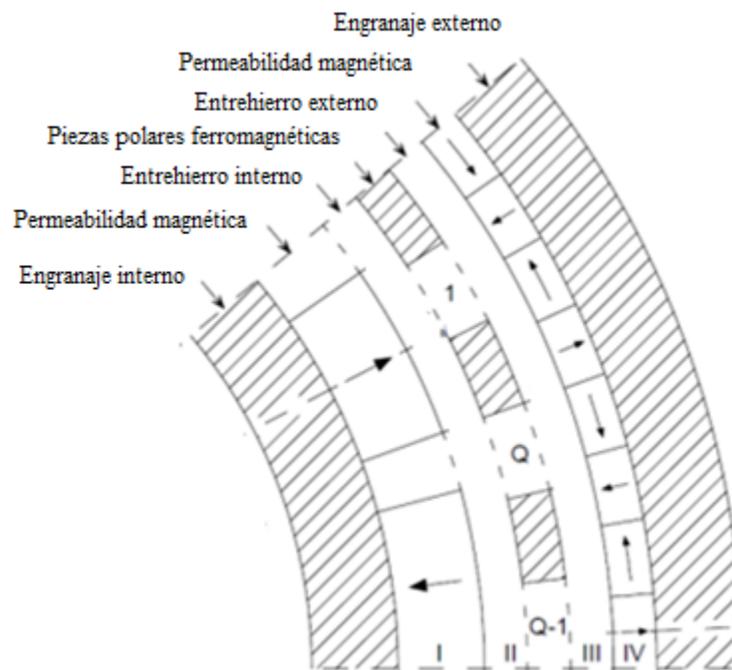
##### 1.4.1. Estructura del engranaje magnético coaxial

El engranaje magnético coaxial (siglas en inglés CMG) consiste principalmente de un engranaje externo e interno y un anillo estacionario ubicado en el medio de los dos rotores (ver **Figura 1.6**). Tanto el engranaje externo e interno emplean imanes permanentes (PMs) y para establecer buenas rutas magnéticas, el anillo estacionario estará hecho de láminas delgadas de materiales ferromagnético denominado como piezas polares (PPs) ferromagnéticas



**Figura 1.6** Estructura de los engranajes magnéticos coaxiales [34]

La estructura de los CMG contará con un pequeño espacio de aire entre el anillo estacionario y los PMs de cada rotor. Este espacio de aire se denominará entrehierro (ver **Figura 1.7**) y su función es establecer una transmisión eficaz de campos magnéticos. Cabe mencionar que el anillo estacionario estará conformado por los PPs ferromagnéticos (ver **Figura 1.7**). Asimismo, los PMs de cada rotor van a poseer una permeabilidad magnética definida y con una simbología de fechas (ver **Figura 1.7**).

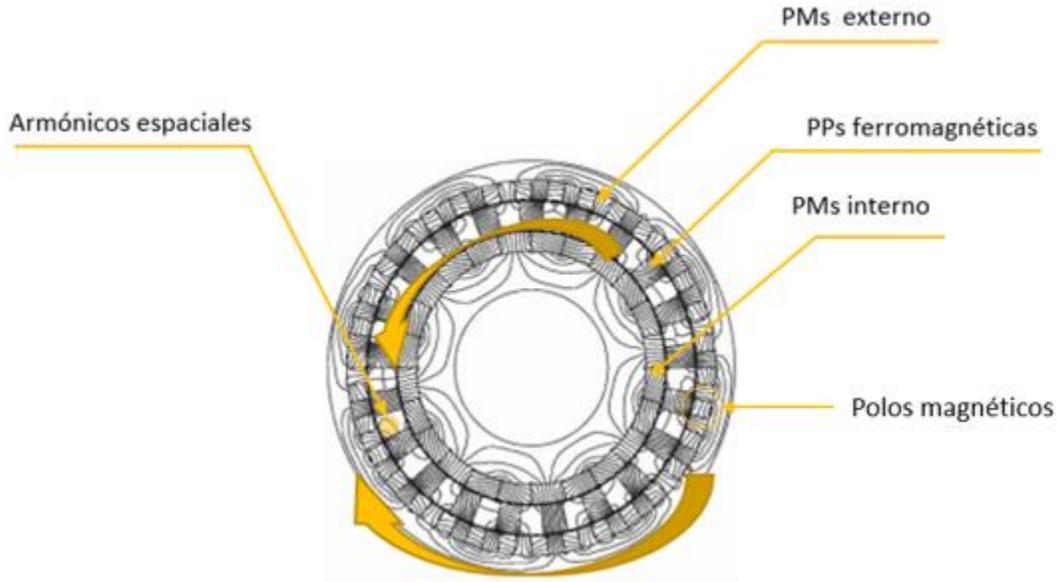


**Figura 1.7** Estructura de los engranajes magnéticos coaxiales [29]

#### 1.4.2. Funcionamiento del engranaje magnético coaxial

El funcionamiento del engranaje magnético coaxial (sigla en inglés CMG) se basa en la modulación de los campos magnéticos de los imanes PMs en cada uno de los engranajes. Esto se da mediante el uso de las piezas polares (PPs) ferromagnéticas, de modo que los PMs en los engranajes tengan el número requerido de polos magnéticos necesarios para que los armónicos espaciales<sup>1</sup> sean los apropiados (ver **Figura 1.8**). Los armónicos espaciales se crean por la interacción de los engranajes externo e interno y las PPs ferromagnéticas. Además, que serán el medio por el cual se transmitirá el campo magnético y por ende el torque.

<sup>1</sup> Armónicos espaciales: Son las rutas magnéticas que puede tener un imán permanente y estos estarán basado en el principio de superposición; es decir, en la densidad del campo magnético [37].



**Figura 1.8** Movimiento del engranaje magnético coaxial [29]

Para describir la distribución de densidad de flujo a una distancia radial  $r$ , se requiere de las siguientes fórmulas:

Para el componente radial:

$$B_r(r, \theta) = [\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos (mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0)] \times [\lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos(jn_s(\theta - \Omega_s t))] \quad (1.2)$$

Para el componente tangencial:

$$B_\theta(r, \theta) = [\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin ( (mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0))] \times [\lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) \cos(jn_s(\theta - \Omega_s t))] \quad (1.3)$$

Donde  $p$  es el número de pares de polos del engranaje magnético,  $n_s$  es el número de piezas polares ferromagnéticas,  $\Omega_r$  y  $\Omega_s$  son las velocidades de rotación del engranaje magnético y las piezas polares respectivamente. Además,  $b_{rm}$  y  $b_{\theta m}$  son los coeficientes de Fourier para los componentes radiales y circunferenciales de la distribución de densidad de flujo respectivamente. Del mismo modo,  $\lambda_{rj}$  y  $\lambda_{\theta j}$  son coeficientes de Fourier para las

funciones de modulación asociadas con los componentes radial y circunferencial de las piezas polares ferromagnéticas respectivamente.

### 1.4.3. Dimensionamiento de los engranajes magnéticos coaxiales

Para determinar el dimensionamiento de los CMG, se deberá de analizar primeramente las ecuaciones 1.2 y 1.3. El comportamiento de la distribución de densidad de flujo se determina por la distribución de densidad de flujo sin las PPs ferromagnéticas [Representado en el componente radial:  $\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{rm}(r) \cos(mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0)$  y representado en el componente tangencial:  $\sum_{m=1,3,5,\dots} b_{\theta m}(r) \sin((mp(\theta - \Omega_r t) + mp\theta_0))$ ] y por la función de modulación de las PPs ferromagnéticas [Representado en el componente radial:  $\lambda_{r0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{rj}(r) \cos(jn_s(\theta - \Omega_s t))$  y representado en el componente tangencial:  $\lambda_{\theta 0}(r) + \sum_{j=1,2,3,\dots} \lambda_{\theta j}(r) \cos(jn_s(\theta - \Omega_s t))$ ]. En este caso, se considerará únicamente la densidad de flujo sin las PPs dado que nos permite determinar el número de pares de polos que puede utilizar los engranajes magnéticos y la velocidad de rotación de los armónicos espaciales producidos por los PMs de los engranajes de alta y baja velocidad [36]. Esto se expresa de la siguiente forma:

$$p_{Hs}(m, k) = mp_{Hs} + kn_s \quad (1.4)$$

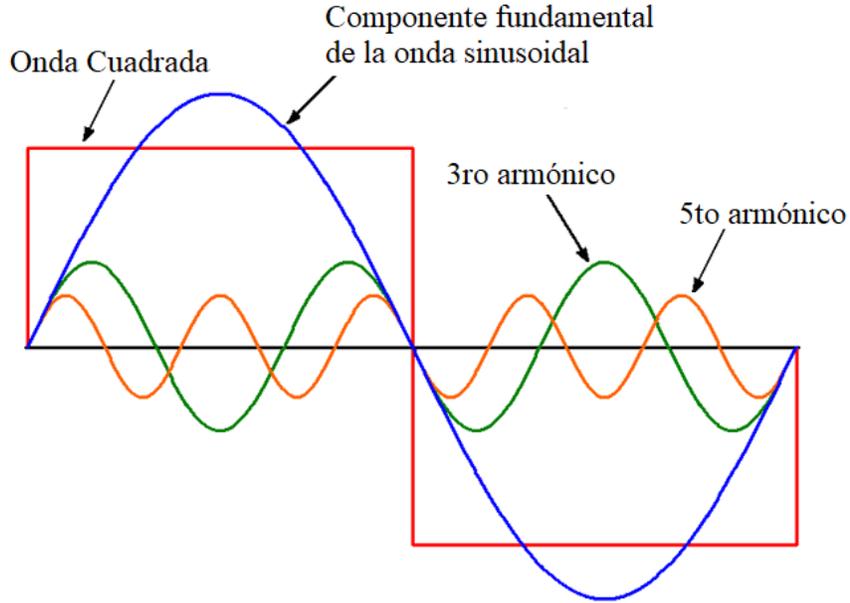
$$p_{Ls}(m, k) = mp_{Ls} + kn_s \quad (1.5)$$

$$\Omega_{Hs}(m, k) = \frac{mp_{Hs}}{mp_{Hs} + kn_s} \Omega_{Hs} + \frac{kn_s}{mp + kn_s} \Omega_s \quad (1.6)$$

$$\Omega_{Ls}(m, k) = \frac{mp_{Ls}}{mp_{Ls} + kn_s} \Omega_{Ls} + \frac{kn_s}{mp_{Ls} + kn_s} \Omega_s \quad (1.7)$$

Donde  $p_{Hs}$  es el número de pares de polos magnéticos permanentes en el engranaje de alta velocidad (Hs),  $p_{Ls}$  es el número de pares de polos en el engranaje de baja velocidad (Ls) y  $n_s$  es el número del PP ferromagnéticas. Además, el  $\Omega_{Hs}$ ,  $\Omega_{Ls}$  y  $\Omega_s$  son las velocidades de rotación del Hs, Ls y PP respectivamente. Los  $\Omega_{Hs}(m, k)$  y  $\Omega_{Ls}(m, k)$  son las velocidades de los armónicos espaciales presentes en los engranajes de alta y baja velocidad respectivamente. El valor m representa los números armónicos impares de orden superior (1, 3, 5, 7, 9, 11, etc.) dado que nos da la posibilidad de cambiar la forma de la onda fundamental

magnética por un flujo sinusoidal con mayor ciclos positivos y negativos (ver figura 1.9) [39]. Esto nos servirá para conseguir un mejor sistema de potencia del CMG.



**Figura 1.9** Ondas con armónicos impares [39]

Si reemplazamos las ecuaciones 1.4 y 1.5 en las velocidades de rotación del Hs y Ls (ecuaciones 1.6 y 1.7); se evidencia que la velocidad de los armónicos espaciales es diferente a las velocidades de los engranajes externos e internos. Por lo cual, si se quiere transmitir una mayor densidad de torque, tanto el número de imanes permanentes del engranaje de HS ( $p_{HS}$ ) como el engranaje de LS ( $p_{LS}$ ) deberán ser igual al número de pares de polos del PPs ( $n_s$ ).

$$n_s = p_{HS} + p_{LS} \quad (1.8)$$

Dado que la combinación  $m = 1, k = -1$ , dan como resultado el armónico espacial más grande, la relación de transmisión ( $G_r$ ) será expresada de la siguiente forma:

$$G_r = \frac{n_s - p_{LS}}{p_{HS}} \quad (1.9)$$

Se pueden tomar dos casos diferentes. El primero es fijar la velocidad del PP y tomar la entrada / salida de los  $p_{LS}$  y  $p_{HS}$ .

$$G_r = -\frac{p_{Ls}}{p_{Hs}} \quad (1.10)$$

El segundo es fijar el LS y tomando la entrada / salida del PP y del Hs respectivamente, lo que resulta en:

$$G_r = \frac{n_s}{p_{Hs}} \quad (1.11)$$

Por lo cual, para garantizar una transmisión de potencia más alta, se utilizará la ecuación 1.10 puesto que simplifica el diseño mecánico del engranaje magnético y a su vez el aumento de torque [36]. Una vez definido la cantidad de PMs y PPs ferromagnéticas en la periferia de los engranajes magnéticos, se procederá a determinar la geometría de los PMs, PPs ferromagnéticas, el entrehierro y el radio del eje de entrada. Cabe mencionar que el espesor del núcleo de acero de los engranajes interno y externo también se están considerando (ver **Figura 1.10**).

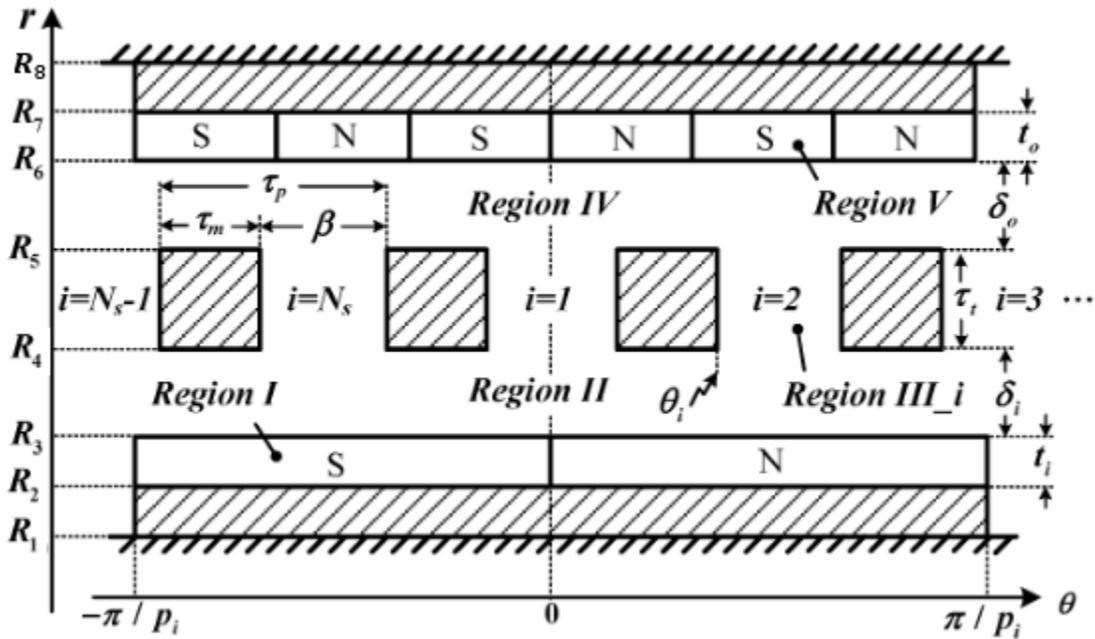


Figura 1.10 Modelo analítico en el sistema de coordenadas pseudopolares [46]

Si bien los engranajes magnéticos tienen una geometría circular, el análisis se dará por medio de un sistema de coordenadas pseudopolares dado que nos facilitará la identificación de las diferentes regiones existentes en los engranajes magnéticos [46]. Como se muestra en la **Figura 1.10**, el engranaje magnético se divide en 5 regiones:

- La región I y la región V representan los PMs interno y externos
- La región II y la región IV representan el entrehierro
- La región III representan las PPs de modulación ( $i = 1, 2, 3 \dots N_s$ ).

Estas regiones estarán definidas por los radios a interno y externos de los PMs y de los PPs ( $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8$ ). Cabe resaltar que cada uno será determinado por los requerimientos iniciales de diseño y por la relación de transmisión de los engranajes magnéticos. A continuación, se mostrará las siguientes ecuaciones:

$$R_2 = R_1 + L_{C1} \quad (1.12)$$

$$R_3 = R_2 + L_{m1} \quad (1.13)$$

$$R_4 = R_3 + g \quad (1.14)$$

$$R_5 = R_4 + L_p \quad (1.15)$$

$$R_6 = R_5 + g \quad (1.16)$$

$$R_7 = R_6 + L_{m2} \quad (1.17)$$

$$R_8 = R_7 + L_{C2} \quad (1.18)$$

Donde  $R_1$  es el radio del eje de entrada,  $R_2$  es el radio interno del engranaje de alta velocidad,  $R_3$  es el radio externo del engranaje de alta velocidad,  $R_4$  es el radio interno de PP,  $R_5$  es el radio externo de PP,  $R_6$  es el radio interno del engranaje de baja velocidad,  $R_7$  es el radio externo del engranaje de baja velocidad,  $R_8$  es el radio externo del engranaje de baja velocidad (núcleo de acero),  $L_{C1}$  es el espesor del engranaje de alta velocidad (núcleo de acero),  $L_{C2}$  es el espesor del engranaje de baja velocidad (núcleo de acero),  $g$  es el

entrehierro,  $L_{m1}$  es el espesor del engranaje de alta velocidad,  $L_{m2}$  es el espesor del engranaje de baja velocidad y  $L_p$  es el espesor del PP.

#### 1.4.4. Relación de velocidades

Al igual que los engranajes mecánicos, los engranajes magnéticos pueden transmitir potencia a diferentes relaciones de velocidades. Esto quiere decir que el engranaje externo e interno giran a diferentes velocidades en donde el engranaje interno tendrá un RPM mayor pero un torque menor. La relación de velocidades se basa principalmente en el dimensionamiento de los PMs de los engranajes y de las PPs ferromagnéticas (relación de transmisión  $G_r$ ). Para ello, se utilizará las ecuaciones 1.9 para relacionarlo con las ecuaciones de velocidad de giro (ecuación 1.6 y 1.7).

$$\Omega_{HS} = -G_r \times \Omega_{LS} \quad (1.19)$$

Donde el  $\Omega_{HS}$  y  $\Omega_{LS}$  son las velocidades de rotación del Hs y del Ls respectivamente. El signo negativo significa que los dos rotores están girando en direcciones contrarias como se muestra en la **Figura 1.9**.

#### 1.4.5. Campos magnéticos del engranaje magnético coaxial

Los campos magnéticos en el CMG son construidos por los PMs del engranaje externo e interno. A fin de determinar la influencia de los campos magnéticos al torque transmitido, se utilizará el principio de superposición<sup>2</sup>. Cabe señalar que no afectará la configuración de los armónicos espaciales del campo magnético. Además, la interacción de giro de los dos engranajes no será afectada dado que lo que se quiere lograr es una transmisión de torque estable, más aún si los dos engranajes giran a diferentes velocidades. Asimismo, solo se está considerando las interacciones que se dan entre los PMs de los engranajes.

En esta parte, se utilizará únicamente la distribución de densidad del flujo magnético sin las PPs ferromagnéticas. Por lo cual, los componentes radial y tangencial estará expresado de la siguiente forma:

---

<sup>2</sup> El principio de superposición es el campo magnético que predominante debido a que posee una mayor densidad magnética [37]

Para el componente radial:

$$B_{r_{Ls}} = A(r) \cos (mp_{Ls}(\theta - \Omega_{Ls}t) + mp_{Ls}\theta_1) \quad (1.20)$$

$$B_{r_{Hs}} = B(r) \cos (mp_{Hs}(\theta - \Omega_{Hs}t) + mp_{Hs}\theta_2) \quad (1.21)$$

Para el componente tangencial:

$$B_{\theta_{Ls}} = C(r) \sin (mp_{Ls}(\theta - \Omega_{Ls}t) + mp_{Ls}\theta_1) \quad (1.22)$$

$$B_{\theta_{Hs}} = D(r) \sin (mp_{Hs}(\theta - \Omega_{Hs}t) + mp_{Hs}\theta_2) \quad (1.23)$$

Donde los  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son los ángulos de fase inicial del Ls y Hs respectivamente. Los coeficientes  $A, B, C, D$  son todas las funciones de distancia radial  $r$  y son independientes del ángulo de posición  $\theta$ . Tanto las ecuaciones 1.20, 1.21, 1.22 y 1.23 determinan la densidad que puede tener los campos magnéticos en los PMs de los engranajes como también la interferencia que puede producirse.

Por otro lado, la interacción entre el entrehierro y los PMs de los engranajes tanto interno como externo, crean distorsiones en el campo magnético simulando el efecto de ranurado<sup>3</sup>. Por lo cual, si se desea aproximar el campo magnético en los CMG, se deberá utilizar el campo original sin las PPs ferromagnéticas (ecuaciones 1.20, 1.21, 1.22 y 1.23) con la función de modulación [29]. Cabe señalar que se está aproximando la función para identificar el torque promedio para la transmisión y las ondas de torque, en lugar de proporcionar un cálculo preciso.

$$B_M = B_0 \cdot \lambda^* \quad (1.24)$$

Donde  $B_M$  y  $B_0$  son las densidades de flujo en el entrehierro con y sin anillo estacionario respectivamente y  $\lambda^*$  es la permeabilidad relativa del entrehierro. Esta permeabilidad magnética se dará tanto para el entrehierro externo como el interno.

Para el entrehierro interno y externo se da por:

---

<sup>3</sup> Efecto de ranurado: Es la variación de intensidad de la permeabilidad magnética del entrehierro

$$\lambda_{a_{in}} = \lambda_{0_{in}} + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{a_{k-in}} \cos(kN_s\theta) \quad (1.25)$$

$$\lambda_{a_{out}} = \lambda_{0_{out}} + \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{a_{k-out}} \cos(kN_s\theta) \quad (1.26)$$

$$\lambda_{b_{in}} = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{b_{k-in}} \sin(kN_s\theta) \quad (1.27)$$

$$\lambda_{b_{out}} = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_{b_{k-out}} \sin(kN_s\theta) \quad (1.28)$$

Donde  $N_s$  es el número de segmentos ferromagnéticos en el anillo estacionario y  $\lambda_{0_{in}}, \lambda_{0_{out}}, \lambda_{a_{k-in}}, \lambda_{a_{k-out}}, \lambda_{b_{k-in}}, \lambda_{b_{k-out}}$  son coeficientes de Fourier. Por lo tanto, al expresar la densidad del flujo modulado del entrehierro interno, se necesitará la densidad de flujo magnético del engranaje interno (ecuaciones 1.20 y 1.22) y la permeabilidad relativa del entrehierro (ecuaciones 1.25 y 1.27) dado que, en este caso, hay campos magnéticos relativos (creados por las PPs ferromagnéticas) que están interactuando entre sí.

$$B_{r1_{in}} = \lambda_{a_{in}} B_{rLs}(R_{in}) + \lambda_{b_{in}} B_{\theta Ls}(R_{in}) \quad (1.29)$$

$$B_{\theta 1_{in}} = \lambda_{a_{in}} B_{\theta Ls}(R_{in}) - \lambda_{b_{in}} B_{rLs}(R_{in}) \quad (1.30)$$

Por otro lado, la densidad de flujo magnético que desarrolla en el entrehierro externo es diferente al interno dado que estará influenciado por los campos magnéticos generados por los PMs del engranaje interno. Por ello, la densidad del flujo externo estará expresado por la densidad del flujo magnéticos del engranaje externo (ecuaciones 1.21, 1.23) y la permeabilidad relativa del entrehierro (ecuaciones 1.26 y 1.28).

$$B_{r1_{out}} = \lambda_{a_{out}} B_{rLs}(R_{out}) + \lambda_{b_{out}} B_{\theta Ls}(R_{out}) \quad (1.31)$$

$$B_{\theta 1_{out}} = \lambda_{a_{out}} B_{\theta Ls}(R_{out}) - \lambda_{b_{out}} B_{rLs}(R_{out}) \quad (1.32)$$

Del mismo modo, para el estado excitado, la densidad de flujo en el entrehierro se expresa de la siguiente forma:

Para el entrehierro interno se da por:

$$B_{r2_{in}} = \lambda_{a_{in}} B_{rHs}(R_{in}) + \lambda_{b_{in}} B_{\theta Hs}(R_{in}) \quad (1.33)$$

$$B_{\theta 2_{in}} = \lambda_{a_{in}} B_{\theta Hs}(R_{in}) - \lambda_{b_{in}} B_{rHs}(R_{in}) \quad (1.34)$$

Para el entrehierro externo se da por:

$$B_{r2_{out}} = \lambda_{a_{out}} B_{rHs}(R_{out}) + \lambda_{b_{out}} B_{\theta Hs}(R_{out}) \quad (1.35)$$

$$B_{\theta 2_{out}} = \lambda_{a_{out}} B_{\theta Hs}(R_{in}) - \lambda_{b_{in}} B_{rHs}(R_{out}) \quad (1.36)$$

Donde  $R_{in}$  y  $R_{out}$  son los radios del entrehierro interno y externo respectivamente.

Finalmente, la densidad total de flujo en el entrehierro interno y externo se define por la densidad de flujo modulado (ecuaciones 1.29, 1.30, 1.31 y 1.32) y excitado (ecuaciones 1.33, 1.34, 1.35 y 1.36) del entrehierro.

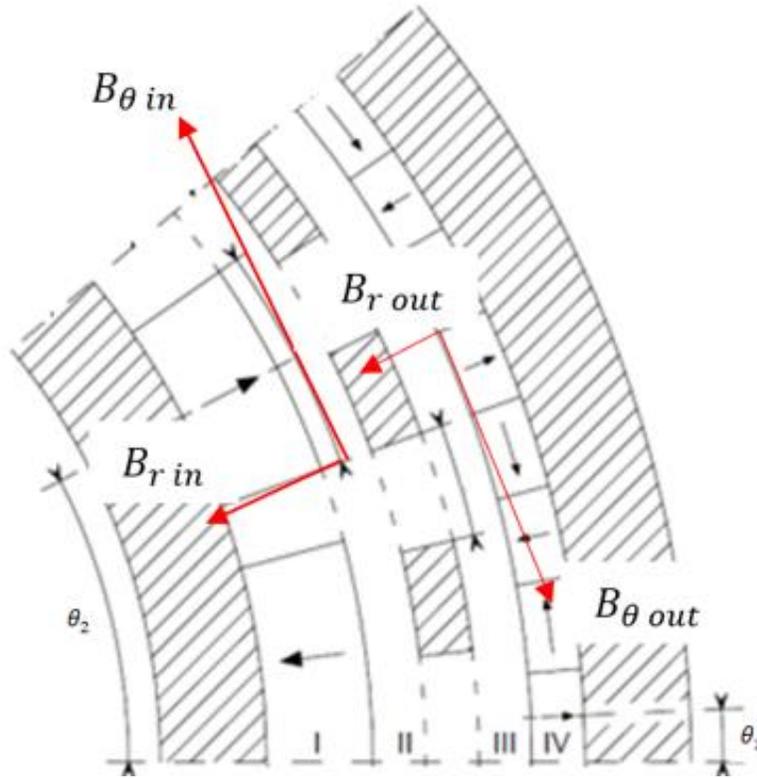
$$B_{r_{in}} = B_{r1_{in}} + B_{r2_{in}} \quad (1.37)$$

$$B_{\theta_{in}} = B_{\theta 1_{in}} + B_{\theta 2_{in}} \quad (1.38)$$

$$B_{r_{out}} = B_{r1_{out}} + B_{r2_{out}} \quad (1.39)$$

$$B_{\theta_{out}} = B_{\theta 1_{out}} + B_{\theta 2_{out}} \quad (1.40)$$

Estas ecuaciones se muestran en la **Figura 1.11** y tendrá las direcciones mostradas. Estas direcciones se dan por las ondas magnéticas en los imanes permanentes ubicado en la periferia de los engranajes.



**Figura 1.11** Direcciones de los campos magnéticos en el entrehierro externo e interno [29]

#### 1.4.6. Torque magnético

La transmisión de potencia se produce por las interacciones entre las fuerzas electromagnéticas y los momentos mecánicos. Al poseer varias cargas puntuales que se desplazan en un campo magnético definido (ecuaciones 1.37, 1.38, 1.39, 1.40), las ecuaciones se volverán más complicadas, por lo cual, si queremos determinar la influencia que tiene la densidad de flujo en el entrehierro interno y externo en la transmisión de potencia, se utilizará los tensores de estrés de Maxwell [14]. En el entrehierro interno, podemos expresar de la siguiente forma el torque magnético promedio desarrollado en el engranaje interno utilizando el tensor de estrés de Maxwell.

$$T_{in} = \frac{L_{ef} R_{in}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r_{in}} B_{\theta_{in}} d\theta \quad (1.41)$$

De igual forma se expresa el torque magnético promedio desarrollado en el engranaje externo.

$$T_{out} = \frac{L_{ef} R_{out}^2}{\mu_0} \int_0^{2\pi} B_{r_{out}} B_{\theta_{out}} d\theta \quad (1.42)$$

Donde  $L_{ef}$  es la longitud axial efectiva,  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética. Si bien el torque magnético se expresa de una forma analítica, esta tiene un impacto en el diseño de los engranajes magnéticos. El dimensionamiento de los PMs y PPs afectan la cantidad de torque que puede transmitir debido a que hay existen combinaciones que dan como resultado un bajo torque magnético [46]. El factor de par dentado ( $c_{f0}$  y  $c_{fi}$ ) determinará las combinaciones ideales de los PMs y PPs con la finalidad de obtener un mayor torque:

$$c_{f0} = \frac{2p_{Ls}(p_{Ls} + p_{Hs})}{N_{co}} \quad (1.43)$$

$$c_{fi} = \frac{2p_{Hs}(p_{Ls} + p_{Hs})}{N_{ci}} \quad (1.44)$$

Donde  $N_{co}$  es el mínimo común múltiplo de  $2p_{Ls}$  y  $p_{Ls} + p_{Hs}$  y  $N_{ci}$  es el mínimo común múltiplo de  $2p_{Hs}$  y  $p_{Ls} + p_{Hs}$ .

#### 1.4.7. Eficiencia de los engranajes magnéticos coaxiales

La eficiencia de los engranajes magnéticos coaxiales se determinará por medio del torque magnético y la velocidad de reducción. Estos dos factores nos indicaran las pérdidas de energía en la transmisión magnética debido a las pérdidas de hierro en los engranajes magnéticos coaxiales. Las pérdidas de hierro son la perdida magnética de los PMs debido al desgaste del material. Para ello se utilizará la siguiente formula

$$e = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.45)$$

Donde el  $P_{in}$  y  $P_{out}$  son las potencias del engranaje interno y externo respectivamente, el cual ambas se calculará de la siguiente forma

$$P = T \times \Omega \quad (1.46)$$

Donde el  $T$  es el torque (representado en Nm) y  $\Omega$  es la velocidad de giro (representado en rad/s).

## **1.5. Modelo Matemático**

En esta sección se describirán los diferentes modelos matemáticos de magnetización que experimentan los PMs y las PPs ferromagnéticas. Cabe señalar que se utilizara la magnetización que tengan una mayor influencia en la transmisión de torque.

### **1.5.1. Magnetización radial**

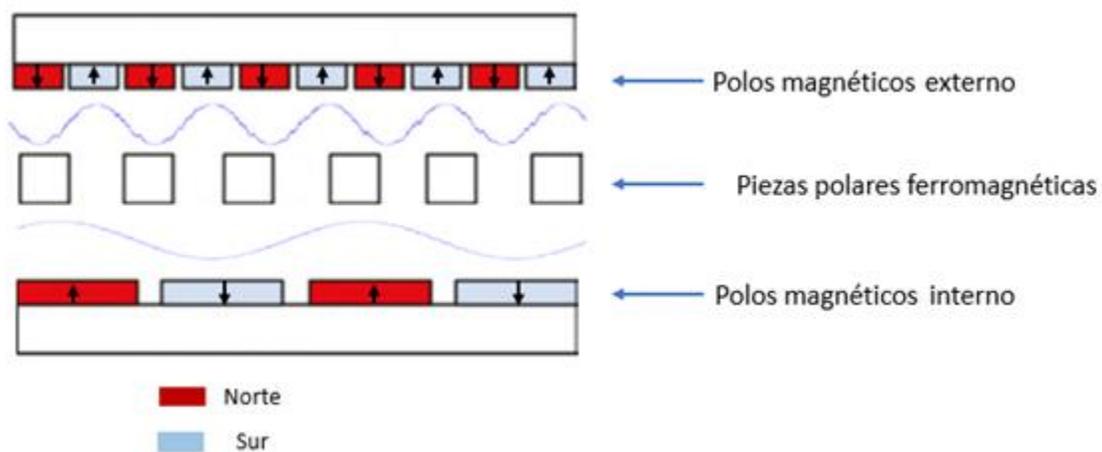
El modelo matemático de la magnetización radial se enfoca en encontrar soluciones en donde la permeabilidad sea la misma que la del aire dado que se requiere que el espacio en el entrehierro interno sea uniforme. Para lograr dicho fin, se utilizará PM no magnetizados con la misma permeabilidad que los PMs en el cual estará ubicado en el medio de los PMs (ver **Figura 1.8**). Aunque las PM individuales normalmente se magnetizan de manera uniforme, una magnetización radial nos daría una aproximación a los engranajes magnéticos dado que, en su estructura, poseen una gran cantidad de polo. Además, si los engranajes magnéticos tienen un bajo número de polos, cada polo normalmente se segmenta debido a la facilidad de fabricación, por lo tanto, los polos también podrían aproximarse mediante una magnetización radial [14].

### **1.5.2. Magnetización de Halbach**

El modelo matemático de la magnetización de Halbach se enfoca en proporcionar campos magnéticos grandes que permiten un comportamiento sinusoidal inherente con pequeñas ondulaciones de par y una magnetización auto blindada. Esto puede dar como resultado un campo magnético superior a la magnetización radial dado que por el principio de superposición [29]. En la práctica, la magnetización de Halbach emplea un número discreto de segmentos por par de polos y en base al número de segmentos adjuntados, el flujo magnético aumenta por un lado mientras que por el otro disminuye. Las direcciones de magnetización en cada segmento en los imanes magnéticos influyen en la distribución del campo volviéndose más sinusoidal y de acuerdo con el número de segmentos adjuntados por par de polo nos dará un resultado óptimo que otro [29].

## 1.6. Armónicos espaciales

Los armónicos espaciales son las rutas magnéticas que puede tener un imán permanente con la única condición de que el campo magnético con mayor densidad será el predominante denominado principio de superposición. Esto suprime los campos magnéticos menos densos mientras que por el otro lado lo aumentan [37]. Esto hace que la distribución del campo se vuelva más sinusoidal (ver **Figura 1.12**) siendo beneficioso para el torque transmitido dado que disminuye las interferencias y aumenta la densidad del flujo magnético (ecuaciones 1.37, 1.38, 1.39, 1.40).



**Figura 1. 12** Configuración de flujo de los engranajes magnéticos [26]

Como se muestra en la **Figura 1.12**, las curvas azules son los campos magnéticos producidos por los rotores interno y externo. Las flechas negras representan la dirección de magnetización de los imanes permanentes. En este caso, el rotor interno produce el campo magnético con un armónico dominante. Este campo es modulado por las piezas polares ferromagnéticas para generar un campo magnético con un dominante de cinco armónicos. Cabe resaltar que el número de armónicos está relacionado con el número de pares de polos magnéticos utilizados tanto en el rotor externo como interno.

### **1.7. Principio de análisis a través de simulación multifásica**

Con el fin de diseñar y analizar los engranajes magnéticos giratorios en 2D, se utilizará el software COMSOL Multiphysics modulo AC/DC. El software simulará la interacción de los campos magnéticos modulados, a través de las piezas polares ferromagnéticas, y los campos magnéticos de los engranajes. Esta interacción se le denomina armónicos espaciales en el entrehierro y estará relacionado con el número de par de polos magnéticos utilizados en los dos engranajes.

### **1.8. Principio de ANOVA**

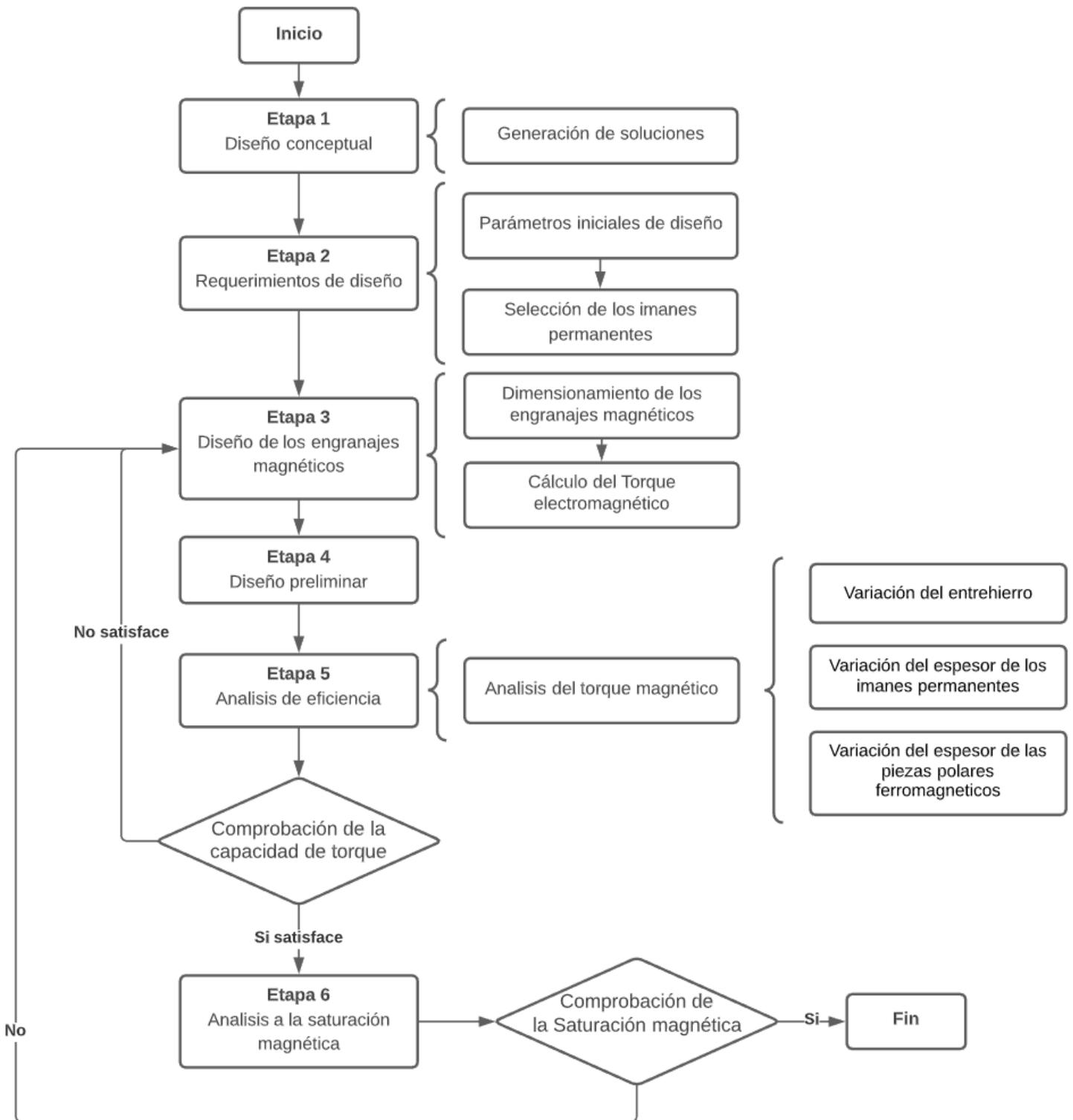
El análisis de varianza (ANOVA) es un método estadístico que nos ayudará a comparar las medias de dos o más grupos de variables. En este caso se utilizará la regresión lineal del ANOVA para el análisis de los datos. Para ello se necesitará establecer nuestras variables tanto de entrada como de salida para el diseño del engranaje magnético. Una vez identificado las variables de entrada (independientes entre sí), se determinarán el impacto que tendrán sobre la variable de salida mediante la tabla ANOVA. Se utilizará el nivel de significancia ( $\alpha$ ) como indicador a las variables de entrada. Para ello, se calculará el P-value de todas las variables de entrada con el fin de compararlo con el  $\alpha$ . De acuerdo con el resultado de la comparación, se determinará si las variables de entrada tendrán un impacto relevante para la variable de salida.

## CAPÍTULO II

### METODOLOGÍA

En el presente capítulo se describe el procedimiento que se realizó para desarrollar el proyecto de tesis. Como se muestra en la **Figura 2.1**, se planteó el diseño conceptual de los engranajes magnéticos de acuerdo con la problemática de la tesis. En segundo lugar, se definió los parámetros de diseño de los engranajes magnéticos. Para ello, se especifican los requerimientos iniciales de los engranajes magnéticos en base a los engranajes planetarios utilizados en el sistema e-CVT con configuración Dual. Esto con la finalidad de comprobar en qué aspectos los engranajes magnéticos son una mejor alternativa que los engranajes planetarios. Una vez determinado los requerimientos iniciales, se seleccionó el imán permanente que se va a utilizar en la simulación de los engranajes magnéticos. En tercer lugar, se diseñaron los engranajes magnéticos en base al dimensionamiento y al torque magnético. Para dimensionar los engranajes magnéticos se tuvo que especificar el número de imanes permanentes e imanes ferromagnéticos como también el dimensionamiento que van a tener estos imanes (grosor, largo y ancho). Para ello, se utilizó el torque magnético como un indicador para la selección de las mejores combinaciones para el dimensionamiento. En cuarto lugar, se diseñó un modelo preliminar con todos los cálculos anteriormente realizados. En quinto lugar, analizó la eficiencia de los engranajes magnéticos tomando en cuenta el entrehierro, el espesor de los imanes permanentes y el espesor de las piezas polares ferromagnéticas. Finalmente, se analizó la saturación magnética de los imanes permanentes con la finalidad de prever la degradación de las propiedades magnéticas de los imanes permanentes utilizado en los engranajes magnéticos.

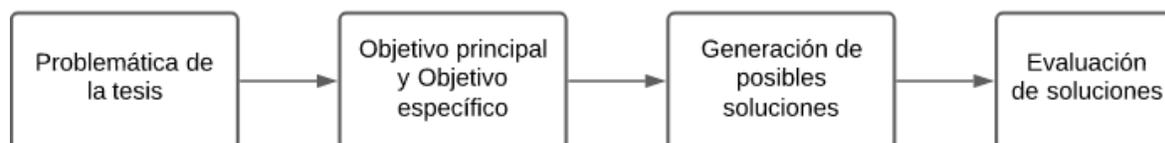
En los próximos subcapítulos, se explicará detalladamente los pasos correspondientes para el desarrollo de los objetivos principales y específicos de la tesis.



**Figura 2.1** Diagrama de flujo de la metodología

## 2.1 Diseño conceptual

El diseño conceptual es la etapa preliminar de cualquier proyecto de ingeniería. En ella, se plantean las diferentes soluciones que puedan cubrir los problemas iniciales del proyecto. Como se muestra en la **Figura 2.2**, primero se planteó la problemática de la tesis luego se definió los objetivos principales y específicos para que finalmente se genere las posibles soluciones de la problemática y se eligiese la mejor propuesta entre todas.



**Figura 2.2** Resumen del diseño conceptual

En la industria automotriz, las transmisiones mecánicas mayormente utilizan engranajes mecánicos debido a su alta densidad de torque y alta eficiencia; sin embargo, al ser un componente mecánico de contacto, este suele perder energía debido al diseño de los dientes, la fricción, la vibración, el ruido y el calor [9, 16]. Por ello, se presentará una lista de las posibles soluciones (ver **Tabla 2.1**) que puede sustituir a los engranajes mecánicos por los engranajes magnéticos mencionados en el marco teórico.

Soluciones	Tipo de engranajes magnético
Solución 1	Engranaje magnético recto
Solución 2	Engranaje magnético planetario
Solución 3	Engranaje magnético armónico
Solución 4	Engranaje concéntrico lineal
Solución 5	Engranaje magnético axial
Solución 6	Engranaje magnético coaxial

**Tabla 2.1** Generación de posibles soluciones

Los criterios que se van a utilizar para la selección del tipo de engranaje magnético serán en base a los engranajes planetarios utilizados en el sistema e-CVT. Para lo cual, en la siguiente tabla, se mostrará la densidad de torque de cada solución planteada.

Tipo de engranajes magnético	Densidad de torque (KNm/m <sup>3</sup> )
Engranaje magnético recto	10-20
Engranaje magnético planetario	≈ 100
Engranaje magnético armónico	140-180
Engranaje concéntrico lineal	70-150
Engranaje magnético axial	70
Engranaje magnético coaxial	90-200

**Tabla 2.2** Densidad de torque de los diferentes tipos de engranaje magnético [41]

En base a los datos mostrados en la **Tabla 2.2**, se procederá a evaluar los distintos tipos de engranajes magnéticos.

Engranaje magnético recto: Si bien estos engranajes tienen la misma topología que los engranajes mecánicos y pueden realizar la mayoría de las tareas que se le requieran. Estos no poseen una capacidad de transmisión de torque alta (ver **Tabla 2.2**) por lo que no se tomará como alternativa viable.

Engranaje magnético planetario: A diferencia del caso anterior, estos engranajes magnéticos poseen una alta densidad de torque debido al número de satélites utilizados; sin embargo, la complejidad de diseño aumenta, además de que hay un límite para el número de pares de polos que puede poseer la estructura del engranaje antes de que disminuya su fuerza magnética [33]. Asimismo, el engranaje magnético planetario puede tener interferencias magnéticas, si es que se utiliza un número alto de satélites [33]. Por lo cual, si hay un sobredimensionamiento o una baja fuerza magnética para la transmisión de potencia en los engranajes magnéticos planetarios, estas no se podrán utilizar como una alternativa a los engranajes planetarios mecánicos.

Engranaje magnético armónico: Los engranajes magnéticos armónicos poseen una alta densidad de torque (ver **Tabla 2.2**) y una elevada relación de transmisión [42]. Su funcionamiento es similar al de su contraparte mecánica siendo el más indicado para reemplazar a los engranajes planetarios utilizados en el sistema e-CVT. Sino fuera que, en la práctica, es difícil de implementar debido a su estructura compleja como también la

necesidad de utilizar un rotor flexible de baja velocidad (torque suave). Por todos los inconvenientes que posee este tipo de engranaje magnético, no será considerado como una solución para esta tesis.

Engranaje concéntrico lineal: Los engranajes concéntricos lineales poseen una alta densidad de torque (ver **Tabla 2.2**); sin embargo, esta densidad de torque está en función a la longitud que puede poseer [41]. Esto genera que los anillos ferromagnéticos ubicados y espaciados entre el engranaje magnético grande y pequeño (ver **Figura 1.5**), posean una sensibilidad longitudinal axial, perdiendo rendimiento y fuerza magnética [41]. En resumen, la topología de este tipo de engranaje magnético requiere de un amplio espacio siendo un inconveniente para el poco espacio que se dispone en los vehículos híbridos.

Engranaje magnético axial: El principio de funcionamiento de los engranajes magnéticos axiales es igual al de los engranajes coaxiales y lineales. Posee una mediana densidad de torque debido a las bajas fuerzas axiales entre el engranaje magnético de alta y baja velocidad [42]. Con la finalidad de mejorar el campo magnético axial y aumentar la densidad de torque, estos requieren estar aislados herméticamente entre los ejes de entrada y salida [42]. Si bien las condiciones para el funcionamiento de los engranajes magnéticos axiales son específicas, estas no se acomodan al sistema e-CVT.

Engranaje magnético coaxial: Los engranajes magnéticos coaxiales poseen la más alta densidad de torque entre todas las topologías de los engranajes magnéticos (ver **Tabla 2.2**) siendo capaces de competir con los engranajes mecánicos (promedio:  $150 \text{ KNm}/m^3$ ) [42]. Entre todas las diferentes estructuras de los engranajes magnéticos, estas son las menos complejas y la más flexible a cambios. Por todo lo mencionado anteriormente, se va a utilizar los engranajes magnéticos coaxiales como la solución que se va a diseñar en esta tesis.

## 2.2 Requerimientos iniciales de diseño

El diseño de los engranajes magnéticos tendrá como parámetros iniciales del tren motriz híbrido. En ella se presentarán los motores utilizados en los vehículos híbrido; asimismo, se especificará la potencia de diseño, la velocidad y el torque máximos de los diferentes componentes que lo conforman.

Componentes	Parámetros	Valor
MCI	Potencia Máxima	102 kW / 6000 RPM
	Torque Máximo	170 Nm / 3400 RPM
MG1	Velocidad Máxima	10500 RPM
	Potencia Nominal	30 kW
	Torque Máximo	81 Nm
MG2	Velocidad Máxima	8500 RPM
	Potencia Nominal	50 kW
	Torque Máximo	203 Nm

**Tabla 2.3** Parámetros iniciales del tren motriz híbrido [44]

El tren motriz híbrido está conformado por 3 motores (ver **Tabla 2.3**) en donde el diseño de los engranajes magnéticos será en base a las especificaciones técnicas del motor eléctrico (MG2). En los vehículos híbridos, el motor eléctrico es considerado como el motor principal debido a que en todo momento está funcionando, ya sea, en el arranque, en media o alta velocidad. En contraste con el MCI que solo funciona en altas velocidades y para recargar la batería a través del MG1 cuando el vehículo está frenando. Por ello, se quiere mejorar el rendimiento del MG2 reemplazando los engranajes planetarios 2 (ver **Figura 1.1**) por engranajes magnéticos coaxiales. Según [9], el sistema e-CVT con configuración Dual tiene una mejor eficiencia que el sistema e-CVT con la configuración series/paralelo debido a que este utiliza 2 engranajes planetarios, uno para el MCI y otro para el MG2, en donde el MG2 obtiene un mejor rendimiento en los arranques, en bajas velocidades y le permite tener el torque máximo en altas velocidades sin sobre esforzarse.

### 2.2.1 Características del engranaje planetario en el MG2

Una vez definido los componentes que se van a utilizar, se procederá a mostrar las medidas del engranaje planetario utilizado en el sistema e-CVT con configuración Dual. Cabe mencionar que en los vehículos híbridos solo poseen una etapa de reducción para el MG2 [9, 11] (ver **Figura 1.1**).

Características	Valor	Unidad
Ancho de diente	20	mm
Módulo	1.25	-
Nº dientes del sol	37	-
Nº dientes planeta	47	-
Nº dientes ring	130	-
Diámetro Sol	46.25	mm
Diámetro planeta	58.75	mm
Diámetro corona	161.87	mm
Ángulo de presión	20	-
Relación de transmisión	4.5	

**Tabla 2.4** Características del engranaje planetario [45]

Como se muestra en la **Tabla 2.4**, el engranaje mecánico planetario tiene una relación de transmisión de 4.5 y una eficiencia de 92% [50]. Estos factores son clave dado que nos ayudará a dimensionar nuestros engranajes magnéticos y validar si es que son mejores que los engranajes planetarios.

### 2.2.2 Selección de los imanes permanentes

Para la selección de los imanes permanentes (PMs), se tomará en cuenta la densidad de torque, la densidad de flujo magnético (Br) y la fuerza coercitiva magnética<sup>4</sup> (Hc). Para ello, se dispone de tres diferentes PMs (ver **Tabla 2.5**) que, gracias a su composición, poseen un campo magnético más fuerte que otros tipos de PM [34].

---

<sup>4</sup> Fuerza coercitiva magnética: Es la resistencia a ser desmagnetizado

Aleación	Tipo de PMs
Aleación 1	Alnico
Aleación 2	SmCo
Aleación 3	NdFeB

**Tabla 2.5** Tipo de PMs [34]

Como se muestra en la **Tabla 2.6**, los PMs con la aleación de Alnico destaca principalmente en su alto Br; sin embargo, este tipo de PM es vulnerable a la desmagnetización (por su bajo Hc) siendo un inconveniente para la operatividad de los engranajes magnéticos. Por otro lado, los PMs con la composición SmCo poseen una mayor resistencia a la desmagnetización, pero teniendo un menor Br que los Alnico. En cambio, los PMs de NdFeB superan a los Alnico en resistencia a la desmagnetización como también supera en Br a los PMs SmCo. Asimismo, posee la misma resistencia a la desmagnetización de los PMs de SmCo y la misma densidad del flujo magnético de los PMs de Alnico.

	Alnico	NdFeB	SmCo
Br (T)	1.4	1.4	1.1
Hc (kA/m)	275	2000	2000
BH (máx.) (kJ/m <sup>3</sup> )	88	440	200

**Tabla 2.6** Comparación de las propiedades magnéticas [34]

Si bien el PM de NdFeB superan al PM de Alnico y al PM de SmCo en propiedades magnéticas; aún falta analizar la densidad de torque que pueden transmitir. Por ello, se tomará un estudio previo (realizado en [34]) en donde se analizó el rendimiento de la transmisión de torque de los tres PMs anteriormente mencionados. Cabe mencionar que los tres PMs fueron probados con las mismas condiciones iniciales, como se muestra en la **Tabla 2.7**.

	Alnico	NdFeB	SmCo
Densidad ( $g/cm^3$ )	6.7	7.5	8.4
Volumen ( $cm^3$ )	394	394	394
Composición	Al 8 – 12% Ni 15 – 26% Co 5 – 24% Fe, Cu (balance)	Nd 29 – 32.5% Fe 63.9 – 68.6% B 1.1 – 1.2% Re 0.6 – 1.2%	Sm 35% Co 60% Fe, Cu (balance)
Torque del rotor interno (Nm)	47	795	755
Torque del rotor externo (Nm)	200	3376	3210

**Tabla 2.7** Comparación de torque [34]

Al analizar, en conjunto, todas las propiedades que nos ofrecen estos PMs, se llegó a la conclusión que los PMs de NdFeB son los más indicados para los engranajes magnéticos. Esto se debe a que puede transmitir un mayor torque (ver **Tabla 2.7**) y posee mejores propiedades magnéticas (ver **Tabla 2.6**) que los demás PMs.

### 2.3 Diseño de los engranajes magnéticos coaxiales

El diseño de los engranajes magnéticos coaxiales consiste en determinar el dimensionamiento de los engranajes de alta y baja velocidad, mediante la cantidad de PMs y PPs ferromagnéticos utilizadas en su estructura. Se utilizará como referencia la **Tabla 2.3 y 2.4** para definir los radios de cada engranaje. Además, se emplearán las mismas tablas para determinar el largo, el grosor y el paso de arco de cada PMs. Por otro lado, el torque magnético nos indicará si es que la combinación de pares de polos escogidos para los engranajes magnéticos tiene la capacidad de transmitir el torque del MG2. Por último, se estará definiendo el modelo matemático que se utilizará para el diseño de los engranajes magnéticos coaxiales.

### 2.3.1 Cálculo del dimensionamiento de los engranajes magnéticos coaxiales

El dimensionamiento de los engranajes magnéticos coaxiales se determinará mediante los datos iniciales de la **Tabla 2.4**, la relación de transmisión de los engranajes magnéticos, la cantidad de polos magnéticos que posee cada engranaje y el radio a la cual se ubica los PMs y las PPs (ver **Figura 1.12**). Se comenzará definiendo la relación de transmisión de los engranajes magnéticos coaxiales. Para ello, se utilizará la ecuación 1.10 y el dato inicial en la **Tabla 2.4**. Si bien la ecuación original se expresa con un signo negativo, la relación de los PMs no será afectada dado que ese signo solo indica la dirección de giro de los engranajes (ver **Figura 1.8**). Luego de haber despejado las ecuaciones 1.8 y 1.10, se procederá a plantear las posibles combinaciones de PMs de baja y alta velocidad como también el número de PPs ferromagnéticos utilizados en el entrehierro.

$p_{Hs}$	$p_{Ls}$	$n_s$
2	9	11
4	18	22
6	27	33
8	36	44

**Tabla 2.8** Posibles combinaciones para los PMs y PPs

Como se muestra en la **Tabla 2.8**, solo hay 4 posibles combinaciones para los PMs y PPs ferromagnéticas. Esto se debe a que la relación de transmisión de los engranajes planetarios es alta dándonos como resultado valores sumamente altos en el engranaje de baja velocidad ( $p_{Ls}$ ) y en las PPs ferromagnéticas ( $n_s$ ). Al estar utilizando una alta concentración de pares de polos en los engranajes de alta y baja velocidad, la eficacia de los campos magnéticos disminuirá debido a la interferencia magnética [33]. Esto se da cuando hay una alta densidad magnética en un espacio delimitado, obstruyendo así los armónicos espaciales de los PMs. Para mejorar la distribución de los campos magnéticos en las 4 posibles combinaciones de los PMs y PPs ferromagnéticas, se utilizará el modelo matemático de Halbach. Esto con la finalidad de mitigar la interferencia magnética mediante arreglos en la dirección de la permeabilidad magnética. Una vez definida las posibles combinaciones de los PMs y de la PPs ferromagnéticas, se procederá a determinar los radios de los engranajes

magnéticos y el espesor de los PMs y PPs. Para ello, se utilizarán las ecuaciones 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16, 1.17 y 1.18. Como primer análisis, se estará tomando una longitud del entrehierro mínima con la finalidad de garantizar un espacio efectivo para los armónicos espaciales. Este espacio efectivo está definido en [48]. Después de haber definido la longitud del entrehierro, se utilizará la saturación de la densidad del flujo magnético para definir el espesor de los PMs. Esto se debe a que las concentraciones altas en la densidad del flujo magnético producen pérdidas magnéticas en los PMs por lo que, si se quiere reducir esta concentración, se requerirá que los PMs tengan un mayor espesor. Para determinar la saturación de la densidad del flujo magnético, se utilizará las simulaciones con el software COMSOL. Por otro lado, el espesor de los PMs y de las PPs ferromagnéticos estará determinado por la anchura circunferencial siendo esta un valor referencial para el dimensionamiento. Por último, se estará utilizando el diámetro del sol de los engranajes planetarios como el espacio total que puede ocupar el engranaje magnético. Todo esto se muestra en la **Tabla 2.9**.

Simbología	Descripción	Valor
$g$	Longitud del Entrehierro interno y externo	0.5 mm
$L_{m in}$	Espesor del HSR	10 mm
$L_{m out}$	Espesor del LSR	10 mm
$L_p$	Espesor del PP	10 mm
$R_8$	Radio externo del LSR	161 mm
$R_7$	Radio externo del LSR	154mm
$R_6$	Radio interno del LSR	144 mm
$R_5$	Radio externo PP	143.5 mm
$R_4$	Radio interno PP	133.5 mm
$R_3$	Radio externo HSR	133 mm
$R_2$	Radio interno HSR	123 mm
$R_1$	Radio del eje interior	46.3 mm

**Tabla 2.9** Diseño inicial del engranaje magnético [45, 48]

### 2.3.2 Cálculo del Torque magnético

El torque magnético de los engranajes magnéticos coaxiales se determinará mediante los datos iniciales de la **Tabla 2.3**, la fórmula analítica del torque y el factor del par dentado. Se comenzará definiendo el factor del par dentado debido a que nos ayudará a seleccionar la mejor combinación de PMs y PPs ferromagnéticas (ver **Tabla 2.8**). Según [46], al tener un mayor factor del par dentado, se obtendrá un mayor torque magnético para lo cual se estará utilizando las ecuaciones 1.43 y 1.44. De acuerdo con estas ecuaciones, se podrá un obtener un alto factor de torque siempre y cuando los  $N_{co}$  y  $N_{ci}$  sean valores bajos. Para ello, no se debe de cumplir la siguiente condición: si uno de los  $p_{Ls}$  y  $p_{Hs}$  es par, el otro debería ser impar y viceversa. Esta regla se aplica en la selección de las combinaciones candidatas de  $p_{Ls}$  y  $p_{Hs}$  como se muestra en la **Tabla 2.10**

$p_{Hs}$	$p_{Ls}$	$n_s$
4	18	22
8	36	44

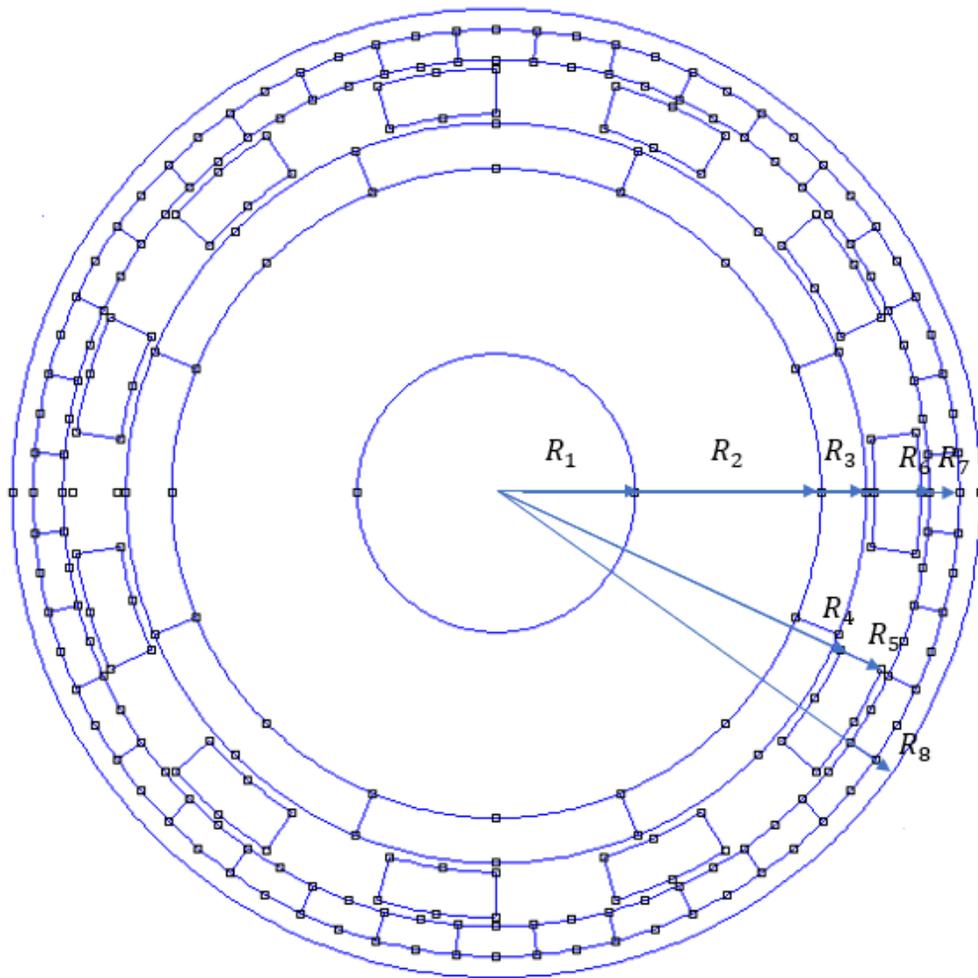
**Tabla 2.10** Selección de las combinaciones para los PMs y PPs

Una vez determinada las mejores combinaciones de  $p_{Ls}$  y  $p_{Hs}$  como también de haber asegurado un alto factor de par dentado, se procederá a calcular el torque magnético de los engranajes magnéticos. Si bien se tiene el torque de entrada dado por el MG2 (ver **Tabla 2.3**), se deberá determinar el torque magnético de salida. Esta estará influenciada por el flujo magnético de los PMs, los armónicos espaciales y el dimensionamiento de los engranajes magnéticos. Mediante las ecuaciones 1.41 y 1.42, podemos identificar que el flujo de los campos magnético está relacionado con la fuerza magnética el cual tendrá dos vectores tanto en el engranaje de alta velocidad ( $\overline{B_{\theta in}}$  y  $\overline{B_{r in}}$ ) como el engranaje baja velocidad ( $\overline{B_{\theta out}}$  y  $\overline{B_{r out}}$ ). Esto se muestra en la **Figura 1.11**. Por lo cual el torque enviado por MG2 será utilizado para definir a los vectores de entrada  $\overline{B_{\theta in}}$  y  $\overline{B_{r in}}$  y mediante los armónicos espaciales se determinarán los vectores de salida  $\overline{B_{\theta out}}$  y  $\overline{B_{r out}}$ . Para poder aplicar las ecuaciones 1.41 y 1.42, se deberá determinar el dimensionamiento de los engranajes magnéticos por lo que se estará utilizando la **Tabla 2.9**. Cabe resaltar que el diámetro exterior

y la longitud del engranaje magnético son fijos debido a que ese es el espacio en el que se dispone el engranaje planetario en los vehículos híbridos. Por lo que los parámetros que impacta directamente en la capacidad de transmisión del torque magnético serían la longitud del entrehierro y el espesor tanto de los PMs como de los PPs ferromagnéticos.

## 2.4 Diseño preliminar

El diseño preliminar consistirá en determinar las dimensiones iniciales del engranaje magnético como también definir la cantidad de PMs y PPs ferromagnéticas utilizadas en el diseño del engranaje magnético coaxial. Como se mencionó en párrafos anteriores, se utilizará la **Tabla 2.9** para el dimensionamiento inicial del engranaje magnético coaxial. Las medidas son dadas de esta forma debido a que se está utilizando las medidas del engranaje planetario como referencia (ver **Tabla 2.4**). Adicionalmente, la longitud inicial del entrehierro, el espesor de los PMs y el espesor de las PP ferromagnéticas será asumido por el diseñador esto con la finalidad de tener un modelo preliminar. Con respecto a la combinación para los PMs y PPs ferromagnéticas, se escogerá la primera combinación ( $p_{Hs}=4$  y  $p_{Ls}=18$ ) debido a que esta no presentará, de igual medida, saturación magnética como la segunda combinación de PMs y PPs ( $p_{Hs}=8$  y  $p_{Ls}=36$ ). Según [47], la saturación magnética se dará por una concentración de flujo magnético, en este caso, la primera combinación posee una menor cantidad de pares de polos a comparación de la segunda combinación de PMs y PPs que es prácticamente el doble. Cabe resaltar que 1 PM corresponde a 2 polos; es decir, la primera combinación posee 8 polos en el engranaje de alta velocidad y 36 polos en el engranaje de baja velocidad mientras que la segunda combinación posee 16 polos en el engranaje de alta velocidad y 72 polos en el engranaje de baja velocidad. Con todo lo anteriormente dicho, se obtendrá un diseño preliminar (ver **Figura 2.3**) que se utilizará como base para evaluar las variables más influyentes del torque magnético. Para ello, se utilizará el método estadístico ANOVA.



**Figura 2.3** Diseño preliminar del engranaje magnético coaxial

## 2.5 Análisis de eficiencia

El análisis de eficiencia de los engranajes magnéticos coaxiales se realizará mediante las gráficas obtenidas por el Software COMSOL. En ellas se analizará el torque magnético tanto de entrada como de salida para luego determinar la eficiencia mediante la ecuación 1.45. Cabe mencionar que el torque magnético estará en función al dimensionamiento del engranaje magnético y a los campos magnéticos.

### 2.5.1 Análisis del torque magnético y velocidad

Para realizar el análisis del torque magnético, se tendrá que variar los componentes que tengan una mayor influencia en el torque magnético de salida. Según [46], al variar el entrehierro, el espesor de los PMs y el espesor de las PPs ferromagnéticas causan una alteración en el torque de salida debido a las diferentes interacciones magnéticas como la reluctancia magnética y la concentración de flujo magnético. Estos puntos se explicarán más adelante. Para calcular la relación de velocidad que se utilizará para el análisis del torque será calculado mediante la ecuación 1.19 y los datos iniciales de la **Tabla 2.3**. Los resultados se muestran en la **Tabla 2.11**

Simbología	Descripción	Valor
$G_r$	Relación de transmisión	4.5
$\Omega_{HS}$	Velocidad de HSR	8500 RPM
$\Omega_{LS}$	Velocidad de LSR	1888.88 RPM

**Tabla 2.11** Relación de velocidades ideal

#### 2.5.1.1 Variación del entrehierro

La variación del entrehierro consistirá en aumentar el espacio que separa a los engranajes de alta y baja velocidad del anillo estacionario (ver **Figura 1.6**). Utilizando las medidas iniciales de la **Tabla 2.9**, se determinará por medio de gráficos, el impacto que tendrá al torque magnético de salida. Para identificar el grado de impacto que tiene el entrehierro sobre al torque magnético de salida, se utilizará el método ANOVA. Para ello se utilizará el entrehierro interno ( $G_{in}$ ) y el entrehierro externo ( $G_{out}$ ) como variables de entrada y como variable de salida al torque magnético de salida ( $T_{out}$ ). Una vez definido las variables tanto de entrada como de salida, se incrementará la longitud del entrehierro interno mientras que el entrehierro externo se mantiene constante luego se hará lo mismo, pero a la inversa. Esto tendrá como finalidad de encontrar cuál de las dos variables de entrada tenga un impacto mayor sobre la variable de salida.

### 2.5.1.2 Variación del espesor de los imanes permanentes

La variación del espesor de los imanes permanentes consistirá en aumentar el espesor de los PMs ubicados en la periferia de los engranajes de alta y baja (ver **Figura 1.6**). Al igual que la variación del entrehierro, esta tiene como finalidad de identificar por medio de gráficos, el impacto que tendrá al torque magnético de salida. Se utilizará el método ANOVA para determinar el grado de impacto que tiene sobre el torque magnético de salida. Las variables de entrada son el espesor del imán permanente de alta velocidad ( $L_{m\ in}$ ) y el espesor del imán permanente de baja velocidad ( $L_{m\ out}$ ). La variable de salida es el torque magnético de salida ( $T_{out}$ ). Se comenzará con el incremento del espesor de los PMs del engranaje de alta velocidad mientras que el espesor de los PMs del engranaje de baja velocidad se mantiene constante luego estará se hará de forma inversa. Esto se hará con la finalidad de encontrar la variable de entrada que tenga un impacto mayor sobre la variable de salida.

### 2.5.1.3 Variación del espesor de las piezas polares ferromagnéticas

La variación del espesor de las piezas polares ferromagnéticas consistirá en aumentar el espesor del anillo estacionario (ver **Figura 1.6**). Al igual que las dos variables anteriormente mencionadas, la finalidad es identificar por medio de gráficos, el impacto que tendrá al torque magnético de salida. Se utilizará el método ANOVA para determinar estadísticamente el grado de impacto que tiene el espesor de las piezas polares ferromagnéticas ( $L_p$ ) sobre el torque magnético ( $T_{out}$ ). Para iniciar dicha simulación, la variable de entrada (piezas polares ferromagnética) aumentará y con ello se determinará el grado de significancia con respecto a la variable de salida (torque magnético)

## 2.6 Análisis de la saturación magnética

El análisis de la saturación magnética se realizará de manera virtual en el programa COMSOL. El procedimiento por seguir partirá con la creación de la gráfica BH, a fin de establecer un punto de operación en el sistema. Una vez establecido el punto de operación, se procederá a compararlo con los resultados de la simulación para luego determinar si es que los imanes permanentes se encuentran en un estado normal o saturado.

## **CAPÍTULO III**

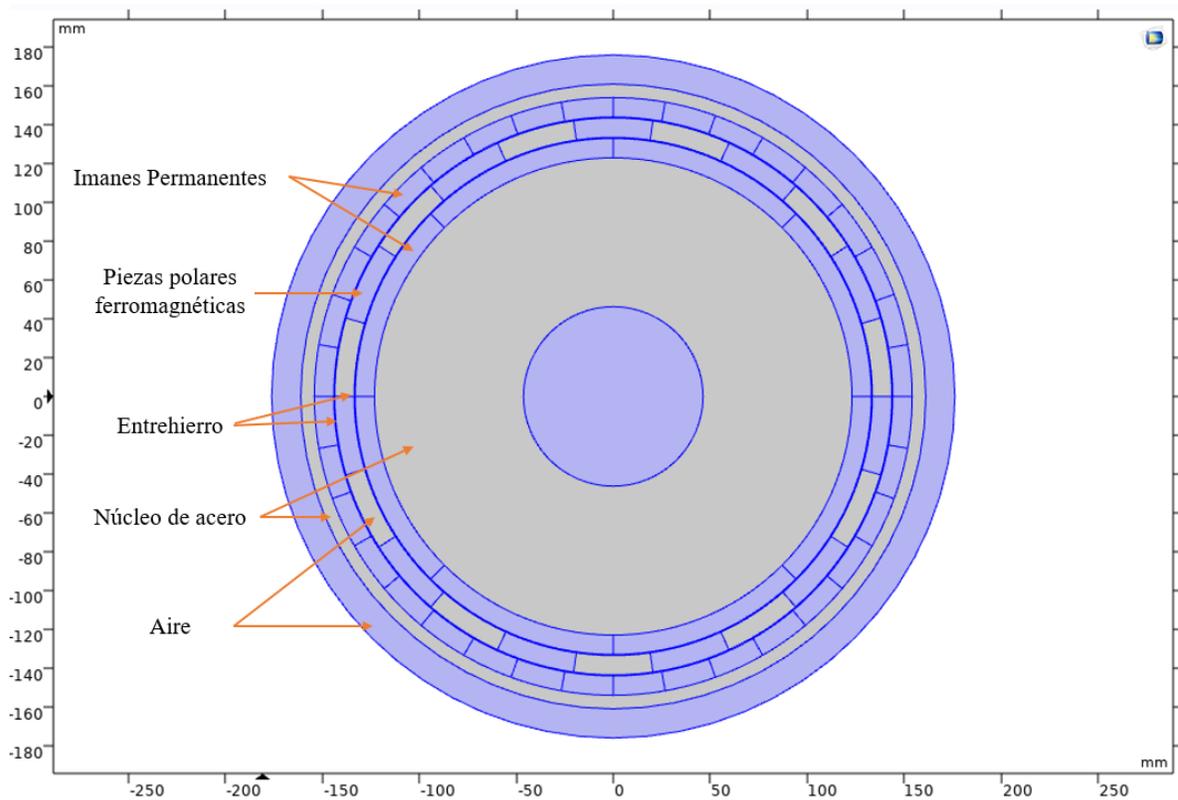
### **RESULTADOS**

En el presente capítulo se muestra los resultados del diseño computacional de los engranajes magnéticos coaxiales para una transmisión e-CVT. En este diseño se tuvo como variables claves el entrehierro, el espesor de los imanes permanentes y el espesor de las piezas polares ferromagnéticas. Se tomó estas variables debido a que tienen un mayor impacto que las demás variables. A estas tres variables se le realizó un análisis de simulación de forma aislada debido a que se quiso determinar el impacto que generó, de forma individual, al diseño de los engranajes magnéticos coaxiales. Dicho análisis, se llevó a cabo en el software COMSOL, en donde se estudió el torque magnético, el campo magnético, la eficiencia del torque y la saturación magnética. Para la simulación, se utilizó todas las posibles configuraciones de los engranajes magnéticos coaxiales ya que con ello se pudo establecer cuáles eran los componentes más relevantes para el diseño de los engranajes magnéticos coaxiales. Para dimensionar tanto al engranaje de alta velocidad (engranaje entrante) como al engranaje de baja velocidad (engranaje de salida), se tuvo que utilizar el software COMSOL. Asimismo, se especificó el modelo matemático, las velocidades de entrada, el material, la densidad del flujo magnético de los imanes permanentes y la orientación de la permeabilidad magnética. De esta manera fue posible obtener los resultados que se mostrarán en los siguientes párrafos.

#### **3.1. Diseño del engranaje magnético coaxial**

Para el diseño de los engranajes magnéticos coaxiales, se tuvo que plantear un diseño base el cual contuvo todas las medidas iniciales del engranaje magnético de alta y baja velocidad. Esto se presentó en la **Tabla 2.9**, el cual tuvo como objetivo el poder establecer las mismas medidas que un engranaje planetario. Esto con el fin de comprobar si es que el engranaje magnético puede reemplazar a un engranaje mecánico en un sistema de transmisión e-CVT. Para ello, se modificaron las variables claves, las cuales poseen un

impacto significativo en el torque magnético, en el campo magnético, en la eficiencia del torque y en la saturación magnética.



**Figura 3.1** Diseño del engranaje magnético coaxial en base al modelo inicial

Como se muestra en la **Figura 3.1**, se tuvo un total de 5 variables, estas son los imanes permanentes, las piezas polares ferromagnéticas, el entrehierro, el núcleo de acero y el aire en donde se escogió los más influyentes para el diseño del engranaje magnético coaxial. Se utilizó el valor del torque magnético como principal fuente de estudio debido a que nos ayudó a plantear cuáles eran las variables significativas para el diseño magnético. Al estudiar el torque magnético, se determinó que el entrehierro, los imanes permanentes y las piezas polares ferromagnéticas son las variables que alteran de gran medida a la transmisión magnética [46]. Esto se debió a que influyen directamente a los vectores de los campos magnéticos (ver **Figura 1.11**) como también a la concentración del flujo magnético (ver **Figura 1.8**) y a los armónicos espaciales (ver **Figura 1.12**). Para poder determinar

cuantitativamente el impacto que tienen dichas variables al diseño final, se simuló de forma individual las tres variables y también se aplicó la tabla ANOVA.

### 3.1.1. Variación del entrehierro

La simulación del entrehierro consistió en variar la longitud tanto del entrehierro interno ( $G_{in}$ ) como del entrehierro externo ( $G_{out}$ ) mientras que las demás variables permanecen constantes. Esto con la finalidad de obtener el impacto real del entrehierro interno y externo hacia el torque magnético. Por lo cual se procedió primero a variar el entrehierro interno manteniendo el entrehierro externo constante para luego realizar el proceso inverso (Ver Anexo 1)

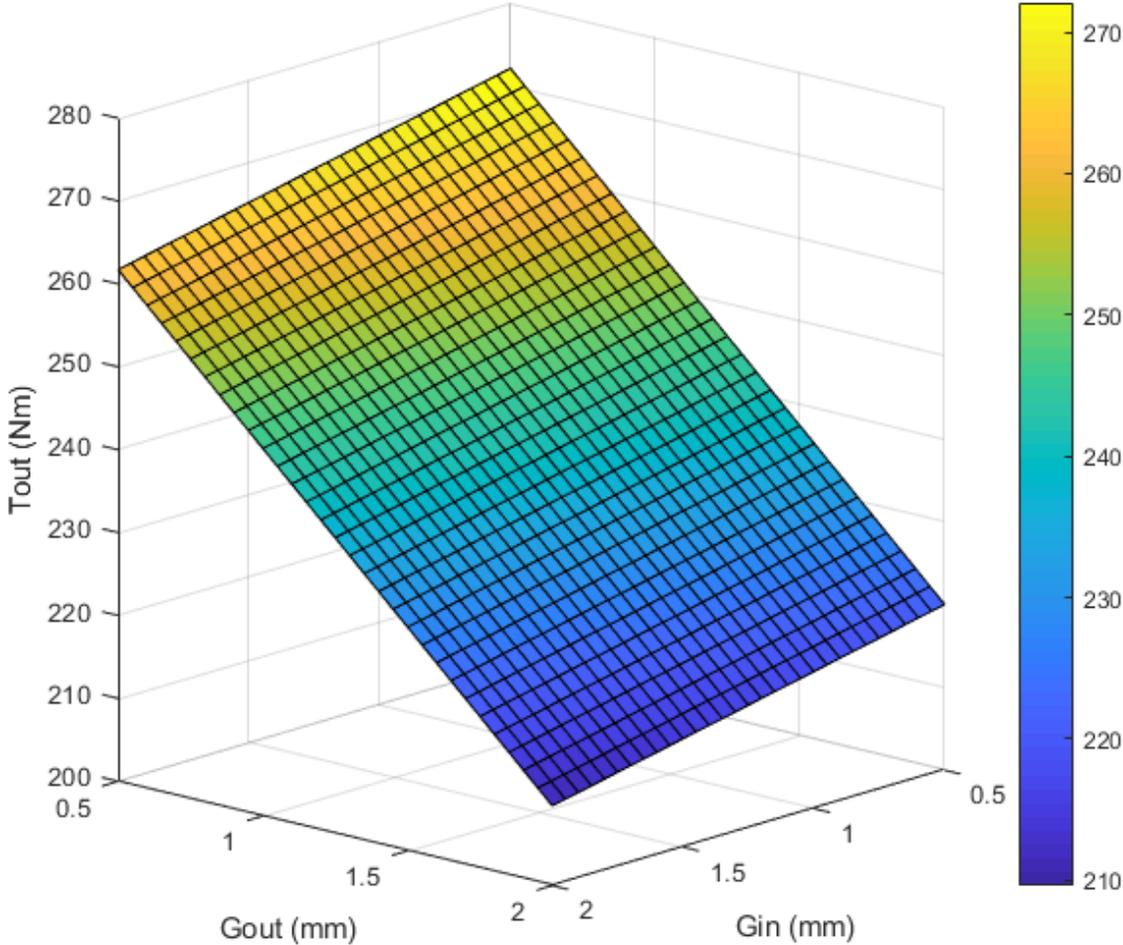


Figura 3.2 Variación del entrehierro interno y externo

Como se muestra en la **Figura 3.2**, el torque magnético disminuye a medida que el entrehierro aumenta. Esto se debió principalmente a la resistencia que tiene un imán permanente al paso de un flujo magnético externo cuando este último posee por un campo magnético propio. Esta propiedad se le denomina reluctancia magnética el cual aumenta cuando los imanes permanentes están más separados. Como se observó en la **Figura 3.2**, el impacto que tuvieron tanto entrehierro interno como el entrehierro externo al torque magnético de salida ( $T_{out}$ ), fueron diferentes. Para ambos casos, el aumento del entrehierro comenzó en 0.5 mm y llegó hasta 2 mm. El cambio del torque magnético con respecto al entrehierro interno no fue tan severo dado que el torque comenzó en 277 Nm y disminuyó hasta 264.5 Nm. Caso contrario fue con el entrehierro externo en donde la disminución llegó a ser hasta 219.9 Nm. La razón por la cual el entrehierro externo tiene un mayor impacto que el entrehierro interno, fue debido a las fugas magnéticas que hay entre los imanes permanentes externos y de las piezas polares ferromagnéticas. Para poder determinar el impacto la longitud tanto del entrehierro interno ( $G_{in}$ ) como del entrehierro externo ( $G_{out}$ ) al torque magnético ( $T_{out}$ ) de forma cuantitativa, se aplicará la tabla ANOVA. En ella fue especificado si las variables estudiadas fueron significativas.

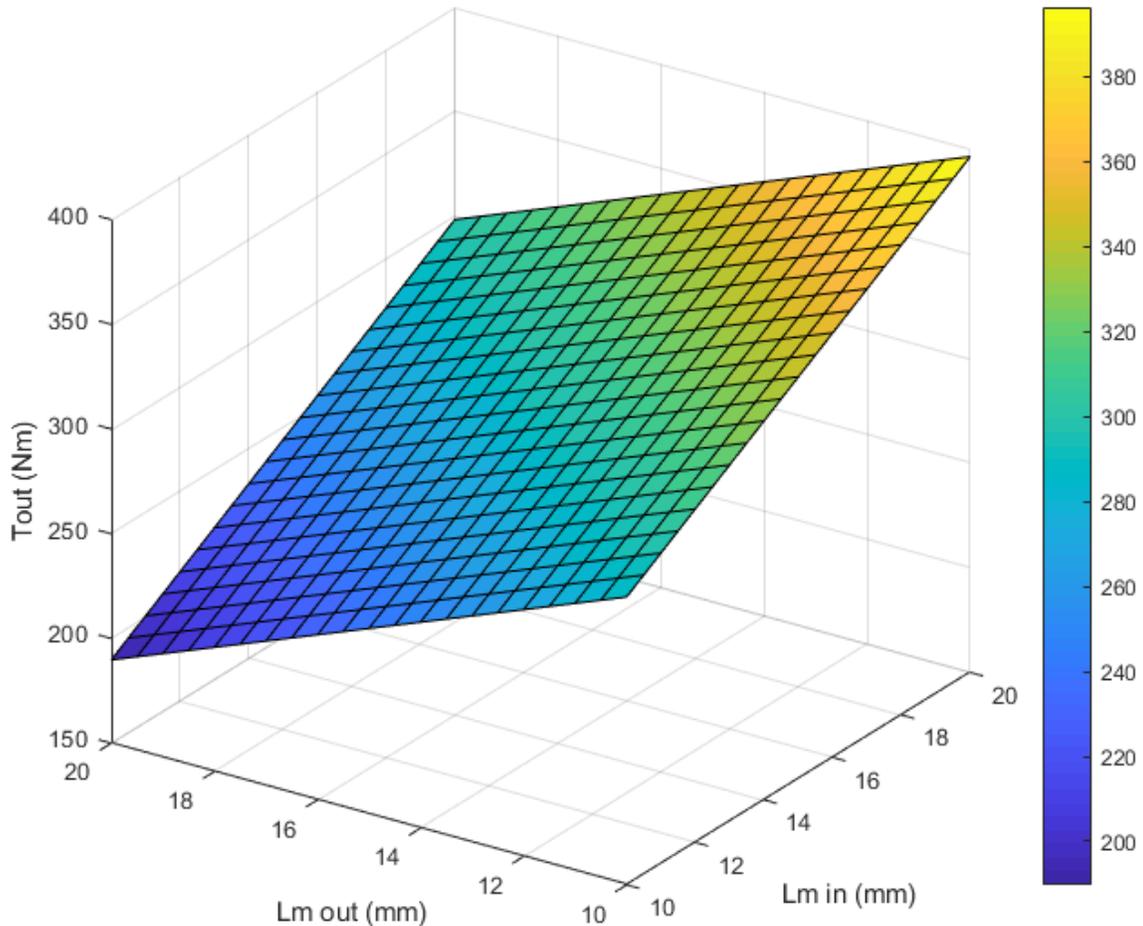
Variable	P-value
$G_{in}$	0.3
$G_{out}$	0.0002

**Tabla 3.1** Tabla de regresión de ANOVA de la longitud del entrehierro interno y externo

Como se muestra en la **Tabla 3.1**, la longitud del entrehierro interno no tiene un impacto tan significativo como el entrehierro externo ( $G_{out}$ ). Esto se debe a que el nivel de significancia ( $\alpha$ ) es del 5%. Por lo tanto, si el P-value es menor al 5%, la variable estudiada tiene una alta relevancia para la variable de salida que en este caso es el torque magnético de salida. Por todo lo anterior mencionado, la variable que tuvo un mayor grado de importancia para el diseño final de los engranajes magnéticos coaxiales fue la longitud del entrehierro externo. Para más información ver Anexo 4.

### 3.1.2. Variación del espesor de los imanes permanentes

La simulación del espesor consistió en variar tanto el espesor del imán permanente de alta velocidad ( $L_{m\ in}$ ) como espesor del imán permanente de baja velocidad ( $L_{m\ out}$ ) mientras que las demás variables permanecen constantes. La finalidad fue la misma que el párrafo anterior y el procedimiento también. (Ver Anexo 2)



**Figura 3.3** Variación del espesor de los imanes permanentes de alta y baja velocidad

Como se muestra en la **Figura 3.3**, el torque magnético aumenta a medida que el espesor del imán permanente de alta velocidad aumenta, caso que no sucede con el imán permanente de baja velocidad. Esto se debió principalmente a dos motivos. El primero fue debido al aumento de la capacidad del flujo magnético por parte de los imanes permanentes; es decir a medida que incrementa el tamaño de un imán permanente también aumenta su

campo magnético. El segundo fue por la concentración del campo magnético en un imán permanente. Esta concentración del flujo magnético creó puntos de saturación en el engranaje haciendo que la fuerza magnética disminuya. Para este caso, el engranaje magnético de baja velocidad posee una alta cantidad de polos magnéticos, el cual, al aumentar el tamaño de estos, su campo magnético aumenta y también la concentración magnética de las mismas debido a que se encuentra en un espacio cerrado y limitado. El caso contrario ocurre con el engranaje magnético de alta velocidad, debido al bajo número de polos magnéticos que posee. Para ambos casos, el aumento del espesor de los imanes permanentes comenzó en 10 mm y llegó hasta 20 mm. El cambio del torque magnético ( $T_{out}$ ) con respecto al espesor del imán permanente de alta velocidad fue severo dado que el torque comenzó en 277 Nm y aumentó hasta 394 Nm. En contraste con el espesor del imán permanente de baja velocidad en donde el torque magnético disminuyó hasta 193.5 Nm. Por lo tanto, se tendrán en cuenta tanto el espesor del imán permanente de alta velocidad como el espesor del imán permanente de baja velocidad debido a que estas dos variables influyen de manera tanto positiva como negativa al torque magnético. Esto se verificó con la tabla ANOVA

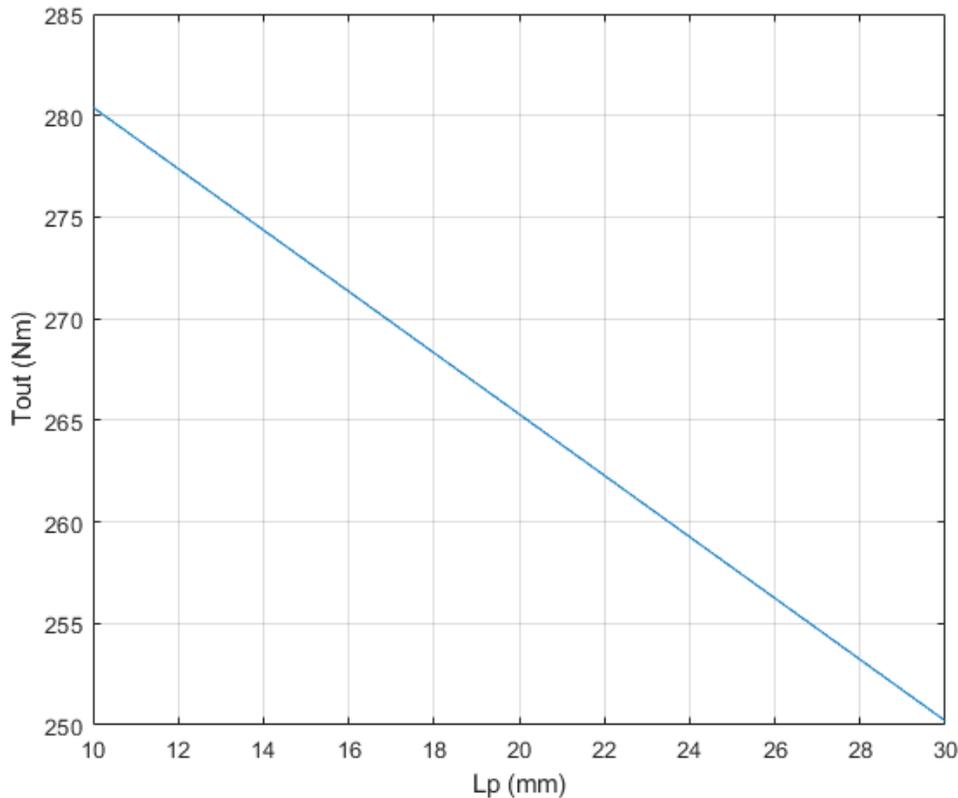
Variable	P-value
$L_{m\ in}$	$6.52 \times 10^{-6}$
$L_{m\ out}$	$1.23 \times 10^{-5}$

**Tabla 3.2** Tabla de regresión de ANOVA del espesor de los imanes permanentes de alta y baja velocidad

Según la **Tabla 3.2**, el espesor del imán permanente de alta velocidad ( $L_{m\ in}$ ) y el espesor del imán permanente de baja velocidad ( $L_{m\ out}$ ) fueron variables de alto impacto para el torque magnético de salida. Esto se debe a que sus valores de P-value fueron menores al 5% ( $\alpha$ ). Con esto se determinó que en efecto ambas variables fueron importantes para el diseño final de los engranajes magnéticos coaxiales (Ver Anexo 5).

### 3.1.3. Variación del espesor de las piezas polares ferromagnéticas

La simulación del espesor consistió en variar el espesor de las piezas polares ferromagnéticas ( $L_p$ ) mientras que las demás variables permanecen constantes. La finalidad fue la misma que los anteriores párrafos. El procedimiento para este caso consistió en aumentar el espesor de  $L_p$  (Ver Anexo 3).



**Figura 3.4** Variación del espesor de las piezas polares ferromagnéticas

Como se muestra en la **Figura 3.4**, el torque magnético disminuye a medida que el espesor de las piezas polares ferromagnéticas aumenta. Esto se debió principalmente a la reluctancia magnética. Para este caso, el aumento del espesor de las piezas polares ferromagnéticas comenzó en 10 mm y llegó hasta 30 mm. El cambio del torque magnético ( $T_{out}$ ) fue no severo dado que el torque comenzó en 277 Nm y disminuyó hasta 248 Nm; sin embargo, el espesor de las PPs ferromagnéticas tiene un impacto negativo en el torque magnético de salida. Para ello, se aplicará la tabla ANOVA con el fin de corroborar el grado de significancia.

Variable	P-value
$L_p$	0.004

**Tabla 3.3** Tabla de regresión de ANOVA del espesor de las piezas polares ferromagnéticas

Según la **Tabla 3.3**, el espesor de las piezas polares ferromagnéticas ( $L_p$ ) fue una variable significativa debido a que su valor de P-value fue menor al 5% ( $\alpha$ ). Por lo tanto, el espesor de las piezas polares ferromagnéticas tuvo una relevancia importante para el diseño final de los engranajes magnéticos coaxiales (Ver Anexo 6).

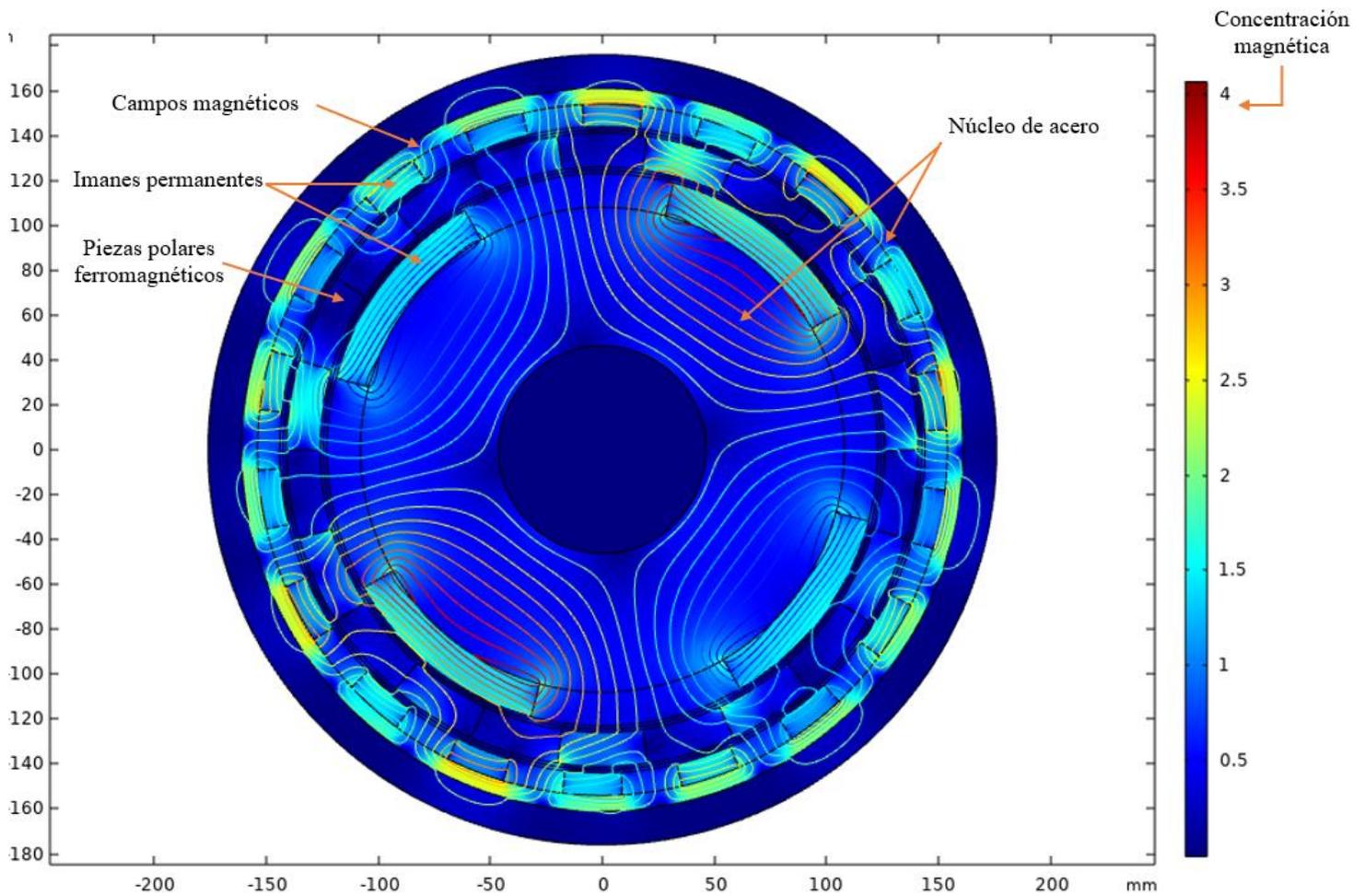
### 3.1.4. Diseño final

Una vez se determinó la influencia del entrehierro, el espesor de los imanes permanentes y el espesor de las piezas polares ferromagnéticas hacia el torque magnético. Se diseñó el engranaje magnético coaxial en base a los criterios mencionados anteriormente dándonos como resultado la siguiente tabla:

Simbología	Descripción	Valor
$L_{m\ in}$	Espesor del HSR	15 mm
$L_{m\ out}$	Espesor del LSR	10 mm
$L_p$	Espesor del PP	15 mm
$G_{in}$	Longitud del Entrehierro interno	3 mm
$G_{out}$	Longitud del Entrehierro externo	3 mm
$R_8$	Radio externo del LSR	161 mm
$R_7$	Radio externo del LSR	154 mm
$R_6$	Radio interno del LSR	144 mm
$R_5$	Radio externo PP	141 mm
$R_4$	Radio interno PP	126 mm
$R_3$	Radio externo HSR	123 mm
$R_2$	Radio interno HSR	108 mm
$R_1$	Radio del eje interior	46.3 mm

**Tabla 3.4** Diseño final del engranaje magnético

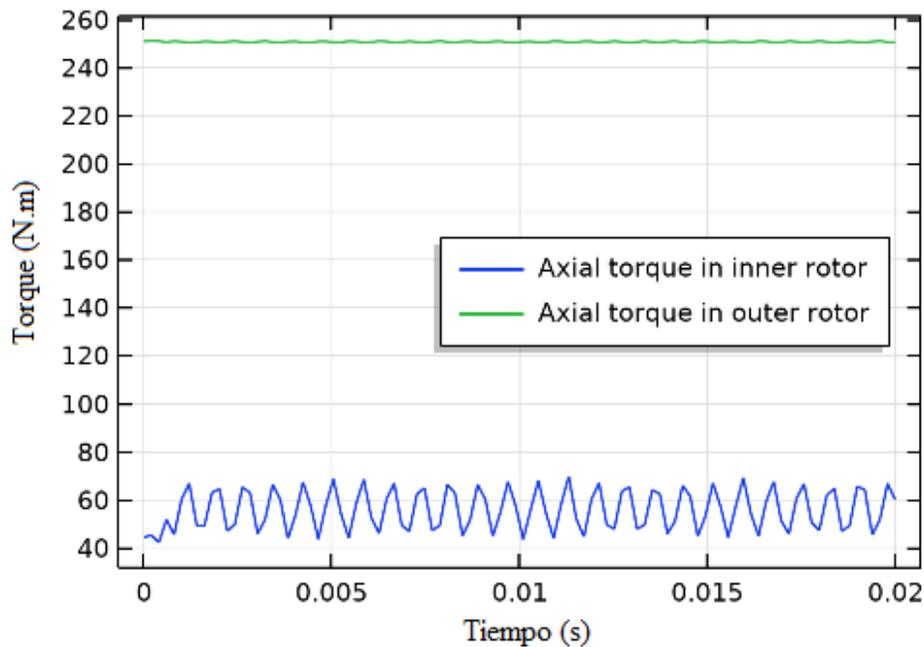
Como se muestra en la **Tabla 3.4**, el espesor de los PMs de alta velocidad ( $L_{m\ in}$ ) fue de 15 mm mientras que el espesor de los PMs de baja velocidad ( $L_{m\ out}$ ) fue de 10 mm. Como se mencionó anteriormente, ambas variables de entrada poseen una relevancia tanto positiva como negativa para el torque magnético de salida. Por lo cual se optó por enfatizar el espesor de las PMs de alta velocidad debido a que esta puede aumentar el torque magnético de salida en cambio el espesor de los PMs de baja velocidad disminuye la capacidad de torque del engranaje magnético coaxial. Si bien este cambio hará que nuestro torque magnético tenga un valor alto, la concentración magnética en el entrehierro provocará una saturación magnética estropeando así el rendimiento de los engranajes magnéticos. Para ello, se plantea modificar tanto el espesor de las PPs ferromagnéticas como a la longitud del entrehierro interno y externo. Si bien estas tres variables de entrada disminuyen en gran medida la capacidad de torque del engranaje magnético coaxial, también disminuye la concentración magnética de los PMs. Esto se debe a que, al aumentar la distancia entre los engranajes de alta y baja velocidad aumenta también la reluctancia y las fugas magnéticas. Por todo lo anterior mencionado, se determinó que el espesor de las PPs ferromagnético fuera de 15 mm mientras que tanto el entrehierro interno como el externo fueran 3 mm. Aunque la longitud del entrehierro interno no tenga una influencia tan significativa a comparación de la longitud del entrehierro externo, es en este espacio en donde se produce la concentración magnética. Por lo cual para evitar que haya una saturación magnética en el entrehierro interno, la longitud debe de aumentar. Todo esto provocado por la alta concentración de flujo magnético emitido por los PMs del engranaje de alta velocidad. Por otro lado, los radios tuvieron que variar debido a los cambios en el espesor de los PMs de alta y baja velocidad como también el espesor de las PPs ferromagnéticas y las longitudes del entrehierro interno como externo. Esto se debe principalmente a las ecuaciones 1.12, 1.13, 1.14, 1.15, 1.16, 1.17 y 1.18. Como resultado final se obtuvo un engranaje magnético coaxial (ver **Figura 3.5**) con una capacidad de torque elevada y una eficiencia aceptable. Todo esto se detalla en los siguientes párrafos



**Figura 3.5** Diseño final del engranaje magnético

### 3.2. Torque magnético transmitido

El torque magnético se obtuvo mediante una serie de simulación a través del software COMSOL. En ella, se analizó la capacidad de torque que puede transmitir sin perjudicar el funcionamiento de los imanes permanentes. Para ello, se procuró aumentar tanto la longitud del entrehierro como el espesor de las piezas polares ferromagnéticas. Como resultado final se obtuvo las medidas para el diseño del engranaje magnético coaxial en la **Tabla 3.4**, el cual está configurado para obtener un alto torque magnético sin que tenga una alta concentración de saturación magnética. Esto se muestra en la **Figura 3.5**, en donde la concentración magnética (representado con línea rojas) son escasas mientras que en la **Figura 3.6**, se muestra la capacidad de torque que puede transmitir el engranaje magnético coaxial.



**Figura 3.6** Torque magnético vs tiempo

Como se muestra en la **Figura 3.6**, el torque magnético está representado como ondas senoidales. Esto se debió a que el torque magnético estaba en función del campo magnético tangencial y radial; asimismo, la amplitud de las ondas senoidales estaba en función tanto del radio interno como externo de los engranajes magnéticos de alta y baja velocidad respectivamente (ver las ecuaciones 1.41 y 1.42). Como resultado, se obtuvo un torque magnético de salida de 249.75 Nm mientras que el torque de entrada fue 56.2 Nm (Ver **Tabla 3.5**). Para mover un vehículo híbrido de modelo sedan se requiere un torque de 163 Nm [49]. Si bien existen vehículos que requieren un mayor torque de salida debido a la función que realiza (transporte público, de carga, etc.) estos no fueron nuestro enfoque de estudio por lo cual nuestro torque de salida obtenido por el engranaje magnético coaxial cumple con los requisitos necesarios para reemplazar a los engranajes mecánicos en la industria automotriz.

Símbolos	Descripción	Valor
$T_{out}$	Torque de salida	249.75 Nm
$T_{in}$	Torque de entrada	56.2 Nm
$\Omega_{HS}$	Velocidad de HSR	8500 RPM
$\Omega_{LS}$	Velocidad de LSR	1888.88 RPM

**Tabla 3.5** Resultados del torque magnético y la velocidad de giro

### 3.3. Eficiencia de los engranajes magnéticos

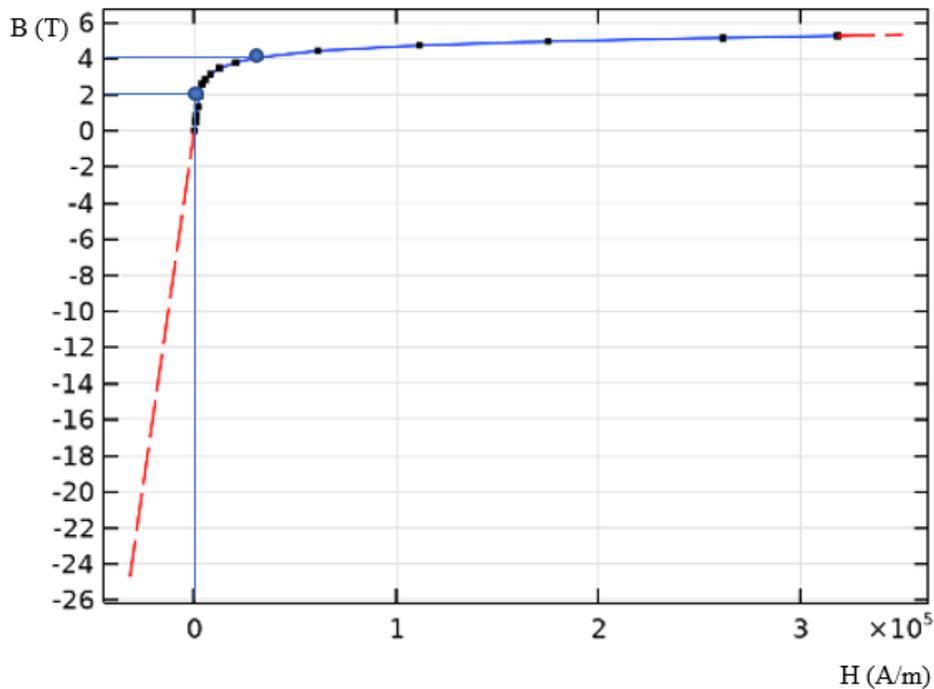
La eficiencia de los engranajes magnéticos fue uno de los apartados más importantes para nuestro diseño del engranaje magnético coaxial debido a que los vehículos híbridos son reconocidos por su eficiencia en temas de consumo de energía. Todos sus componentes que están involucrados en el consumo de energía poseen una eficiencia alta para ser más concretos el engranaje planetario posee una eficiencia de 92% [50]. Para determinar la eficiencia de nuestro engranaje magnético coaxial, primero se calculó la potencia de entrada y la potencia de salida. Para ello, se utilizó los datos de la **Tabla 3.5** obteniendo como resultado una potencia de entrada de 50 kW y una potencia de salida de 49.4 kW. Una vez calculado ambas potencias, se procedió al cálculo de la eficiencia de nuestro engranaje magnético coaxial. Utilizando la ecuación 1.45, se obtuvo una eficiencia de 98.7% demostrando que, en término de eficiencia, los engranajes magnéticos son una alternativa a los engranajes mecánicos utilizados en el sistema e-CVT. A continuación, los resultados se mostrarán en la **Tabla 3.6**.

Símbolos	Descripción	Valor
$P_{in}$	Potencia de entrada	50 kW
$P_{out}$	Potencia de salida	49.4 kW
$e_{mag}$	Eficiencia magnética	98.7%

**Tabla 3.6** Resultados de la eficiencia y de las potencias

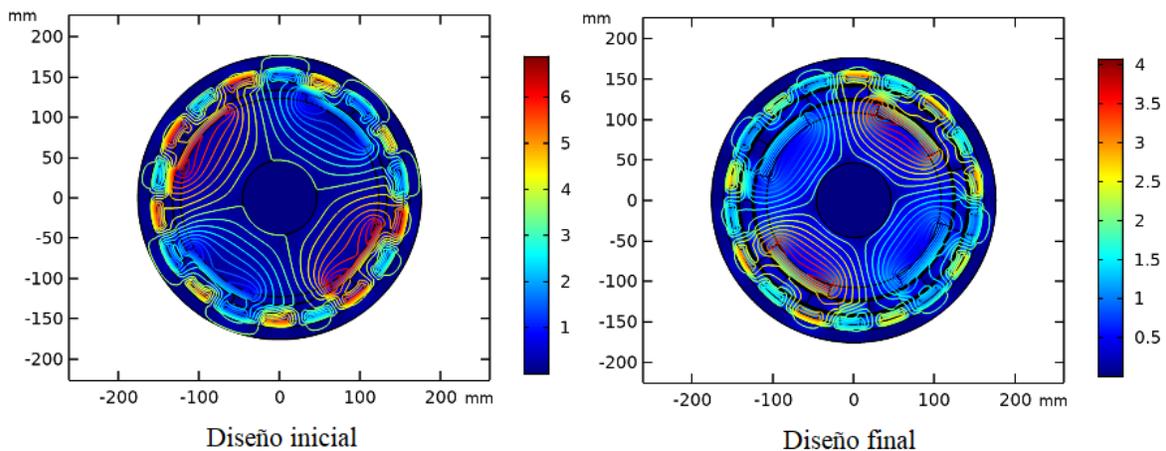
### 3.4. Saturación magnética

Otro punto importante fue la saturación magnética. Si bien este efecto magnético ocurre en los imanes permanentes por una concentración alta de flujo magnético, hasta ahora no se había mencionado lo que conlleva tener puntos de saturación en el engranaje magnético coaxial. Cuando un engranaje magnético coaxial presenta varios puntos de saturación magnética, ocurren dos casos. El primero será que en esos puntos los imanes permanentes perderán sus propiedades magnéticas y en segundo, los imanes permanentes perderán material. Si bien la eficiencia del engranaje magnético (ver **Tabla 3.6**) es de 98.7%, esto se debe principalmente al punto de operación escogido. Según [51], el punto de operación será escogido en la curva BH y estará de acuerdo con el funcionamiento de la máquina. Si esta es una máquina de medición, el punto de operación deberá ser inferior al flujo magnético (B) del imán permanente, por otro lado, si la máquina es rotativa deberá ser superior al flujo magnético del imán permanente y esta deberá de estar a lo más pegado al eje Y. De acuerdo con todo lo anterior mencionado, se escogerá el punto de operación en la **Figura 3.7**.



**Figura 3.7** Curva BH

Como se muestra en la **Figura 3.7**, el punto de operación para el engranaje magnético coaxial diseñado es de 2 T. Esto quiere decir que la concentración máxima a la que puede estar sometido el imán permanente es de 2 T. Dentro del rango de 2 a 4 T, se considera que el imán permanente está llegando a la saturación magnética y si supera el 4 T, el imán permanente se considera saturado. Una vez definido los rangos de saturación magnética, se procedió a comparar el diseño inicial (preliminar) y el diseño final de los engranajes magnéticos coaxiales.



**Figura 3.8** Comparación de saturación magnética entre el diseño inicial y final

Como se muestra en la **Figura 3.8**, el diseño inicial posee una concentración magnética superior a los 4 T en contraste con el diseño final que no supera los 4 T. Esto quiere decir que, al poseer una menor concentración magnética, los imanes permanentes no llegaran a una saturación magnética que perjudicaron el rendimiento de los demás componentes lo cual, en temas de funcionalidad, no habrá muchas pérdidas de hierro (material) y no perderá sus propiedades magnéticas en funcionamiento.

## CONCLUSIONES

En este capítulo se mostrarán las conclusiones acerca de la relevancia de la investigación propuesta y los resultados mostrados:

1. Se logró dimensionar, a través de simulación con el software COMSOL, un engranaje magnético coaxial con la capacidad de reemplazar a un engranaje planetario de una fase aplicado en el sistema e-CVT. El torque de salida que puede entregar el engranaje magnético coaxial diseñado fue de 249.75 Nm siendo 163 Nm el torque requerido para mover un vehículo híbrido modelo sedan [49].
2. Se determinó que el engranaje magnético coaxial obtuvo una eficiencia de 98.7% siendo superior a la eficiencia de los engranajes planetarios utilizados en los vehículos híbridos teniendo ambos las mismas condiciones (dimensionamiento y potencia). La eficiencia que poseen los engranajes planetarios es de 92% [50]. Por lo tanto, se concluye que un engranaje magnético puede superar al engranaje planetario en términos de eficiencia.
3. Para mantener la eficiencia elevada, se tuvo que diseñar a los engranajes magnéticos coaxiales con poca saturación magnética. Esto se debe a que, si existe una alta concentración de flujo magnético en el entrehierro y en las piezas polares ferromagnéticas, estas llegarán a la saturación magnética produciendo pérdidas de hierro (material) y disminuyendo la eficiencia obtenida. Por lo cual, se diseñó en base al punto de operación de 2 T siendo el límite 4 T. Obteniendo como resultado que el engranaje magnético coaxial tenga una saturación magnética que se encuentra entre 0.5 hasta 4T dándonos a entender que se mantendrá con una eficiencia elevada.

4. Se pudo obtener resultados muy prometedores con el análisis de la variación de los 3 factores estudiados en esta tesis (entrehierro, espesor de los imanes permanente y el espesor de las piezas polares ferromagnéticas); sin embargo, para mejorar aún más la eficiencia y el torque magnético de los engranajes magnéticos coaxiales, se recomienda, para futura investigaciones, aplicar el método estadístico de diseños de experimento por objetivo (DOE  $2^K$ ). Este método se aplicaría a los 3 factores anteriormente mencionados con la finalidad de encontrar su valor óptimo el cual beneficiara al torque y a la eficiencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINAM (Ministerio del medioambiente), “Preguntas y respuestas para entender el caso del Euro IV,” 2016.
- [2] M. Williams and R. Minjares, “A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards,” *ICCT*, junio 2016
- [3] MINAM (Ministerio del medioambiente), “Establecen límites máximos permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores,” *El Peruano*, pp. 11 – 16, noviembre 2017.
- [4] A. E. Fuhs, “Hybrid vehicles and the future of personal transportation,” *Taylor & Francis Group: LLC*, 2009.
- [5] G. Amancio Castro, N. Torres Martinez, and M. Vásquez Saavedra, “Plan estratégico para Tesla Motors 2019-2023 en el mercado de los Estados Unidos,” *Repos. la Univ. del Pacífico - UP*, 2018.
- [6] E. Tarazona, “Los vehículos eléctricos y las políticas de promoción,” *AAP*. Octubre 2018
- [7] D. G. Chele Sancan, “Vehículos híbridos, una solución interina para bajar los niveles de contaminación del medio ambiente causados por las emisiones provenientes de los motores de combustión interna,” *INNOVA Res. J.*, vol. 2, no. 12, pp. 1–10, 2017.
- [8] D. A. Cajamarca and V. E. García, “Determinación de las ventajas ambientales que presenta un vehículo híbrido respecto a un vehículo normal de similares características”. Bachiller. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, julio 2010.
- [9] P. Corbelli, “Hybrid e-CVT Power Split drivelines,” Ph.D. University of Bologna, Bologna, Italy, March 2011.

- [10] Y. Chen and A. Ishibashi, "Investigation of the noise and vibration of planetary gear drives," *Gear Technol.*, vol. 23, no. 1, pp. 48–55, 2006.
- [11] G. Holmes and M. R. Schmidt, "Hybrid Electric Powertrain Including a Two-Mo Electrically Variable Transmission," U.S. Patent 6 478 705 B1, Nov. 12, 2002.X. Ai
- [12] L. Jiménez, "Clean Diesel en el marco del euro 6," Instituto de investigación sobre vehículos, S. A. No. 64, Junio 2015.
- [13] K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, "Non-contact magnetic gear for micro transmission mechanism," *Proceedings. IEEE Micro Electro Mech. Syst.*, pp. 125–130, 1991.
- [14] A. Penzkofer, "Analytical Modelling and Analysis of Magnetic Gears and Pseudo Direct Drives for Large Wind Turbines," no. November, p. 196, 2016
- [15] M. A. Gamero Gutiérrez and G. E. López Cuadrado. "Factores de decisión para la compra de vehículos particulares en la ciudad de Cartagena," Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia, 2017
- [16] S. Miladinović, L. Ivanović, M. Blagojević, and B. Stojanović, "The Development of Magnetic Gears for Transportation Applications," *Mobil. Veh. Mech.*, vol. 43, no. 1, pp. 39–55, 2017.
- [17] J. G. Birchall and S. D. Calverley. "Fast sizing method of a MAGSPLIT power split powertrain for use in hybrid electric vehicles," *6yh Hybrid and electric vehicles conference*, November 2016.
- [18] M. R. Espina. "Análisis entre la relación de transmisión y rendimiento para trenes de engranajes planetarios," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Guatemala, julio 2008
- [19] K.D. Hoang, K. Atallah, M. Odavic and S. Calverley. "Control development for hybrid vehicle powertrain with magnetic continuously variable transmission," *IEEE*, The University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom, 2018

- [20] S. H. Gawande and S. N. Shaikh. “Experimental investigations of noise control in planetary gear set by phasing,” *Journal of Engineering*, 2014.
- [21] C. G. Armstrong. “Power transmitting device,” US Pat. 387292, 1901
- [22] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Joergensen, and O. Nielsen, “Development of a High Performance Magnetic Gear,” *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.*, vol. 3, pp. 1696–1702, 2003.
- [23] C. Rossi, “e-CVT Power Split Transmission for Hybrid-Electric Vehicles,” *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, October 2014.
- [24] G. Becerra, “Modelado y control del acoplamiento entre fuentes de potencia de vehículos híbridos,” Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- [25] Z. Q. Zhu, and D. Howe. “Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol 15, pp. 407-412, 2000.
- [26] D. Fodorean, “State of the Art of Magnetic Gears, their Design, and Characteristics with Respect to EV Application,” *Model. Simul. Electr. Veh. Appl.*, 2016.
- [27] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, “Analytical computation of the magnetic field distribution in a magnetic gear,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 7, pp. 2611–2621, 2010.
- [28] L. Jian and K. T. Chau, “Analytical calculation of magnetic field distribution in coaxial magnetic gears,” *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 92, pp. 1–16, 2009.
- [29] L. Jian and K. T. Chau, “A coaxial magnetic gear with halbach permanent-magnet arrays,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 319–328, 2010.
- [30] L. Jian, K. T. Chau, Y. Gong, J. Z. Jiang, C. Yu, and W. Li, “Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4526–4529, 2009.

- [31] F. T. Jorgensen, T. O. Andersen, and P. O. Rasmussen, “Two dimensional model of a permanent magnet spur gear - A mathematical method used to model a parallel magnetised magnetic spur gear,” *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.,* vol. 1, pp. 261–265, 2005.
- [32] K. H. Ha, Y. J. Oh, J. P. Hong and Y. J. Oh, “Design and characteristic analysis of non-contact magnet gear for conveyor by using permanent magnet,” *Conf. Rec. – IAS Annu. Meet. IEEE Ind. Appl. Soc.,* vol 3, pp. 1922-1927, 2002.
- [33] C. C. Huang, M. C. Tsai, D. G. Dorrell and B. J. Lin, “Development of a magnetic planetary gearbox,” *IEEE Trans. Magn.,* vol 44, no. 3, pp. 403-412, 2008.
- [34] M. Chen, K. T. Chau, W. Li, and C. Liu, “Development of Non-rare-earth Magnetic Gears for Electric Vehicles,” *J. Asian Electr. Veh.,* vol. 10, no. 2, pp. 1607–1613, 2012.
- [35] M. C. F. Y. Primero and R. C. Uziel, “Modelo cinemático de reductor cicloidal magnético,” *Ing. Mecánica. Tecnol. y Desarro.,* vol. 6, no. 1, pp. 25–29, 2017.
- [36] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, “Design, analysis and realisation of a high performance magnetic gear,” *IEE Proceedings-Electric Power Appl.,* vol. 151, no. 2, pp. 135–143, 2004.
- [37] F. Vernet, F. Heliodore, J. L. Thomas, and S. Poullain, “Space harmonics in electrical machines: Extended state-space model and Kalman filter,” *IEEE Conf. Control Appl. - Proc.,* vol. 2, pp. 909–914, 2003.
- [38] C. T. Li, X. Zhang, and H. Peng, “Design of power-split hybrid vehicles with a single planetary gear,” *ASME 2012 5th Annu. Dyn. Syst. Control Conf. Jt. with JSME 2012 11th Motion Vib. Conf. DSCC 2012-MOVIC 2012,* vol. 2, pp. 857–865, 2012.
- [39] A. Vaidyanathan. “Why aren’t even harmonics significant when compared to odd harmonics in power system,” 2017 [Online]. Available: <https://www.quora.com/Why-arent-even-harmonics-significant-when-compared-to-odd-harmonics-in-power-system>

- [40] J. Lee and J. Chang. "Vibration and noise characteristics of coaxial magnetic gear according to low-speed rotor structure," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, pp. 2723-2728, 2017.
- [41] P. M. Tlali, R-J. Wang and S. Gerber. "Magnetic gear technologies: A review". *International Conference on Electrical (ICEM)*, 2014
- [42] S. Mezani, K. Atallah and D. Howe. "A high-performance axial-field magnetic gear". *Journal of Applied Physics*, Vol 99, 2006.
- [43] P. Corvalan. "Metodología de diseño y proyecto final". 2018. [Online]. Available: <http://metodologiayproyectorfinal.blogspot.com/2018/03/metodologia-de-diseno-por-nigel-cross.html>
- [44] Z. Zhao, C. Wang, T. Zhang, X. Dai and X. Yuan. "Development of a Compact Compound Power-Split Hybrid Transmission Based on Altered Ravigneaux Gear Set", *SAE Technical Paper*, 2014.
- [45] L. Pérez. "Diseño de un sistema de transmisión para un monoplaça de fórmula student". Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, 2017.
- [46] X. Zhang, X. Liu, C. Wang and Z. Chen. "Analysis and Design Optimazation of a Coaxial Surface-Mounted Permanent-Magnet Magnetic Gear". *Energies*, Vol. 7, pp. 8535-8553, 2014.
- [47] X. Li, K. T. Chau, M. Cheng, W. Hua and Y. Du. "An improved coaxial magnetic gear using flux focusing". *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2014.
- [48] Electric motor design & analysis assist tool, " Inner Rotor BLDC Motor with surface mounted magnets," 17 Junio 2018. [Online]. Available: <https://motorrllib.gitlab.io>. [Accessed 22 Octubre 2020].

- [49] Coches y concesionarios, "Prestaciones y dimensiones del TOYOTA PRIUS," [Online]. Available: <https://www.cochesyconcesionarios.com/fichas/toyota/prius/82194580001-prestaciones-dimensiones.html>. [Accessed 13 Noviembre 2020].
- [50] M. R. Cuddy and K. B. Wipke, "Analysis of the fuel economy benefit of drivetrain hybridization". *SAE Technical Paper*, 1997.
- [51] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, "Design of brushless permanent magnet motors". *Magna Physics Publishing*, 1994.

# **ANEXO**

### ANEXO 1: Resultados con los variables $G_{in}$ , $G_{out}$ y $T_{out}$

$G_{in}$	$G_{out}$	$T_{out}$ (Nm)
0.5	0.5	277
0.5	1	260.5
0.5	1.5	213.9
0.5	2	233
1	0.5	272
1	1	257.8
1	1.5	210.4
1	2	229.8
1.5	0.5	269
1.5	1	254
1.5	1.5	206.9
1.5	2	226.9
2	0.5	264.5
2	1	250.5
2	1.5	203.8
2	2	223.9

### **ANEXO 2: Resultados con los variables $L_{m\ in}$ , $L_{m\ out}$ y $T_{out}$**

$L_{m\ in}$ (mm)	$L_{m\ out}$ (mm)	$T_{out}$ (N.m)
10	10	277
10	15	234
10	20	193.5
15	10	350
15	15	303.75
15	20	248
20	10	394
20	15	350.5
20	20	286.5

### **ANEXO 3: Resultados con los variables $L_p$ y $T_{out}$**

$L_p$ (mm)	$T_{out}$ (N.m)
10	277
15	275.5
20	268
25	258
30	248

**ANEXO 4: Tabla ANOVA de las variables  $G_{in}$  y  $G_{out}$**

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	2	6271.514	3135.757	12.95241	0.000805
Residual	13	3147.279	242.0984		
Total	15	9418.793			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>P-value</i>
Intercept	292.9156	12.90126	7.62E-12
Gin	-6.9125	6.958425	0.338646
Gout	-34.735	6.958425	0.000247

**ANEXO 5: Tabla ANOVA de las variables  $L_{m in}$  y  $L_{m out}$**

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	2	32075.20833	16037.6	192.0299	3.64E-06
Residual	6	501.0972222	83.5162		
Total	8	32576.30556			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>P-value</i>
Intercept	276.2777778	16.11918699	2.52E-06
Lm in	10.88333333	0.746173365	6.52E-06
Lm out	-9.766666667	0.746173365	1.23E-05

**ANEXO 6: Tabla ANOVA de las variables  $L_p$**

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	570.025	570.025	55.56702	0.004998
Residual	3	30.775	10.25833		
Total	4	600.8			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>P-value</i>
Intercept	295.5	4.297092	6.78E-06
$L_p$	-1.51	0.202567	0.004998