

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA



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

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para optar el grado de bachiller en Ingeniero Mecánico

AUTOR

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

ASESOR

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

Lima – Perú

2020

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	3
Alcance.....	5
Antecedentes	5
Justificación y motivación.....	7
Objetivo general	8
Objetivos específicos	8
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	39
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	46
2.6	Análisis de la saturación magnética	47
CONCLUSIONES		48
AGRADECIMIENTOS		48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		49

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

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

RESUMEN

El presente trabajo de tesis tiene como objetivo 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 del modelo sedan. Para realizar dicho propósito es necesario comprender el funcionamiento del sistema e-CVT dado que, en su estructura, se utiliza un engranaje planetario cuya principal función es transmitir la potencia de los motores, tanto eléctricos como de combustión interna, hacia las ruedas. Con la finalidad de reemplazar los engranajes planetarios, se analizará en qué aspectos los engranajes magnéticos pueden superarlos. 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 de los motores, tanto eléctricos como el de combustión interna, hacia las ruedas. Asimismo, se analizará la eficiencia de los engranajes magnéticos como también los ciclos de trabajo de los imanes permanentes.

PALABRAS CLAVES:

Sistema de transmisión E-CVT, engranajes planetarios, engranaje magnético, diseño computacional, campos magnéticos.

ABSTRACT

EVALUATION OF THE DESIGN CRITERIA OF MAGNETIC GEARS FOR AN E-CVT TRANSMISSION IN HYBRID VEHICLES

The present thesis work aims to computationally design magnetic gears for an electronic-type continuously variable transmission (e-CVT) system as an alternative to planetary gears in sedan hybrid cars. To achieve this purpose, it is necessary to understand the operation of the e-CVT system since, in its structure, a planetary gear is used whose main function is to transmit the power of the motors, both electric and internal combustion, to the wheels. To replace the planetary gears, it will be analyzed in which aspects the magnetic gears can overcome them. To do this, the magnetic torque generated by permanent magnets will be analyzed; in order to obtain a dimensioning that has the ability to transmit the power of the motors, both electric and internal combustion, to the wheels. Likewise, the efficiency of magnetic gears will be analyzed as well as the duty cycles of permanent magnets.

KEYWORDS:

E-CVT transmission system, planetary gears, magnetic gear, computational design, magnetic fields.

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, agua 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 hacen que no reemplacen, en su totalidad, a los vehículos de gasolina [7]. Del mismo modo, no solucionarían el problema de la contaminación, debido a que las plantas termoeléctricas utilizan combustibles fósiles (existen otras formas de obtener energía eléctrica, pero en su mayoría utilizan el combustible fósil) 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 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.

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. 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 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 en relación con 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. Estos dos factores 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 desperdicio de energía a través del sonido, vibraciones, diseño del perfil del diente y costo de mantenimiento [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 del rendimiento de los motores. La opción que se plantea es el engranaje magnético dado que resuelve los problemas del engranaje planetario.

Objetivo general

Diseñar, evaluar y analizar a los 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 el número y el tamaño de los imanes permanentes y de los imanes ferromagnéticos que se utilizan en los engranajes magnéticos.
- Analizar las variables que tengan una mayor influencia en la eficiencia de los engranajes magnéticos para una transmisión e-CVT.
- Analizar la saturación magnética de los imanes permanentes para determinar las pérdidas de flujo en los engranajes magnéticos.
- Evaluar si la capacidad de transmisión de un engranaje magnético coaxial puede superar o igual a un engranaje planetario.

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 (ver figura 1.1). 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 dual, se utiliza dos engranajes planetarios como se muestra en la figura 1.1. Las dos máquinas eléctricas se conectarán eléctricamente entre sí y a su vez, se conectarán a la batería. Por otro lado, el MCI estará acoplado a un amortiguador de transmisión de eje para luego conectarse al porta-satélites [9,24] (ver figura 1.1). Las principales ventajas de los engranajes planetarios es su estructura compacta y excelente eficiencia de transmisión de potencia. En condiciones ideales, la pérdida de eficiencia es sólo del 3% por etapa [23].

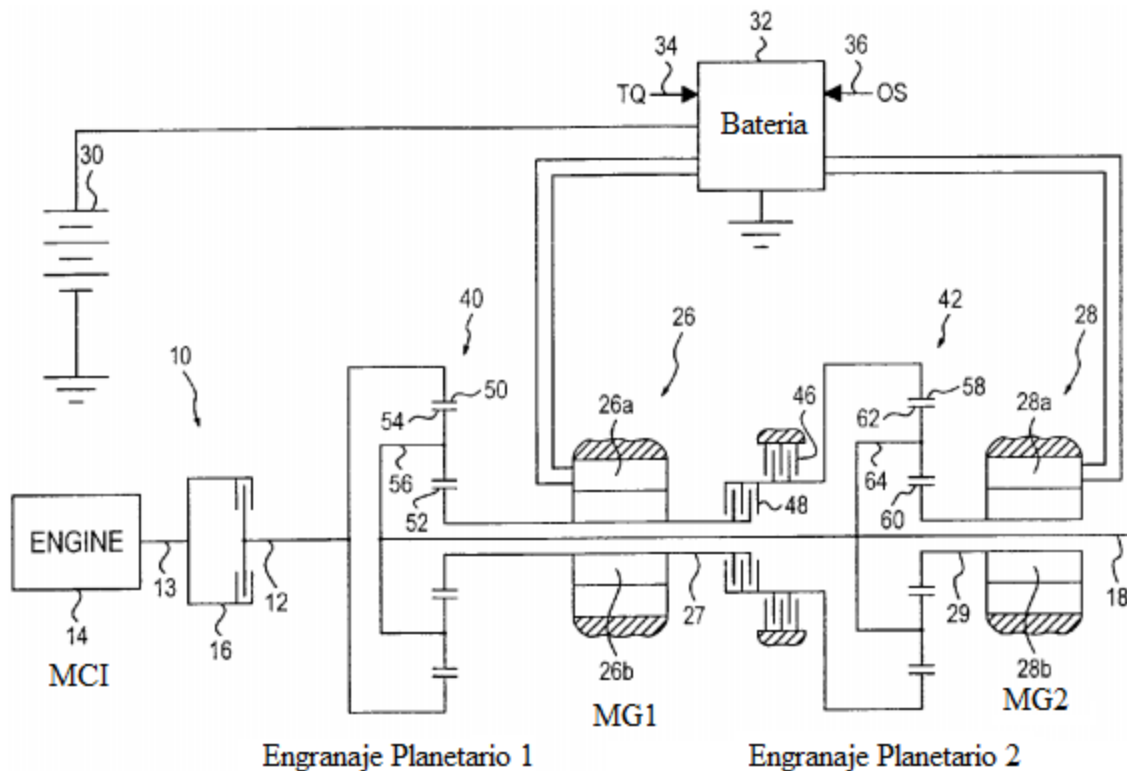


Figura 1.1 Esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión.
Fuente: G. Holmes and M. R. Schmidt [11]

1.1.2. Interacción con las máquinas eléctricas y el motor de combustión interna

En los arranques, la potencia es enviada exclusivamente por el MG2 mediante el porta-satélites del engranaje planetario 2. Una vez que el vehículo esté en marcha y requiere de más potencia para avanzar, de manera conjunta, el MCI y MG2 funcionarán al mismo tiempo. La potencia del MCI será enviada a través de la corona del engranaje planetario 1 y

la potencia del MG2 será enviada a través del porta-satélites del engranaje planetario 2 [11]. 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)

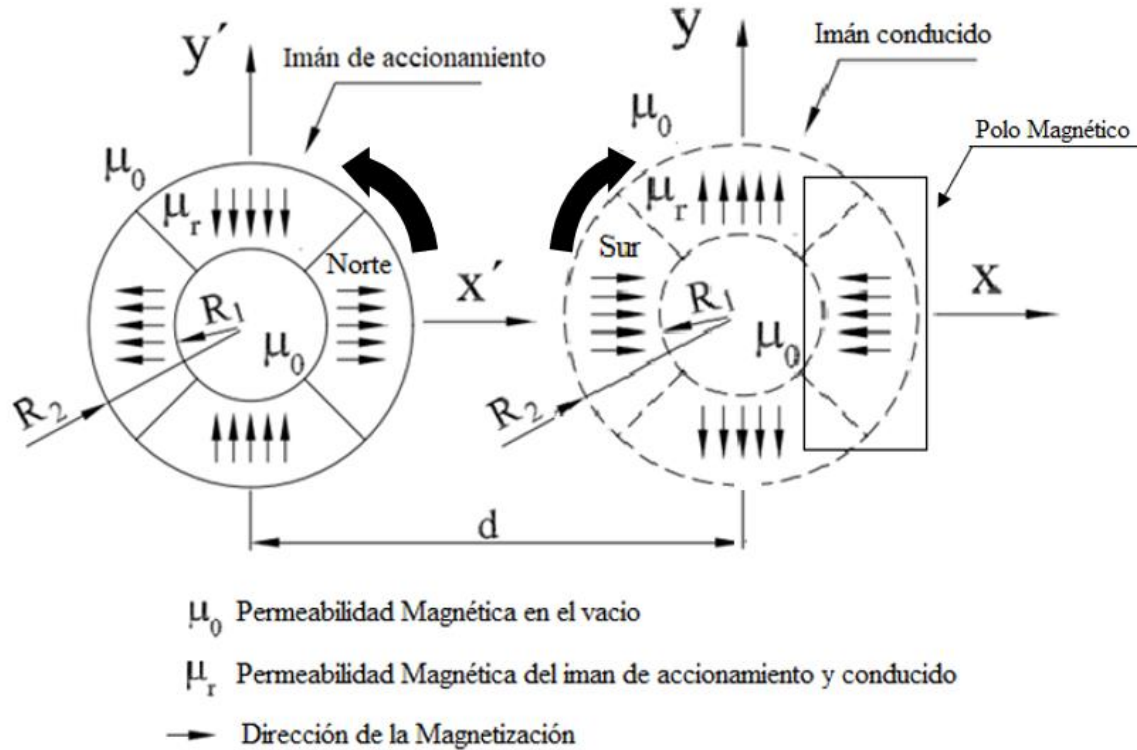


Figura 1.2 Interacción magnética del imán de accionamiento con el imán conducido.
Fuente: F.T. Jorgensen, T.O. Andersen and P.O. Rasmussen [31]

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.

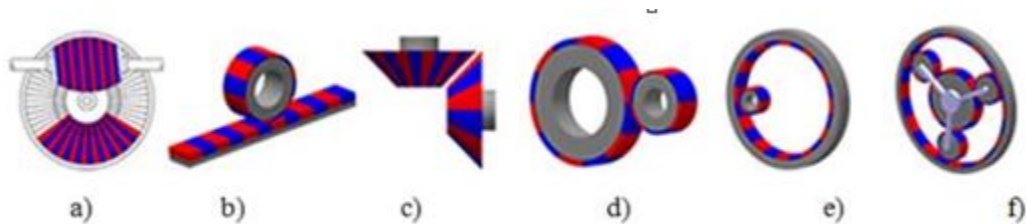


Figura 1.3. Engranaje magnético convertidos: a) Engranaje magnético de tornillo b) Engranaje de cremallera y piñón c) Engranaje magnético cónico d) Engranaje magnético cilíndrico externo e) Engranaje recto interno f) Engranaje magnético planetario.

Fuente: S. Miladinovic, L. Ivanovic, M. Blagojevic and B. Stojanovic [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.

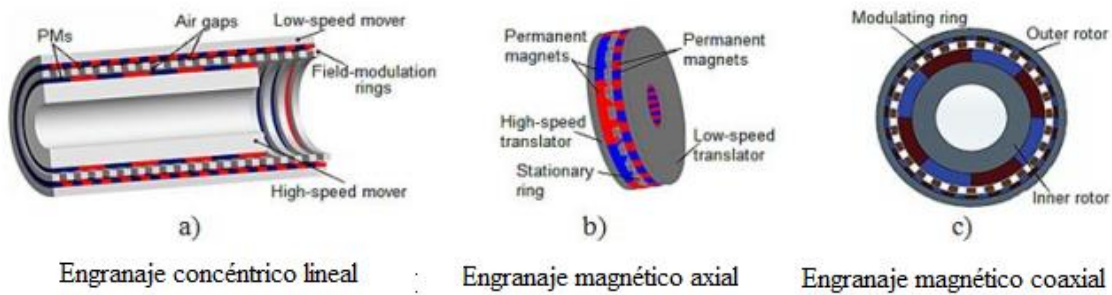


Figura 1.4. Engranajes con campo magnético variable a) Engranaje concéntrico lineal b) Engranaje magnético axial c) Engranaje magnético coaxial.

Fuente: S. Miladinovic, L. Ivanovic, M. Blagojevic and B. Stojanovic [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.

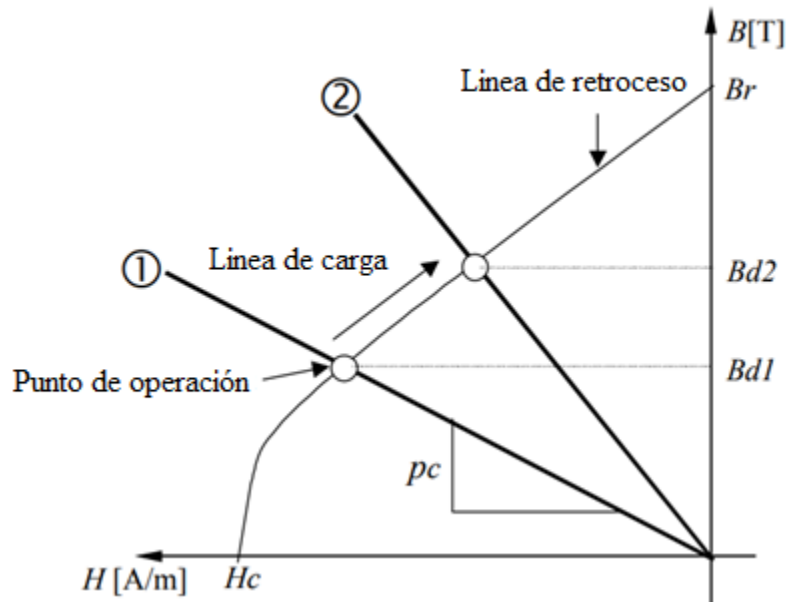


Figura 1.5. B/H características de un imán permanente.

Fuente: K. Ho Ha, Y. Jin Oh and J. Pyo Hong [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 σ 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

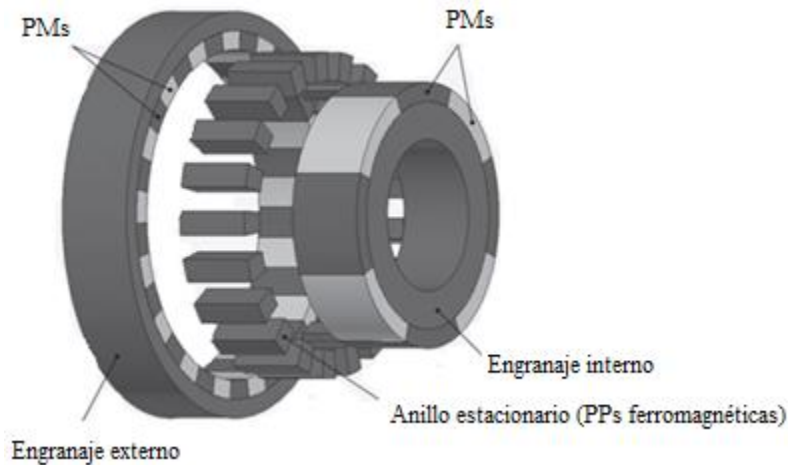


Figura 1.6. Estructura de los engranajes magnéticos coaxiales.

Fuente: M. Chen, K. Tong, W. li and C. Liu [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).

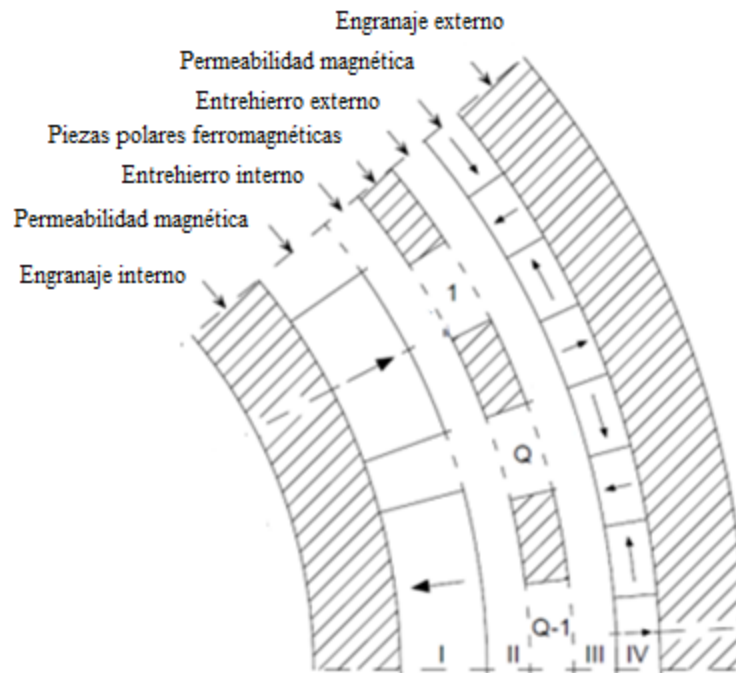


Figura 1.7. Estructura de los engranajes magnéticos coaxiales.
Fuente: L. Jian and K. T. Chau [29]

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 permanentes (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 espaciales¹ 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.

¹ 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].

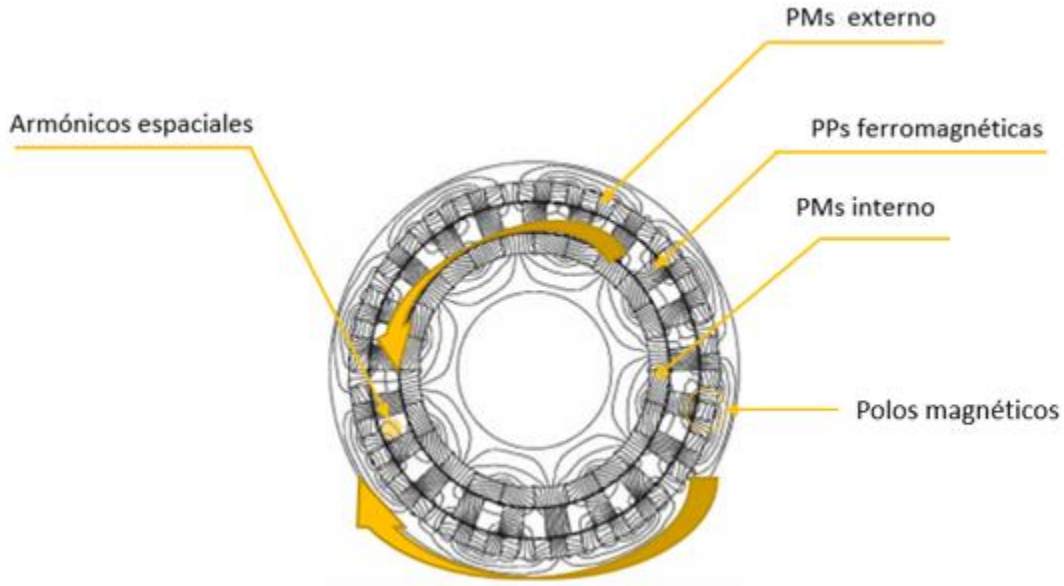


Figura 1.8. Movimiento del engranaje magnético coaxial.
Fuente: L. Jian and K. T. Chau [29]

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 en el rotor de imán permanente, n_s es el número de piezas polares ferromagnéticas, Ω_r y Ω_s son las velocidades de rotación del rotor de imán permanente 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, λ_{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 rotores de alta y baja velocidad [36]. Esto se expresa de la siguiente forma:

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

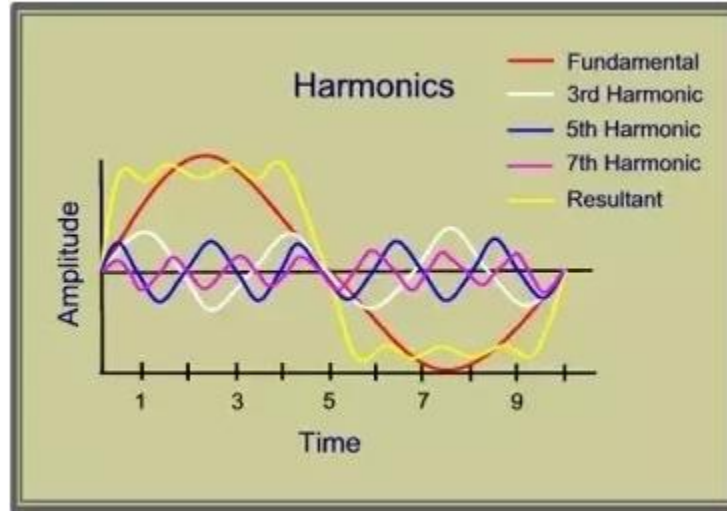
$$p_{Ls}(m, k) = mp_{Ls} + kn_s \quad (1.5)$$

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

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

Donde p_{Hs} es el número de pares de polos magnéticos permanentes en el rotor de alta velocidad (en inglés Hs), p_{Ls} es el número de pares de polos en el rotor de baja velocidad (en inglés Ls) y n_s es el número del PP ferromagnéticas. Además, el Ω_{Hs} , Ω_{Ls} y Ω_s son las velocidades de rotación del rotor 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 rotores 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.
Fuente: A. Vaidyanathan [39]

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

$$n_s = p_{H_s} + p_{L_s} \quad (1.8)$$

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:

$$G_r = \frac{n_s - p_{L_s}}{p_{H_s}} \quad (1.9)$$

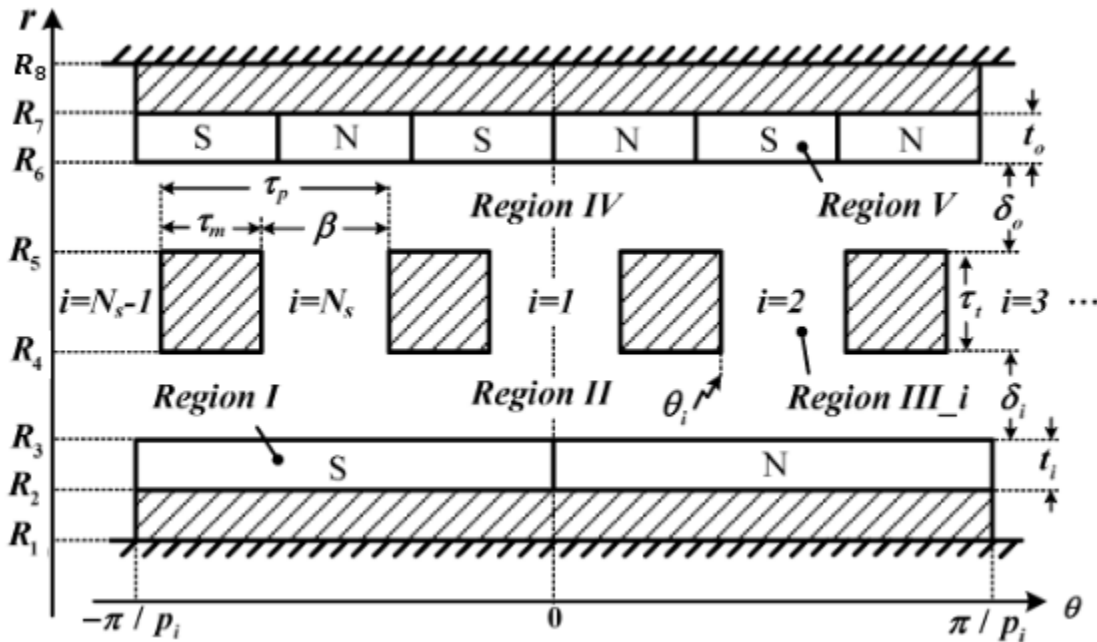
Se pueden tomar dos casos diferentes. El primero es fijar la velocidad del rotor PP y tomar la entrada / salida de los rotores PMs:

$$G_r = -\frac{p_{LS}}{p_{HS}} \quad (1.10)$$

El segundo es fijar el rotor LS y tomando la entrada / salida del rotor PP y del rotor 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 rotores interno y externo también se están considerando (ver figura 1.10).



. **Figura 1.10.** Modelo analítico en el sistema de coordenadas pseudopolares
Fuente: X. Zhang, X. Liu, C. Wang & Z. Chen [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 rotor de alta velocidad, R_3 es el radio externo del rotor 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 rotor de baja velocidad, R_7 es el radio externo del rotor de baja velocidad, R_8 es el radio externo del rotor de baja velocidad (núcleo de acero), L_{C1} es el espesor del rotor de alta velocidad (núcleo de acero), L_{C2} es el espesor del rotor de baja velocidad (núcleo de acero), g es el entrehierro, L_{m1} es el espesor del rotor de alta velocidad, L_{m2} es el espesor del rotor 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 rotor externo e interno giran a diferentes velocidades en donde el rotor interno tendrá un RPM mayor pero un torque menor. La relación de velocidades se basa principalmente en el dimensionamiento de los PMs de los rotores 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 Ω_{Hs} y Ω_{Ls} son las velocidades de rotación del rotor Hs y del rotor 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 rotor externo e interno. A fin de determinar la influencia de los campos magnéticos al torque transmitido, se utilizará el principio de superposición². Cabe señalar que no afectará la configuración de los armónicos espaciales del campo magnético. Además, la interacción de giro de los dos rotores no será afectada dado que lo que se quiere lograr es una transmisión de torque estable, más aún si los dos rotores giran a diferentes velocidades. Asimismo, solo se está considerando las interacciones que se dan entre los PMs de los rotores.

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:

Para el componente radial:

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

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

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

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 θ_1 y θ_2 son los ángulos de fase inicial del rotor de 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 θ . 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 rotores como también la interferencia que puede producirse.

Por otro lado, la interacción entre el entrehierro y los PMs de los rotores tanto interno como externo, crean distorsiones en el campo magnético simulando el efecto de ranurado³. 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 λ^* 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:

³ 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 rotor 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 rotor interno. Por ello, la densidad del flujo externo estará expresado por la densidad del flujo magnéticos del rotor 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:

$$B_{r2in} = \lambda_{a_{in}} B_{rHs}(R_{in}) + \lambda_{b_{in}} B_{\theta Hs}(R_{in}) \quad (1.33)$$

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

Para el entrehierro externo se da por:

$$B_{r2out} = \lambda_{a_{out}} B_{rHs}(R_{out}) + \lambda_{b_{out}} B_{\theta Hs}(R_{out}) \quad (1.35)$$

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

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 rotores.

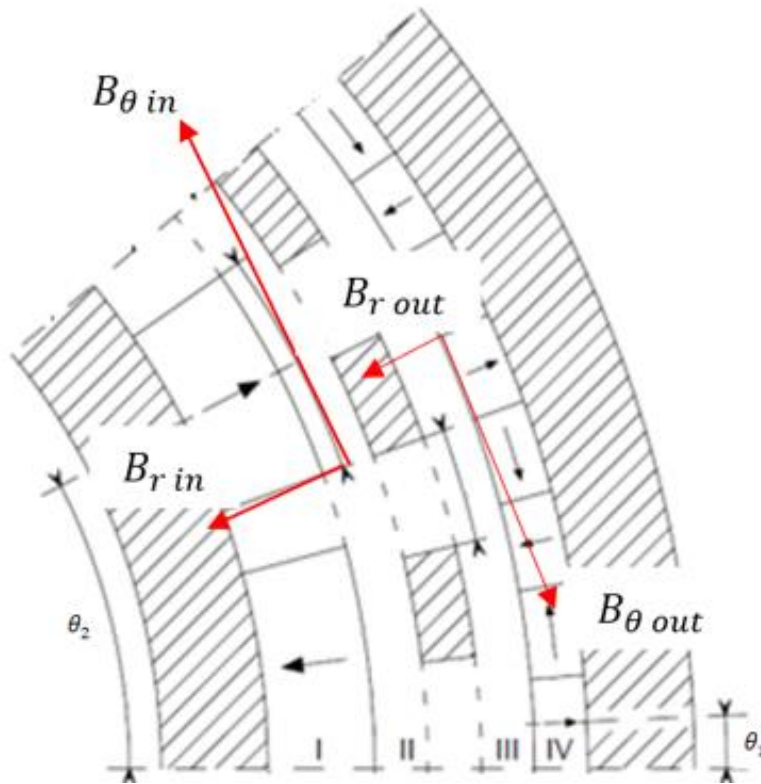


Figura 1.11. Direcciones de los campos magnéticos en el entrehierro externo e interno.
Fuente: L. Jian and K. T. Chau [29]

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 rotor 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 rotor 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, μ_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 N.m) y Ω 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).

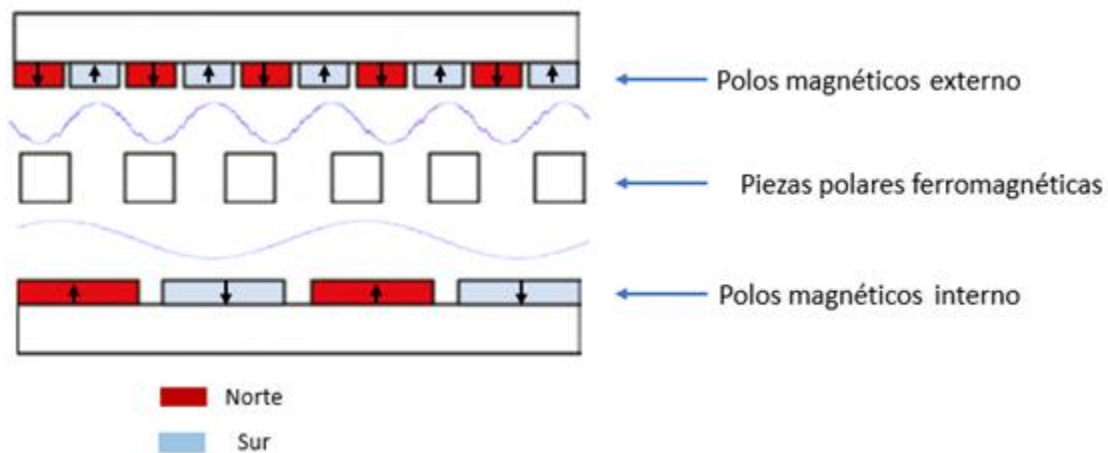


Figura 1.12 Configuración de flujo de los engranajes magnéticos.
Fuente: D. Fodorean [26]

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. Por lo cual, para este caso, se utilizaron cinco pares de polos magnéticos en el rotor externo de la figura 1.11.

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 (α) 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 α . 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. En primer lugar, 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, tal como se muestra en el diagrama de flujo representado en la figura 2.1

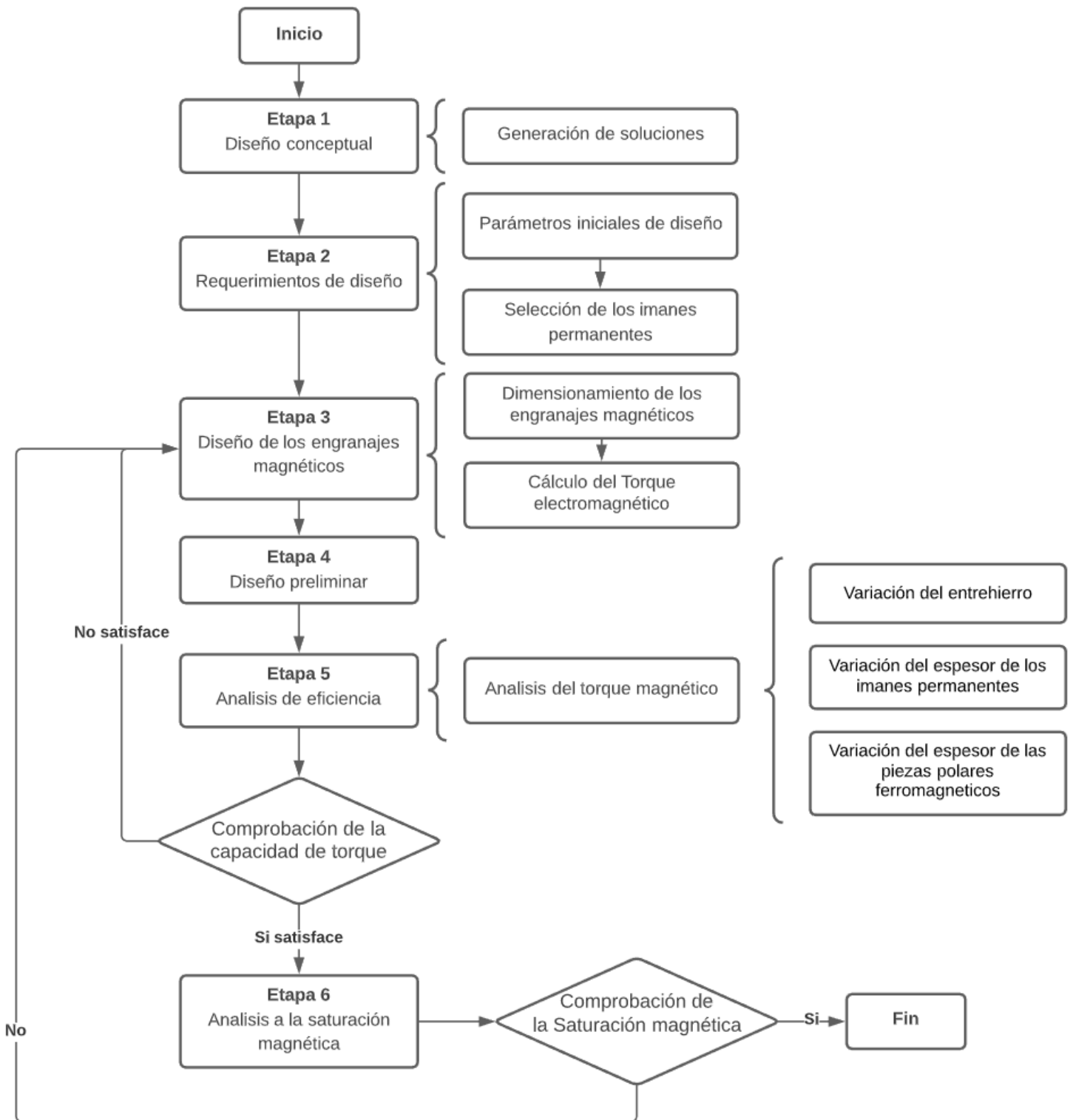


Figura 2.1. Diagrama de flujo de la metodología
Fuente: Elaboración Propia basado en [43, 46]

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
Fuente: Elaboración propia

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
Fuente: Elaboración Propia

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 ³)
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
Fuente: P. M. Tlali, R-J. Wang & S. Gerber [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 indicados 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 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
Fuente: Especificaciones 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
Fuente: L. Pérez [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 (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].

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

Tabla 2.5 Tipo de PMs

Fuente: M. Chen, K. T. Chau, W. Li, and C. Liu [34]

Los PMs con la aleación de Alnico destaca principalmente en su alto Br y en su coeficiente de temperatura bajo; sin embargo, este tipo de PM es vulnerable a la desmagnetización 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 una menor fuerza magnética que los Alnico (ver tabla 2.6). En cambio, los PMs de NdFeB superan a los Alnico en resistencia a la desmagnetización como también supera en fuerzas magnéticas a los PMs SmCo (ver tabla 2.6). Asimismo, posee la misma resistencia a la desmagnetización de los PMs de SmCo y la misma densidad del campo 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 ³)	88	440	200

Tabla 2.6 Comparación de las propiedades magnéticas

Fuente: M. Chen, K. T. Chau, W. Li, and C. Liu [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
Fuente: M. Chen, K. T. Chau, W. Li, and C. Liu [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 rotor 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 rotores (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
Fuente: Elaboración propia

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	Referencia
g	Longitud del Entrehierro	0.5 mm	[48]
$L_{m in}$	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	[45]
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	[45]

Tabla 2.9. Diseño inicial del engranaje magnético.
Fuente: Elaboración propia basado en [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
Fuente: Elaboración propia

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.

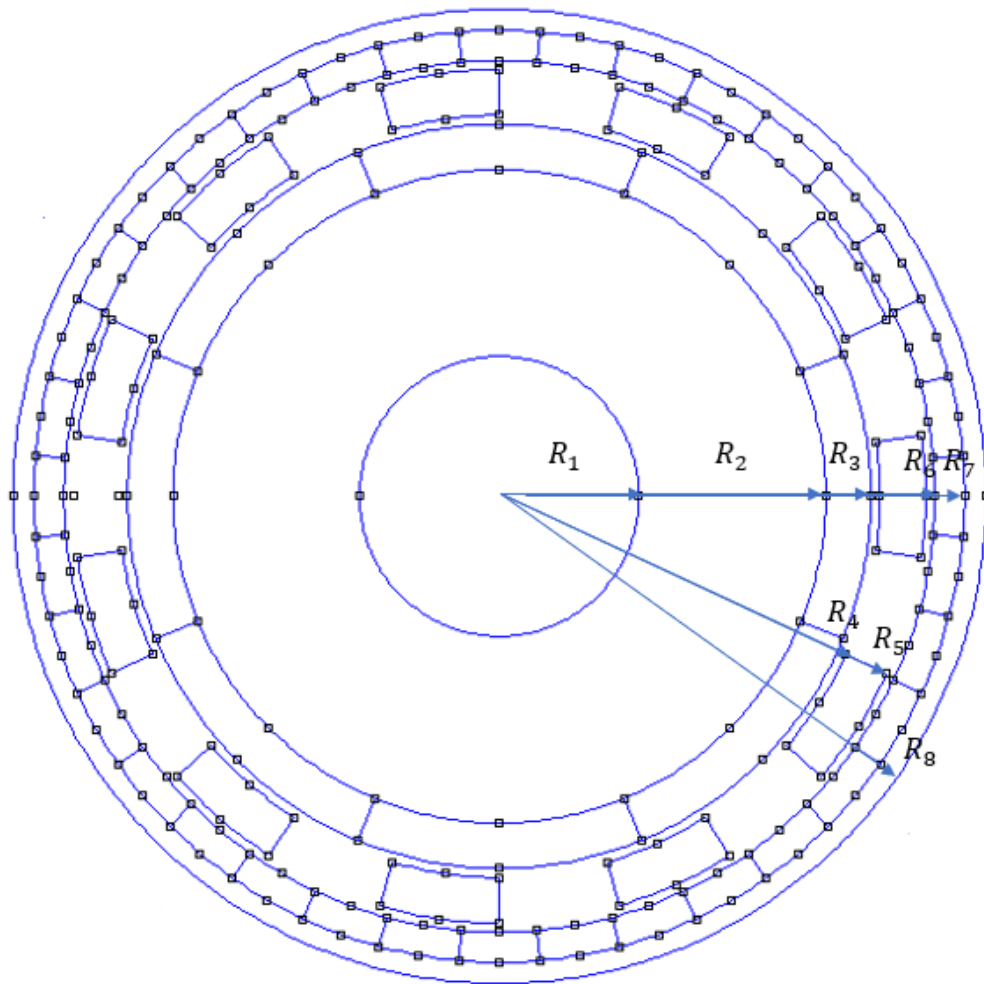


Figura 2.3 Diseño preliminar del engranaje magnético coaxial
 Fuente: Elaboración propia

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

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
Ω_{HS}	Velocidad de HSR	8500 RPM
Ω_{LS}	Velocidad de LSR	1888.88 RPM

Tabla 2.11 Relación de velocidades ideal
Fuente: Elaboración propia

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

CONCLUSIONES

En este capítulo se mostrarán las conclusiones acerca de la relevancia de la investigación propuesta y el trabajo a futuro que se realizara con el fin de solucionar la problemática del sistema e-CVT

1. La relevancia de esta investigación radica en el desarrollo de un nuevo sistema de reducción de potencia utilizando un par de engranajes magnéticos en el sistema e-CVT. Para ello, se realizó un diseño preliminar para poder evaluar las variables más influyentes del torque magnético y de la eficiencia. Esto con la finalidad de comprobar si los engranajes magnéticos puedan obtener mejores resultados en temas relacionados de eficiencia y capacidad de torque que los engranajes mecánicos utilizados en los vehículos híbridos.
2. En el trabajo a futuro, se realizará el diseño de los engranajes magnéticos coaxiales analizando la relación de los engranajes magnéticos, lo cual se desea alcanzar un 4.5 y a su vez, poder transmitir el máximo torque generados por los motores utilizados en los vehículos híbridos para posteriormente tener conocimiento de la viabilidad del diseño electromecánico sin la utilización de una bobina externa.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, primos, tíos y mi hermano por haberme brindado su apoyo durante toda mi vida. A mis compañeros por el apoyo brindado durante estos años de estudio, a los profesores de ingeniería mecánica que me enseñaron e incentivaron a ser cada día un mejor ingeniero y a mi familia por su ayuda incondicional en todo momento

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.