



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

“Diseño Óptimo de un Sistema Magnético para la
Transmisión de Potencia Mecánica en Aerogeneradores”

POR

M.C. Gerardo Enrique Ruiz Ponce

TESIS

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Marco Antonio Arjona López

CODIRECTOR DE TESIS

Dra. Concepción Hernández Flores

ISSN: 0188-9060



RIITEC: (03)-TDCIE-2023

Torreón, Coahuila. México

Mayo 2023





DEPENDENCIA: DEPI/CPCIE
NO. OFICIO: DEPI/CPCIE/189/2023
ASUNTO: Autorización de Impresión
Torreón Coah., **11.MAYO. 2023**

**C. GERARDO ENRIQUE RUIZ PONCE
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA.
PRESENTE.-**

Después de haber sometido a revisión su trabajo de tesis titulado:

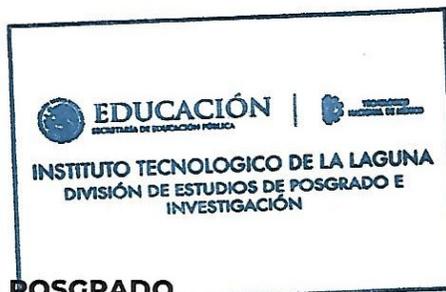
“Diseño óptimo de un sistema magnético para la transmisión de potencia mecánica en aerogeneradores”

Habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis hizo, se le comunica que se le concede la autorización con número de registro **RIITEC: (03)- TDCIE-2023**, para que proceda a la impresión del mismo

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Educación Tecnológica Fuente de Innovación*

**JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JÁCQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
DE INVESTIGACIÓN**



JIHJ/*mjsl



ASUNTO: Se autoriza Impresión
Torreón, Coahuila, **11/Mayo/2022**

C. JOSÉ IRVING HERNÁNDEZ JÁCQUEZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PRESENTE.-

Por medio de la presente, hacemos de su conocimiento que después de haber sometido a revisión el trabajo de tesis titulado:

“Diseño óptimo de un sistema magnético para la transmisión de potencia mecánica en aerogeneradores”

Desarrollo por el **C. Gerardo Enrique Ruiz Ponce**, con número de control **D1413001**, y habiendo cumplido con todas las correcciones que se le indicaron, estamos de acuerdo que se le conceda la autorización de la fecha de examen de grado para que proceda a la impresión de la misma.

ATENTAMENTE

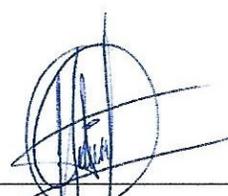
*Excelencia en Educación Tecnológica®
Educación Tecnológica Fuente de Innovación*



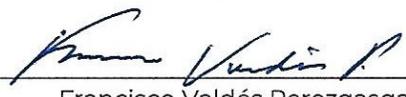
Marco Antonio Arjona López
Director(a) de Tesis



Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
Comité Tutorial



Concepción Hernández Flores
Codirector(a) de Tesis



Francisco Valdés Perezgasga
Comité Tutorial



Jorge Lara Cardoso
Comité Tutorial Externo



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DE LA TESIS

Yo, Gerardo Enrique Ruiz Ponce, en condición de egresado del Programa de Posgrado: Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de La Laguna, dejo constancia que he elaborado la tesis que lleva por título: “Diseño Óptimo de un Sistema Magnético para la Transmisión de Potencia Mecánica en Aerogeneradores”.

Declaro que en el presente trabajo de tesis no existe plagio ni copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por cualquier institución académica, de investigación, profesional o similar.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas e incluidas en el trabajo de investigación, por lo que no he tomado como propias las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratifico que estoy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento y soy consciente de las connotaciones éticas y legales involucradas.



Gerardo Enrique Ruiz Ponce

Nombre y Firma

Agradecimientos

Con gratitud y respeto, a mis directores de Tesis:

Dr. Marco Antonio Arjona López
Dra. Concepción Hernández Flores

por su guía, asistencia moral, calidad humana y apoyo absoluto.
Gracias por haberme permitido culminar mi carrera profesional al lado de tan distinguidas personas.

Con un especial reconocimiento, agradezco el beneplácito recibido del Comité Tutorial de esta Tesis, cuyas atenciones han permitido obtener un manuscrito con la calidad que amerita el grado que he pretendido lograr. Con mi más alta estima, doy gracias a mis Sinodales:

Dr. Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
Dr. Francisco Valdés Perezgasga
Dr. Jorge Lara Cardoso

Con sincero respeto, agradezco también al Honorable Consejo del Claustro del Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica. Valoro las oportunidades que me brindaron para terminar mi tesis.

De igual manera admiro y celebro la extraordinaria labor que desempeñan quienes administran las actividades de la DEPI. La fidelidad a su trabajo y el apego a lo que es justo, son dos parámetros que definen su labor ejemplar. Gracias por todas sus atenciones y gestiones:

Dr. José Irving Hernández Jacquez
Jefe de la División de Estudios de Posgrado
e Investigación

Sra. María de Jesús Salinas Lerma
Secretaria de la Jefatura

M.A.A.D. Graciela Salinas Lerma
Coordinadora de Posgrado en Ciencias
en Ingeniería Eléctrica

Srita. Lizette Casas de la Torre
Secretaria de las Coordinaciones

No me pasan desapercibidas las consideraciones que me han dispensado mis profesores al mostrar interés por mi trabajo. Gracias por su herencia académica al Dr. José Luis Meza Medina, Dr. Víctor Manuel Cabrera Morelos, Dr. Víctor Adrián Santibáñez Dávila y Dr. Mario Francisco Jesús Cepeda Rubio.

Finalmente, agradezco a las Instituciones que en su momento me confirieron su apoyo o soporte para llevar a cabo el proyecto de esta Tesis: Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de la Laguna, Universidad Tecnológica de Torreón, CONACYT y PROMEP.

Que Dios Bendiga a todas estas personas.

Resumen

Los aerogeneradores son máquinas integradas por un conjunto de mecanismos que convierten parte de la energía cinética del viento (energía eólica) en energía mecánica, y finalmente en energía eléctrica. Estas máquinas han contribuido de manera sustancial al sistema mundial de generación de potencia eléctrica al ser fuentes de energía limpia. Uno de sus mecanismos esenciales es la caja multiplicadora que forma parte del tren de potencia. Este mecanismo está compuesto por un sistema de engranajes mecánicos que transmiten la potencia mecánica desde el eje de baja velocidad de la turbina eólica hasta el eje de alta velocidad que conecta con el generador eléctrico. Sin embargo, aunque la eficiencia de las cajas multiplicadoras puede ser bastante aceptable (por arriba del 97% [11]), la naturaleza mecánica de sus engranajes inevitablemente conduce a problemas de desgaste, vibración y ruido, requiriendo así de costosos programas de mantenimiento. Aproximadamente el 5% de las fallas que se producen en un aerogenerador son fallas que se atribuyen a la caja multiplicadora [15]. Aun cuando este es un porcentaje relativamente bajo y las fallas no se presentan con frecuencia, éstas tienen un alto costo en el desempeño del aerogenerador. Para abordar esta problemática se encontraron diversas alternativas, entre las que destacan los engranajes magnéticos como una tecnología emergente para llevar a cabo la transmisión de potencia mecánica. En las dos últimas décadas de investigación sobre esta tecnología, ha habido avances significativos en las diferentes topologías de engranajes magnéticos. No obstante, tales avances, el estudio de estos mecanismos no se ha agotado, y su madurez crece a la vez que se busca obtener mejores diseños para aplicaciones prácticas, siendo una de ellas los aerogeneradores.

El trabajo de investigación de esta tesis se enfoca en proponer un modelo para un engranaje magnético con topología axial, de modo que su diseño óptimo pueda ser considerado como una opción viable para proyectar su aplicación en el tren motriz del sistema de transmisión de potencia mecánica de un aerogenerador. El engranaje magnético con topología axial es una de las configuraciones menos estudiadas en comparación con la topología coaxial con magnetización radial; ambas, son las dos estructuras más significativas en el estudio de los engranajes magnéticos. En esta investigación, se realizó una revisión exhaustiva del estado del arte sobre los sistemas de transmisión de potencia mecánica, con un enfoque en los

engranajes magnéticos como posibles reemplazos de sus contrapartes mecánicas. De igual manera, se estudió con detalle el engranaje magnético con topología axial para obtener su modelo óptimo. Para este fin, se utilizó el método del circuito equivalente magnético (MEC). El MEC es un método analítico básico que permite obtener resultados en tiempos de cómputo muy cortos sin sacrificar precisión. En la construcción del MEC se adoptó una red de reluctancias (RN) cuya solución se planteó en términos de análisis de mallas. Para obtener un modelo competitivo, se aplicó un esquema de optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos (MOGA). El modelado con un MEC-RN basado en mallas y optimizado con un esquema MOGA, es una técnica para la cual existe poca literatura sobre su aplicación en un engranaje magnético con topología axial. Para verificar y validar el desempeño del modelo propuesto, se utilizó un modelo basado en elementos finitos construido en un software comercial. Los resultados del MEC-RN fueron bastante congruentes con los del modelo de elementos finitos. Al ser el MEC un método de modelado aproximado, los resultados del modelo optimizado también se compararon con los parámetros de transmisión de un modelo analítico publicado en la literatura, cuya configuración sirvió como base para el modelo de este trabajo. El objetivo principal fue la minimización del volumen del engranaje magnético, lográndose una reducción del 23.3% con respecto a la configuración original. Este resultado indica un aumento del mismo orden en la densidad de par. Los pares generados por los rotores del engranaje magnético resultaron en una relación de transmisión con una diferencia de 0.46% con respecto a la obtenida con el modelo analítico. En conclusión, el modelo propuesto junto con la metodología adoptada para su modelado óptimo es competitivo para ser considerado como un diseño viable para la transmisión de potencia mecánica con aplicaciones en aerogeneradores.

La producción científica generada por este trabajo, consiste en dos conferencias internacionales y tres artículos publicados en revistas indizadas.

Abstract

Wind turbines are machines integrated by a set of mechanisms that convert part of kinetic energy of the wind energy into mechanical energy, and finally into electrical energy. These machines have contributed substantially to the global electrical power generation system as they are clean energy sources. One of its essential mechanisms is the gearbox that is part of the power train. This mechanism is composed of a system of mechanical gears that transmit mechanical power from the low-speed shaft of the wind turbine to the high-speed shaft that connects to the electric generator. Nevertheless, although the efficiency of gearboxes can be quite acceptable (above 97% [11]), the mechanical nature of their gears inevitably leads to wear, vibration and noise problems, thus requiring costly maintenance programs. Approximately 5% of the failures that occur in a wind turbine are failures that are attributed to the gearbox [15]. Even though this is a relatively low percentage and the failures do not occur frequently, they have a high cost in the performance of the wind turbine. To address this problem, various alternatives were found, among which magnetic gears stand out as an emerging technology to carry out the transmission of mechanical power. In the last two decades of research on this technology, there have been significant advances in the different topologies of magnetic gears. Despite such advances, the study of these mechanisms has not been exhausted, and their maturity grows at the same time that it seeks to obtain better designs for practical applications, one of them being wind turbines.

The research work of this thesis focuses on proposing a model for a magnetic gear with axial topology, so that its optimal design can be considered as a feasible option to project its application in the power train of the mechanical power transmission system of a wind turbine. The magnetic gear with axial topology is one of the least studied configurations compared to the coaxial topology with radial magnetization; both, are the two most significant structures in the study of magnetic gears. In this research, a comprehensive review of the state of the art on mechanical power transmission systems was carried out, with a focus on magnetic gears as potential replacements for their mechanical counterparts. Similarly, the magnetic gear with axial topology was studied in detail to obtain its optimal model. For this purpose, the Magnetic Equivalent Circuit (MEC) method was used. The MEC is a basic analytical method that allows obtaining results in very short computation times without sacrificing

precision. In the construction of the MEC, a reluctance network (RN) was adopted whose solution was proposed in terms of mesh analysis. To obtain a competitive model, a multi-objective optimization scheme with genetic algorithms (MOGA) was applied. Modeling with a mesh-based MEC-RN and optimized with a MOGA scheme is a technique for which there is little literature on its application in a magnetic gear with axial topology. To verify and validate the performance of the proposed model, a model based on finite elements built in a commercial software was used. The results of the MEC-RN were quite consistent with those of the finite element model. As the MEC is an approximate modeling method, the results of the optimized model were also compared with the transmission parameters of an analytical model published in the literature whose configuration served as the basis for the model in this work. The objective function was the minimization of the volume of the magnetic gear, achieving a reduction of 23.3% with respect to the original configuration. This result indicates an increase of the same order in torque density. The torques generated by the magnetic gear rotors resulted in a gear ratio with a difference of 0.46% with respect to that obtained with the analytical model. In conclusion, the proposed model together with the methodology adopted for its optimal modeling is competitive to be considered as a viable design for mechanical power transmission with applications in wind turbines.

The scientific production of this work consists of two international conferences and three articles published in indexed Journals.

Publicaciones

Revistas indizadas

- G. Ruiz-Ponce, M. A. Arjona, C. Hernández and R. Escarela-Perez, "Design Optimization of an Axial Flux Magnetic Gear by Using Reluctance Network Modeling and Genetic Algorithm," *Energies*, vol. 16, no. 4, Feb. 2023, 1852, <https://doi.org/10.3390/en16041852>
- G. Ruiz-Ponce, M. A. Arjona, C. Hernández and R. Escarela-Perez, "A Review of Magnetic Gear Technologies Used in Mechanical Power Transmission," *Energies*, vol. 16, no. 4, Feb. 2023, 1721, <https://doi.org/10.3390/en16041721>
- G. E. Ruiz-Ponce, M. A. Arjona, and C. Hernández, "Magnetic Equivalent Circuit Modeling of an Axial-Field Magnetic Gear," *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, vol. 9, no. 5, May 2019 (Serial Number 81), pp. 169-172, doi: 10.17265/2159-5275/2019.05.004.

Conferencias Internacionales

- G. E. Ruiz-Ponce, M. A. Arjona, and C. Hernández, "Magnetic Equivalent Circuit Modeling of an Axial-Field Magnetic Gear," *2017 21st International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG'2017)*, Daejeon, Korea, 18-22, June 2017.
- G. E. Ruiz-Ponce, M. A. Arjona, C. Hernández and C. Espinoza, "Modeling of an axial-type magnetic gear using a reluctance-based magnetic equivalent circuit," *2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC'2016)*, Miami, FL, USA, 13-16, November 2016, pp. 1-1, doi: 10.1109/CEFC.2016.7816409.

CONTENIDO

Declaración de Autoría	iv
Resumen	vi
Abstract	viii
Publicaciones	x
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Tecnología Básica de los Aerogeneradores	5
1.3. Transmisión de Potencia Mecánica en Aerogeneradores	7
1.3.1. Caja Multiplicadora	8
1.3.2. La Problemática en la Multiplicadora	10
1.3.3. Tecnologías Alternativas	12
1.4. Antecedentes del Proyecto de Tesis	18
1.5. Objetivos de la Investigación y Contribuciones	20
1.6. Estructura de la Tesis	21
2. Estado del Arte de la Transmisión de Potencia Mecánica basada en Sistemas de Engranajes	23
2.1. Engranajes Mecánicos	23
2.1.1. Topología de los Engranajes Mecánicos	27
2.1.2. Causas de Falla en los Engranajes Mecánicos	33
2.2. Engranajes Magnéticos	36
2.2.1. Topología de los Engranajes Magnéticos	36
2.2.2. Conversión Tradicional de Engranajes Magnéticos	39
2.2.3. Fuentes de Energía de los Engranajes Magnéticos	49
2.2.4. Engranajes Magnéticos con Modulación de Campo	52
2.3. Aplicaciones de Engranajes Magnéticos en Aerogeneradores	65
3. Engranaje Magnético con Topología de Flujo Axial	72
3.1. Revisión de la Literatura	72
3.2. Estructura y Principios de Operación	89
3.3. Técnicas de Modelado y Análisis	99

4.	Modelado del Engranaje Magnético	109
4.1.	Método del Circuito Equivalente Magnético con Redes de Reluctancia (MEC-RN)	111
4.1.1.	Teoría General del Modelado con Redes de Reluctancia	112
4.1.2.	Distribución del Campo Magnético en los Elementos de Reluctancia	113
4.2.	Modelado en 2D del Engranaje Magnético con Topología Axial usando el Método del MEC-RN	114
4.2.1.	Categorización de los Elementos de Reluctancia en el MEC	117
4.2.2.	Formulación y Solución del Modelo Matemático	119
5.	Diseño Óptimo del Engranaje Magnético	123
5.1.	Conceptos Básicos de la Teoría de Optimización	123
5.2.	Diseño del Engranaje Magnético	125
5.3.	Optimización del Modelo	127
5.3.1	Algoritmos Genéticos	128
5.3.2	Función Multiobjetivo	130
5.3.3	Resultados de la Optimización	131
5.3.4	Evaluación y Análisis del Desempeño del Modelo Optimizado	132
6.	Conclusiones	138
6.1	Resumen de las principales contribuciones	138
6.2	Trabajo Futuro	140
	Referencias	143

Capítulo 1

Introducción

1.1 Antecedentes

En el escenario global de generación y consumo de energía eléctrica, las energías renovables han mostrado una evolución sostenida en el contexto del suministro energético, cubriendo una parte sustancial de la demanda de electricidad con energía limpia y escaso impacto ambiental.

En las dos décadas que van de este siglo, los avances tecnológicos y el rápido desarrollo que han presentado las tecnologías de energías renovables, han permitido que éstas muestren su potencial y puedan proyectarse como una solución viable para hacer frente a los desafíos relacionados con la afectación del cambio climático y el desarrollo sustentable; temas que evolucionan al amparo de los intereses económicos, políticos y sociales. Uno de los objetivos primordiales sería contar con sistemas y estrategias que ayuden a mitigar la emisión de gases de efecto invernadero, con el fin de reducir las emanaciones de CO₂ a la atmósfera y limitar, en el presente, el aumento de la temperatura media mundial a entre 1.5°C y 2°C [1].

Entre las fuentes naturales de energía renovable utilizadas para generar electricidad, destaca la energía eólica, la cual representa la segunda fuente renovable de mayor contribución al sector eléctrico mundial.

Pese al impacto de la pandemia debida al COVID -19, a finales de 2020 la eoloelectricidad presentó un incremento en nuevas instalaciones de 93 GW, llegando a una capacidad total instalada de 743 GW, equivalente a aproximadamente el 24% de la capacidad global instalada de las energías renovables en el mundo [2]. Esta capacidad eoloeléctrica generó un estimado de 1,596 TWh, contribuyendo con un 6% a la producción mundial de electricidad en ese año [3]. El interés se centra principalmente en las instalaciones en tierra (*onshore*),

que tiene ya una madurez comercial, con una marcada penetración en el mercado energético que la lleva a ser competitiva desde el punto de vista económico. Esto se debe a las proyecciones de una mayor inversión en su tecnología y a la evolución en la disminución de sus costos, lo que la vuelve bastante atractiva en esta industria cada vez más competitiva. De los 93 GW de nuevas instalaciones de energía eólica en 2020, el 95% se instaló en tierra, alcanzando una capacidad global acumulada de 706 GW y convirtiéndose así en una de las fuentes de energía eléctrica más baratas. El 5% correspondió a instalaciones de energía eólica marina (*offshore*), con 37 GW total acumulados. Estos 743 GW de capacidad de energía eólica instalada en 2020, evitó que 1.1 Gt de CO₂ contaminaran al planeta [2], [3]. Se espera que la participación de la eoloelectricidad en la generación de electricidad a nivel mundial, supere el 20% para el 2030. Para el 2050, se pretende que exista un suministro de energía eléctrica completamente descarbonizado, y los pronósticos indican que el viento será la mayor fuente renovable de generación, suministrando más de un tercio (alrededor de un 35%) de las necesidades de generación de electricidad mundial. Si estos pronósticos se cumplen, la potencia eólica contribuiría con una reducción de 6.3 Gt de emisiones de CO₂, lo que representaría una reducción del 27% en las emisiones totales, para cumplir así con los objetivos climáticos del Acuerdo de París, celebrado en diciembre de 2015 [4]. Los aerogeneradores deberán desempeñar un papel importante para que esto se cumpla.

La tendencia de expandir el mercado de la energía eólica a nivel mundial obedece a que esta forma de energía renovable es cada vez más rentable, en comparación con la energía generada en las centrales eléctricas convencionales que funcionan a base de combustibles fósiles. El viento ahora representa una fuente competitiva de electricidad en muchas partes del mundo, y la innovación tecnológica en los procesos de generación eólica será una constante en su desarrollo.

De acuerdo con el último reporte del *Global Wind Energy Council* (GWEC) [5], en 2019 se instalaron 22,893 aerogeneradores en todo el mundo, los cuales fueron fabricados por 33 diferentes proveedores. El reporte presentado por el GWEC también señala que los sistemas eólicos con engranajes siguen siendo la opción preferida en la tecnología de aerogeneradores.

En un aerogenerador parte de la energía cinética del viento se capta a través de las palas, y ésta se transmite mecánicamente hasta el rotor del generador para producir electricidad. Este sistema de transmisión de potencia mecánica se denomina *tren de accionamiento*, *tren de potencia* o simplemente *tren motriz*. Sus componentes básicos (eje principal, caja de engranajes y generador) se encuentran montados en serie en la parte superior de una torre de acero, dentro de una góndola, y están altamente influenciados por varios factores de su entorno. Uno de estos factores son las cargas dinámicas extremadamente altas que resultan de la interacción aerodinámica del viento con las aspas, las cuales actúan principalmente en los componentes que forman parte del sistema de transmisión de potencia mecánica. Una vibración generada en el eje principal puede provocar una falla en los cojinetes de la caja de engranajes, afectando en consecuencia la confiabilidad y el funcionamiento del aerogenerador.

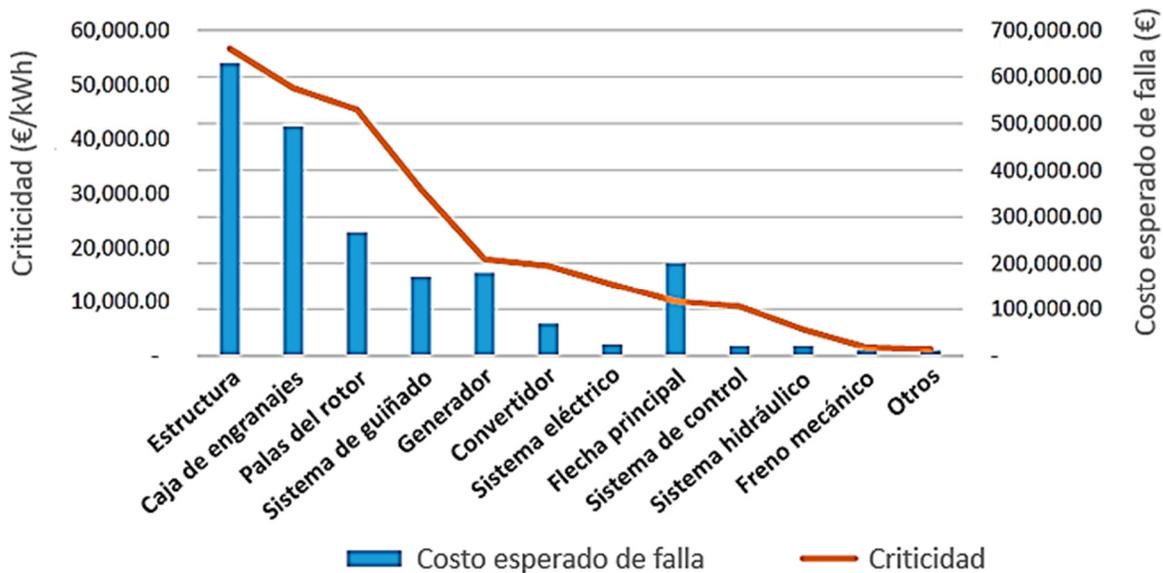


Figura 1.1. Costos esperados de falla y criticidad para los componentes principales de un aerogenerador [6].

En los últimos años, diversos estudios se han llevado a cabo para estimar los costos de falla en términos de criticidad (costo esperado de falla de cada subsistema multiplicado por su tasa de falla) y severidad (basada en la pérdida de producción causada por los modos de falla). Estos costos principales se ilustran en la Figura 1.1. En un aerogenerador, las fallas en la estructura suponen una anomalía general que involucra la torre, los cimientos y la góndola,

la cual muy raramente ocurre (su tasa promedio anual de falla es de apenas 0.09). De la Figura 1.1 se deduce entonces que el componente principal que contribuye a los costos más altos por falla temprana es la caja de engranajes; esto afecta también a los tiempos de inactividad del aerogenerador. Considerando que la caja de engranajes es la parte principal del tren motriz para la transmisión de potencia mecánica, inevitablemente una falla en ella conduciría al mal funcionamiento del sistema eólico.

La caja de engranajes representa una de las partes más críticas en el sistema motriz y que requiere de mayor mantenimiento durante su periodo de vida útil para prevenir su eventual falla y la inactividad del aerogenerador. Por esta razón, la caja de engranajes ha atraído la atención del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). El NREL ha mantenido desde 2007 un proyecto denominado *Gearbox Reliability Collaborative* (GRC), actualmente conocido como *Drivetrain Reliability Collaborative* (DRC). Este proyecto concentra actividades para mejorar la fiabilidad y disponibilidad de la caja de engranajes adoptando un enfoque multifacético: pruebas, modelado, monitoreo de condiciones, base de datos y diagnóstico de fallas. Otro de los proyectos de este laboratorio es el *Gearbox Reliability Database* (GRD) cuyo objetivo es cuantificar la magnitud del problema en la caja de engranajes e identificar los principales modos de falla y las causas fundamentales. Mediante estos proyectos, el NREL contribuye en la investigación y desarrollo (I+D) de trabajos relacionados con la confiabilidad de las cajas de engranajes al proporcionar un punto de referencia para evaluar estos avances tecnológicos [7]. Una de sus premisas descansa en el hecho de que las fallas prematuras en la caja de engranajes tienen un impacto significativo en los costos de operación del aerogenerador.

Derivado de lo anterior se entiende que uno de los diferentes enfoques de investigación y desarrollo en un aerogenerador, es analizar el comportamiento de su caja de engranajes en el tren motriz. El abordaje de esta problemática presenta un reto atractivo no solo para encontrar alternativas que disminuyan el impacto de sus fallas, sino para buscar un medio más adecuado mediante el cual pueda lograrse una optimización de la transmisión de potencia mecánica. Este punto es el tema medular del presente trabajo.

1.2 Tecnología Básica de los Aerogeneradores

Un aerogenerador se compone de una serie de mecanismos que convierten una buena parte de la energía cinética del viento, o energía eólica, en energía mecánica y ésta a su vez en energía eléctrica. Se distinguen dos configuraciones básicas basadas en su eje de giro con respecto al flujo del viento: el aerogenerador de eje horizontal y el de eje vertical. La mayor parte de los aerogeneradores comerciales modernos, conectados a las redes eléctricas y fuera de red, son de eje horizontal. Estas unidades han evolucionado del concepto clásico danés, con un rotor de tres palas soportadas por un cubo central, unido a la parte delantera de un sistema de transmisión cuyo eje es paralelo a la superficie del suelo (horizontal) y en un diseño a barlovento (con el eje de rotación de las palas paralelo al flujo del viento). El cubo está conectado, regularmente, a una caja de engranajes, y ésta a un generador eléctrico. Ambos elementos son partes esenciales del tren de potencia que se localiza en el interior de la góndola que los protege del clima. Los componentes básicos de un aerogenerador se muestran en la Figura 1.2.

La producción de potencia eléctrica usando aerogeneradores depende de la interacción entre las palas del rotor y el viento, todo esto obedeciendo a principios aerodinámicos. Cuando el viento incide sobre las palas del rotor, fuerzas de sustentación y arrastre permiten que comiencen a capturar la energía cinética del viento y giren desde el momento en que la velocidad de éste alcanza de 3 m/s a 5 m/s. Esta es la velocidad eólica mínima a la cual las palas superan la fricción y empiezan a girar, y recibe el nombre de velocidad de acoplamiento o de arranque. Las palas transmiten la energía cinética del viento hacia el cubo, convirtiéndola en energía mecánica de rotación. La velocidad de rotación de las palas es bastante baja, con valores típicos de 30 rpm a 60 rpm. El cubo está acoplado al eje principal de baja velocidad que se conecta con la caja de engranajes. Este elemento, compuesto por un mecanismo de engranes, transmite la potencia mecánica con una velocidad mayor (1000 rpm – 1800 rpm) al eje del generador, logrando que esta máquina produzca finalmente potencia eléctrica, con valores determinados de tensión y corriente en sus terminales. El aerogenerador incrementa la producción de potencia eléctrica conforme se eleva la velocidad del viento

hasta que se alcanza el nivel de potencia nominal, que usualmente corresponde a una velocidad de entre 12 m/s y 17 m/s.

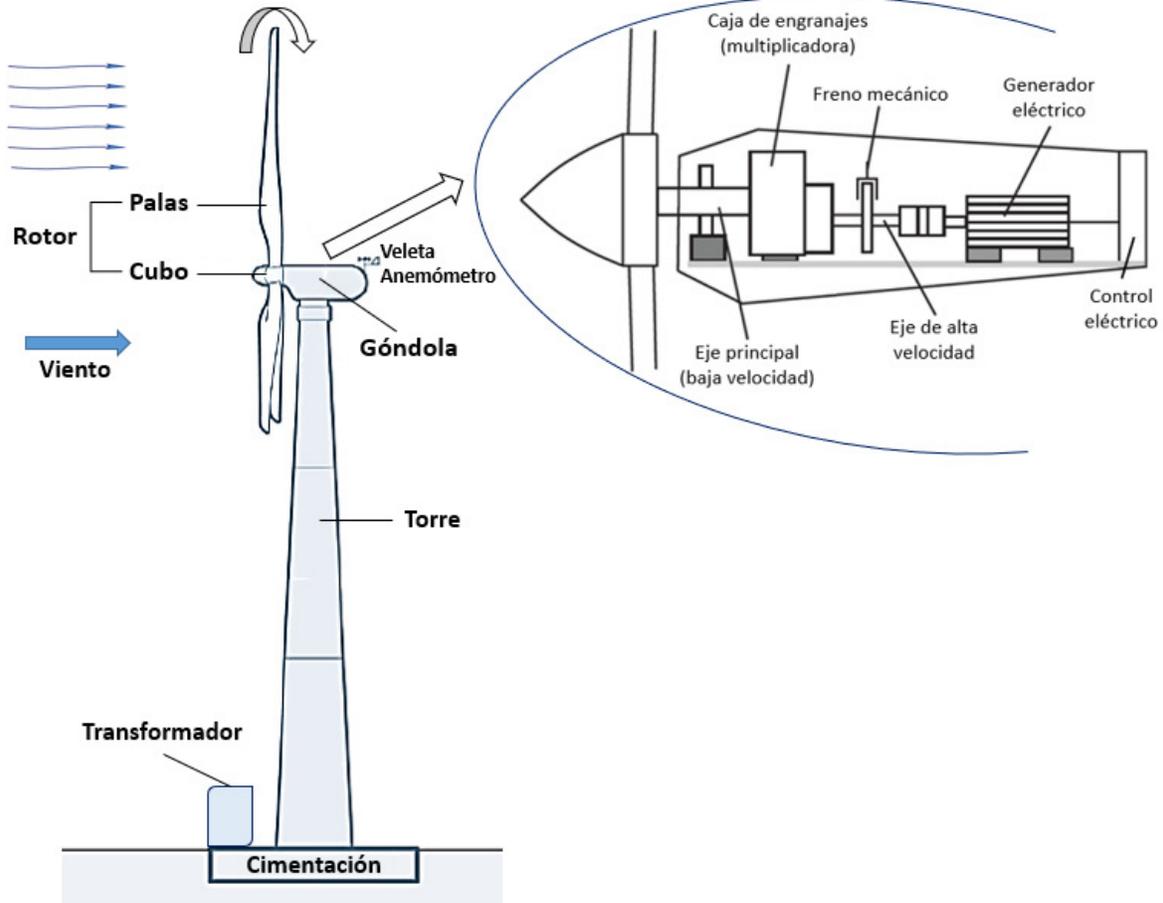


Figura 1.2. Componentes básicos de un aerogenerador [8].

A velocidades del viento más elevadas, los sistemas de control limitan la potencia de salida cuando se ha rebasado su valor nominal, a fin de prevenir una sobrecarga en el aerogenerador. Este éste será bloqueado por un freno mecánico y dejará de producir energía cuando la velocidad del viento esté entre 20 m/s y 25 m/s. El objetivo es limitar las cargas sobre el rotor y prevenir daño a los componentes estructurales del sistema eólico [9]. Toda esta dinámica muestra que la velocidad de rotación está relacionada con la potencia eléctrica generada, tal como se aprecia en la *curva de potencia de un aerogenerador* mostrada en la Figura 1.3 [10]. Esta curva indica la potencia generada a diferentes velocidades del viento. El rendimiento de un aerogenerador está caracterizado por esta curva.

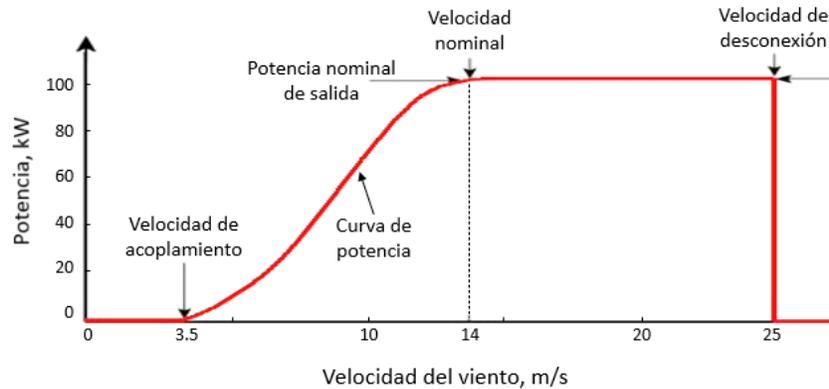


Figura 1.3. Curva típica de potencia de un aerogenerador [10].

1.3 Transmisión de Potencia Mecánica en Aerogeneradores

Por su importancia en la generación de eoloelectricidad, se puede considerar al tren de potencia o tren motriz como el "centro neurálgico" de un aerogenerador. El tren de potencia se encarga esencialmente de transmitir la potencia mecánica de baja velocidad y alto par desde el eje principal del rotor hacia el sistema de generación o de aprovechamiento, al cual hace llegar una potencia de alta velocidad y bajo par mecánico en el eje del generador. Resultaría inapropiado accionar al generador directamente con la energía del eje del rotor, principalmente en máquinas eléctricas doblemente alimentadas (DFIG, por sus siglas en inglés). Esta clase de máquina no giraría con la velocidad requerida para generar potencia a la frecuencia útil que le permita conectarse a la red eléctrica. Para esto se precisa de un método que permita la transmisión de energía mecánica desde el rotor hasta el generador en la forma más adecuada. La mayoría de los aerogeneradores utilizan la caja de engranajes como elemento principal para la transmisión mecánica, ya que representa una tecnología aplicable y madura. Con la caja de engranajes, la potencia de alto par mecánico con rotación lenta obtenida del rotor se puede convertir en potencia de bajo par y alta velocidad que requiere el generador. En la Figura 1.4 se ilustra un esquema típico del tren de potencia en el que tiene lugar la transmisión de potencia mecánica en un aerogenerador. Este sistema incluye el eje principal o de baja velocidad (eje del rotor) con el cojinete principal, la caja de engranajes (multiplicadora) y el eje secundario o de alta velocidad (eje del generador), además de otros componentes como el freno mecánico. La función principal de todo este sistema es conectar el rotor con el generador eléctrico.

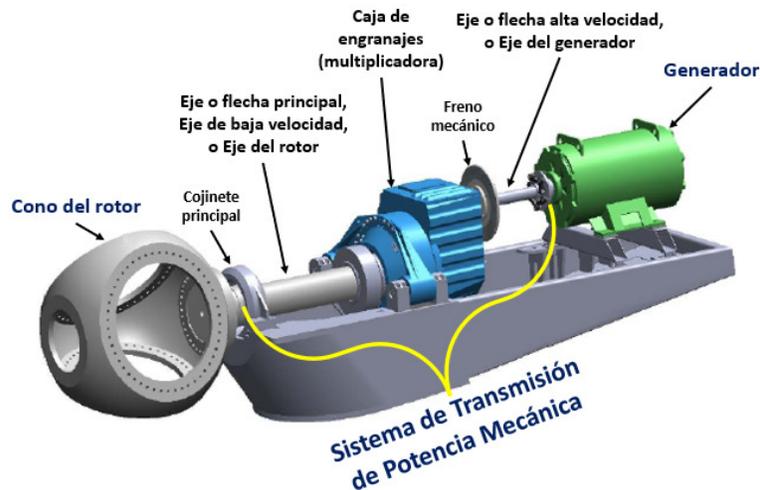


Figura 1.4. Sistema de transmisión de potencia mecánica del aerogenerador (tren motriz) [7].

En este esquema, el corazón del tren de potencia es la caja de engranajes, cuya misión es lograr precisamente que, a partir de las bajas revoluciones por minuto en el rotor, el generador gire con la alta velocidad que exigen los modelos comerciales para así llevar a cabo la generación de energía eléctrica. Este es el motivo por el cual, a la caja de engranes del tren de potencia, se la identifica como la caja *multiplicadora*.

1.3.1 Caja Multiplicadora

Para que un aerogenerador pueda captar la mayor cantidad de energía eólica, es conveniente que sus palas sean de una longitud considerable. Sin embargo, tal requerimiento da lugar a problemas aerodinámicos que limitan la velocidad de giro del rotor ya que, a mayor longitud de sus palas, menor es su velocidad de su giro. De ahí que el rotor no pueda conectarse directamente al generador (sobre todo en el caso del DFIG) por ser este último una máquina estándar que requiere de una velocidad mayor a la que le puede proporcionar el rotor. La caja multiplicadora “no es una caja de cambios de velocidad”, ya que suele tener una única relación de engranaje, G_R (*gear ratio*), entre la rotación del rotor y la del generador. Cada vez que las aspas giran una revolución, el eje del generador gira G_R veces. La velocidad de la punta de la pala, el diámetro del rotor y el diseño del generador determinan la relación de este engranaje. La relación multiplicadora de la caja de engranajes es igual a la velocidad rotacional del eje del generador dividida por la velocidad rotacional del eje del rotor.

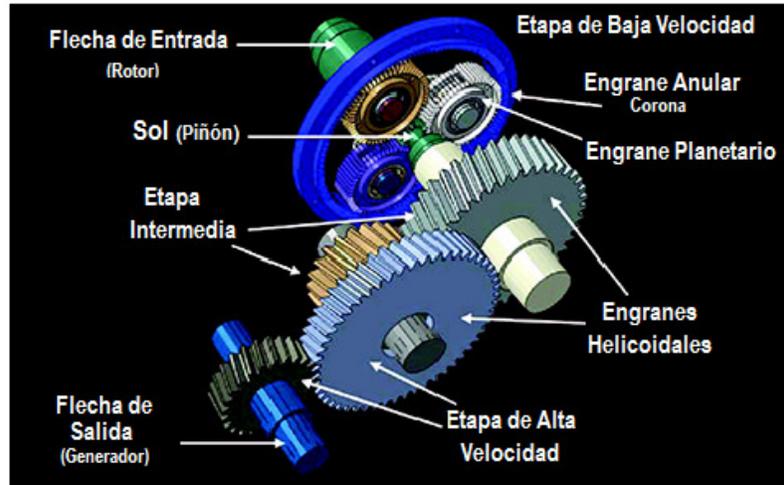


Figura 1.5. Esquema típico de una caja multiplicadora empleada en los aerogeneradores convencionales: una etapa planetaria y dos flechas paralelas de engranajes helicoidales [12].

La multiplicadora de un aerogenerador se compone de un conjunto de engranajes cuya configuración depende del fabricante. Estos engranajes están dispuestos en un arreglo multietapa y son los responsables directos de transmitir la potencia mecánica. Un diseño muy común consiste en una configuración que tiene dos etapas planetarias y una etapa final helicoidal. En la Figura 1.5 se muestra un esquema de esta configuración. Este arreglo de engranajes puede llegar a alcanzar eficiencias por arriba del 97% y lograr densidades altas de par [11]. Sin embargo, su naturaleza mecánica inevitablemente conlleva a problemas de fricción, desgaste, vibración y ruido, debido a la extraordinaria tensión que sufren por causa de la intermitencia del viento. Cualquier defecto que exista en alguno de los engranes ocasionará un paro en el sistema. Esto hace que la multiplicadora sea el elemento con la mayor tasa de mantenimiento en un aerogenerador. Una pequeña fracción de la potencia transferida por las palas se disipa en la misma multiplicadora debido a la fricción. Por esta razón, las máquinas eólicas de considerable tamaño pueden requerir un sistema de enfriamiento exclusivo para su multiplicadora [12]. Además, los engranajes son uno de los principales contribuyentes del ruido mecánico generado en la góndola. Si bien, los problemas de la multiplicadora no la convierten en el elemento más vulnerable a fallas en un aerogenerador, las averías que en ella se presentan incurren en altas reparaciones y costosos reemplazos de piezas. El resultado de esto es un impacto significativo en los costos de operación y en la disponibilidad del sistema eólico.

1.3.2 La Problemática en la Multiplicadora

Las cajas multiplicadoras típicamente utilizan engranajes planetarios para distribuir el par a lo largo de tres vías, y reducir así las cargas individuales en cada engranaje. Con ello se ha conseguido una transmisión de potencia aceptablemente eficiente. Sin embargo, las cargas torsionales crean deformaciones de flexión en los engranajes y tienden a desalinearlos. Estas desalineaciones, debido a las deformaciones asociadas, se presentan además en las flechas o ejes, en los rodamientos, en los montajes y en las carcasas que soportan a los engranes. Esta situación se vuelve aun más complicada cuando la caja multiplicadora está sometida a fuerzas generadas externamente debido a la naturaleza variable del viento. Todos estos efectos crean, en conjunto, una inaceptable mala distribución de la carga del diente en todo el ancho de la cara de los engranes. Los engranajes mal alineados, las cargas de impacto y las fuerzas desiguales conducen a un alto esfuerzo en el engranaje y a la consecuente fractura a lo largo de sus bordes. Un estudio llevado a cabo por el NREL, [13], mostró que la mayor parte de las fallas en un aerogenerador no comienzan en los engranes o en las deficiencias de diseño de sus dientes. Y efectivamente, las observaciones señalan que las fallas parecen iniciar, bajo ciertas condiciones, en varios lugares específicos donde hay cojinetes o rodamientos. Estas fallas pueden posteriormente avanzar hacia los dientes del engrane cuando los fragmentos dejados por los cojinetes y el exceso de holgura causan que su superficie se desgaste y se desalinee. Los cojinetes contribuyen con el 76.2% de las fallas (dominadas por los cojinetes del eje de alta velocidad y los cojinetes en la etapa de velocidad intermedia), seguidos por los sistemas de engranajes con 17.4% (dominadas por los engranajes helicoidales) [14]. En la Figura 1.6 se puede apreciar la distribución de fallas en un aerogenerador. También se observa además de los cojinetes y los engranajes, otras causas de fallas importantes en los componentes de la caja multiplicadora tienen lugar en el sistema de lubricación y filtrado. Este componente dispuesto entre la flecha principal y el generador es crucial en un aerogenerador. Sin embargo, debido a la problemática anterior presenta dificultades para alcanzar su tiempo de vida proyectado a 20 años como consecuencia de las fallas prematuras que en ella ocurren.

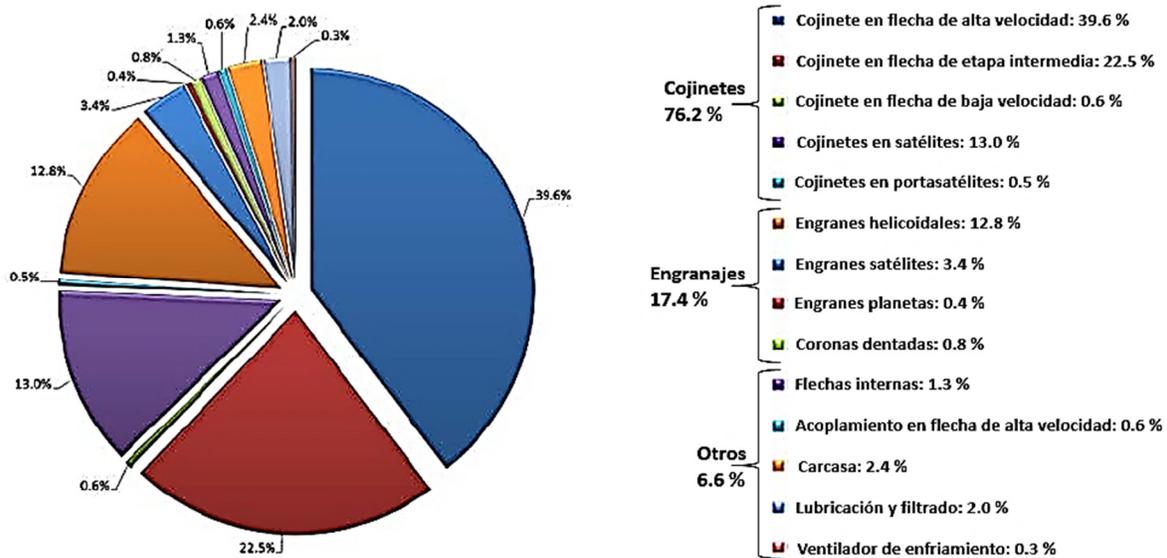


Figura 1.6. Distribución de fallas en un aerogenerador [14].

Otros estudios indican que aproximadamente el 5% de las fallas que se producen en un aerogenerador son fallas que se atribuyen a la caja multiplicadora [15]. Aun cuando este es un porcentaje relativamente bajo y no se presentan con frecuencia, estas fallas tienen un alto costo comparadas con otro tipo de fallas en los sistemas eólicos, ya que causan el mayor tiempo de inactividad en la operación del aerogenerador comparado con otros componentes, [16].

Aunque las estadísticas actuales muestran que la fiabilidad de la mayoría de los subsistemas en un aerogenerador, incluidas las cajas multiplicadoras, ha mejorado con los años, lo cierto es que este último elemento sigue siendo problemático por la naturaleza de las numerosas partes mecánicas en movimiento que la conforman (aproximadamente 30). Un gran número de trabajos han reportado que las fallas en la caja multiplicadora son fallas importantes que pueden aumentar el tiempo de paro y reducir drásticamente la confiabilidad del aerogenerador [17] – [25]. Las multiplicadoras son responsables de aproximadamente 20% del tiempo de inactividad de los sistemas eólicos. Los cojinetes y engranajes en su estructura que dependen de la carga, junto con el sistema de lubricación, son el eslabón más débil del conjunto de elementos de este sistema.

1.3.3 Tecnologías Alternativas

La problemática que plantea la caja multiplicadora en los aerogeneradores, aunado a la necesidad de que los trenes de potencia provean una mejor transmisión de potencia mecánica, ha llevado a diferentes compañías, centros de investigación y universidades a plantear soluciones para lograr el diseño de un tren de potencia lo suficientemente confiable y más eficiente. La tendencia es evitar la caja multiplicadora en un intento de enfrentar de alguna forma los problemas asociados a este elemento. Algunos conceptos presentan tecnologías disruptivas, pero en general se pueden distinguir dos tecnologías que definen al tren de potencia de un aerogenerador moderno: la *tecnología con engranajes (mecánicos)* y la *tecnología sin engranajes*. La selección de una tecnología específica, en la conversión de energía eólica a energía eléctrica, tiene una importante influencia en el costo y la confiabilidad de la generación de energía.

En diseño clásico el tren de potencia que utiliza la *tecnología con engranajes (geared drivetrain)* el eje principal gira lentamente por efecto de las palas del rotor y el par se transmite a través de la caja multiplicadora al eje de alta velocidad para hacer girar el generador eléctrico consistente de unos pocos pares de polos. Las limitaciones físicas de esta tecnología ya han sido discutidas anteriormente. Es importante mencionar que las cargas locales pueden ser originadas por la dinámica del sistema eólico en conjunto, incluyendo la intermitencia del viento, el sistema eléctrico y los controles. Estas cargas “no previstas” causan dentro de la caja multiplicadora, tensiones en los dientes del engranaje. Esto es debido principalmente porque los elementos pueden no estar uniformemente cargados debido a las tolerancias en su manufactura y a las deformaciones y desplazamientos de los componentes del tren motriz. Así pues, el impacto de las cargas locales y las tensiones dependen en gran medida del diseño de la caja de engranajes, [26], [27]. Para erradicar estas limitaciones físicas serían necesarios mejores materiales que puedan lidiar con tensiones mayores, pero hasta el momento no hay información precisa de la disponibilidad de estos materiales. Por tal motivo, los fabricantes han optado por desarrollar diferentes tipos de estructuras para la caja de engranajes que permitan aumentar los niveles de par sin elevar las cargas ni tensiones sobre sus componentes.

La mayoría de las multiplicadoras modernas generalmente utilizan una caja de engranajes con una combinación de eje planetario-paralelo (un eje planetario de dos etapas y un eje paralelo de una etapa con engranajes helicoidales) conectados al generador. El tiempo de inactividad del aerogenerador está relacionado principalmente con fallas en las etapas planetarias. Aunque las investigaciones han planteado técnicas para superar los desafíos en el sistema de transmisión del tren de potencia, un número cada vez mayor de fabricantes está considerando multiplicadoras con un número reducido de etapas de engranajes, o incluso con tecnologías que no los contengan.

Con el propósito de mitigar los inconvenientes asociados con la caja multiplicadora, a principios de los 90s se propuso una especie de transmisión que eliminaría la caja de engranajes de la góndola en un aerogenerador. Esta *tecnología sin engranajes* es la que hoy se identifica como de *accionamiento directo* (*direct-drive* o *gearless*) en la cual, las palas del rotor del aerogenerador mueven directamente al rotor del generador eléctrico. Esto significa que el generador gira a la misma baja velocidad que el rotor del aerogenerador. Por lo tanto, requiere de un generador eléctrico de muchos pares de polos y un mayor diámetro. Un arreglo de este tipo se presenta en la Figura 1.7, en la que se pueden ver claramente los principales aspectos del diseño. Al no existir la multiplicadora, la eficiencia energética del tren de potencia aumenta entre un 3% y un 4%, lo que permite que el aerogenerador arranque con una velocidad bastante baja, de alrededor de 2.5 m/s. Esto da lugar a una mayor generación de energía, sobre todo en sitios donde la velocidad media del viento no es alta. En los aerogeneradores con accionamiento directo se reduce considerablemente el número de partes móviles del tren de potencia, por lo que su estructura se simplifica considerablemente. Esta minimización de piezas giratorias reduce las posibilidades de falla y simplifica el mantenimiento, resultando así en un incremento significativo de fiabilidad y eficiencia, y en una mayor disponibilidad del aerogenerador.

Resulta claro que la ausencia de la multiplicadora reduce sensiblemente el nivel de ruido mecánico, y puesto que los generadores con accionamiento directo operan a velocidades relativamente bajas, también se reduce en ellos el desgaste y el deterioro del sistema eólico.

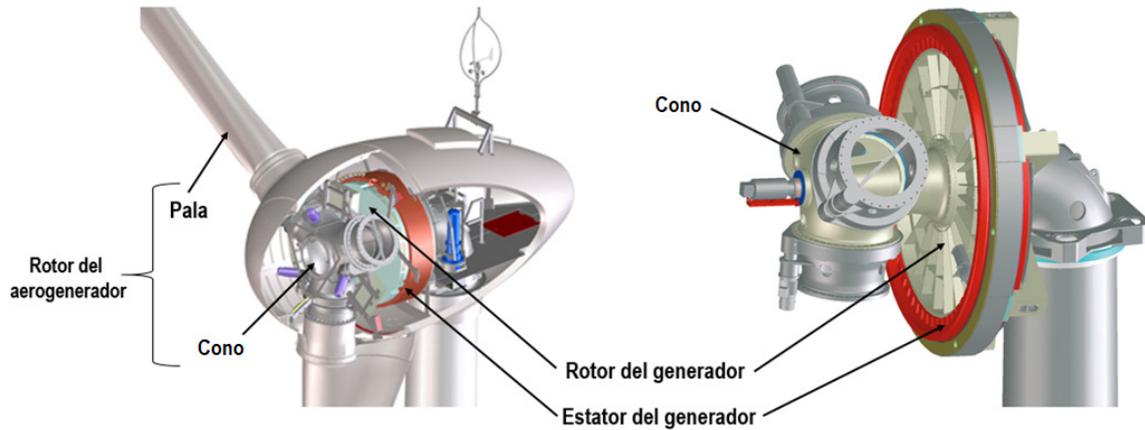


Figura 1.7. Tren motriz con accionamiento directo [28].

Los sistemas eólicos con accionamiento directo usan los *generadores síncronos*, que pueden tener excitación con *imanes permanentes* o bien, con un rotor bobinado y electroimanes suministrando el campo. Un estudio comparativo entre diferentes generadores para accionamiento directo concluyó que las máquinas síncronas de imanes permanentes son superiores en términos de rendimiento energético, confiabilidad y costos de mantenimiento [15], [28]. Por lo tanto, los generadores síncronos de imanes permanentes son los más populares en la tecnología sin engranajes.

A pesar de que el concepto de accionamiento directo es mejor en eficiencia, fiabilidad y simplicidad de diseño, los aerogeneradores con esta tecnología tienen algunas desventajas desde el punto de vista de costos, tamaño y masa lo que hace difícil su manufactura, transporte e instalación. En cuanto a costo, un generador síncrono de imanes permanentes con accionamiento directo de 3 MW podría tener un costo 35% más alto que el de un generador de inducción de la misma potencia que tenga una multiplicadora de tres etapas. Sobre el tamaño y la masa, sin una caja multiplicadora, el diámetro del rotor en un generador con accionamiento directo debe ser lo suficientemente grande para mantener una velocidad de rotación relativamente alta en el entrehierro. En consecuencia, el precio de todas estas ventajas es una góndola de gran masa debida entre otros factores, al alto contenido de cobre del generador multipolar [28].

Hasta el momento no hay algo definitivo en relación a la adopción de los sistemas tecnológicos de aerogeneradores con caja de engranajes o sin ella en el tren de potencia. Ambas tecnologías continúan desarrollándose. Aunque la caja de engranajes de la multiplicadora sigue siendo el eslabón más débil de la cadena en el diseño de aerogeneradores modernos, los fabricantes siguen haciendo progresos en su tecnología, sobre todo para lograr tener un menor número de interrupciones por reparación de fallas y para así alcanzar una mayor fiabilidad. Al mismo tiempo, buscan optimizar el diseño y aprovechar las ventajas de tener una operación menos compleja y un mantenimiento más fácil con el accionamiento directo. No obstante, esta tecnología aún no se ha adoptado universalmente. Si se desea que el accionamiento directo sea más atractivo para el mercado de aerogeneradores, es necesario que todos sus estigmas sean resueltos, sobre todo los relacionados con el precio, el volumen y el peso.

Los sistemas con caja de engranajes como los de accionamiento directo tienen tanto ventajas como inconvenientes, por lo que la industria aún no ha convergido en una tecnología preferida. En [29] se llevó a cabo un estudio de comparación tecno-económica de los aspectos operativos de aerogeneradores con cajas de engranajes y con accionamiento directo. En esta investigación realizada en instalaciones en tierra, los aerogeneradores con caja de engranajes fueron los preferidos desde el punto de vista económico, con la premisa de que el sistema con accionamiento directo puede ser competitivo en costos siempre y cuando se logre una reducción del 50% en el costo de sus componentes. Es por ello que, por ahora, la multiplicadora con caja de engranajes sigue siendo la mejor solución de transmisión estándar en la industria eólica. Como resultado de este análisis comparativo se concluye que las futuras generaciones de aerogeneradores deberán diseñarse con soluciones novedosas para mitigar los inconvenientes en el tren motriz. Esta tendencia se inclina hacia la adopción de una tecnología sin engranajes mecánicos [30]. Con base en esta premisa, una nueva tecnología se integra a las alternativas propuestas. En esta tecnología, la transmisión de potencia mecánica se realiza por medios magnéticos utilizando imanes permanentes, de tal forma que no existe contacto entre las partes móviles. Esta tecnología se identifica como *tecnología de engranajes magnéticos*, y representa una innovación potencialmente disruptiva en el campo de los aerogeneradores.

La tecnología de engranajes magnéticos propuesta como una solución a la problemática existente en la caja de engranajes mecánicos de la multiplicadora en aerogeneradores, es un concepto relativamente nuevo que ha ganado atención en las dos últimas décadas. Aunque la idea de transmitir potencia mecánica por medios magnéticos cuenta ya con más de un siglo, no fue posible llevarla a cabo por las limitantes en el uso de buenos materiales magnéticos y por el apego que se tenía al querer reproducir las mismas geometrías de los engranajes mecánicos. La idea fundamental es que los engranajes magnéticos puedan operar de la misma forma que sus contrapartes mecánicas sin que se establezca un contacto entre las partes que se acoplan, de manera que se pueda ganar en eficiencia al eliminar, en primera instancia, los problemas tan primitivos como los ocasionados por la fricción y el calentamiento.

En un principio, la tecnología de engranajes magnéticos tuvo muy poco avance, principalmente en inventos que se patentaban de manera aislada. Sin embargo, con el descubrimiento y la evolución de los imanes permanentes de tierras raras con alta densidad de energía, como el Samario-Cobalto (SmCo) y el Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB), el desarrollo de los engranajes magnéticos captó poderosamente el interés de investigadores, académicos e inventores.

En el estudio de engranajes magnéticos se han presentado algunas topologías que ofrecen la posibilidad de una transmisión de par más eficiente. Entre ellas, las topologías con modulación de campo han tenido una preferencia especial, y muchos avances en la transmisión de par mecánico por medios magnéticos han girado en torno de ella.

La topología básica de un engranaje magnético con modulación de campo es un arreglo concéntrico coaxial. Su estructura se compone de dos rotores que emplean imanes permanentes y entre ellos un conjunto de piezas polares ferromagnéticas. Esta tecnología utiliza la interacción de dos arreglos de imanes permanentes sincronizados como su principal mecanismo de acoplamiento, y su operación se lleva a cabo por la acción de las piezas polares ferromagnéticas que modulan los campos magnéticos producidos por cada uno de los rotores de imanes permanentes. Su funcionamiento es comparable con el de las cajas de transmisión mecánica de dos y tres etapas planetario/helicoidal, que son las que usualmente se usan en

los aerogeneradores. Debido a que todos sus imanes permanentes contribuyen a la transmisión, los engranajes magnéticos llegan a exhibir densidades de par bastante aceptables, entre 50-150 kNm/m³, con una eficiencia de hasta 99%. De acuerdo a la forma en que se efectúa la magnetización con sus imanes, se distinguen tres configuraciones elementales de diseño de engranajes magnéticos: *radial*, *axial* y *lineal*. La Figura 1.8 muestra un esquema ilustrativo de una transmisión de potencia mecánica utilizando una de las varias topologías de engranajes magnéticos.

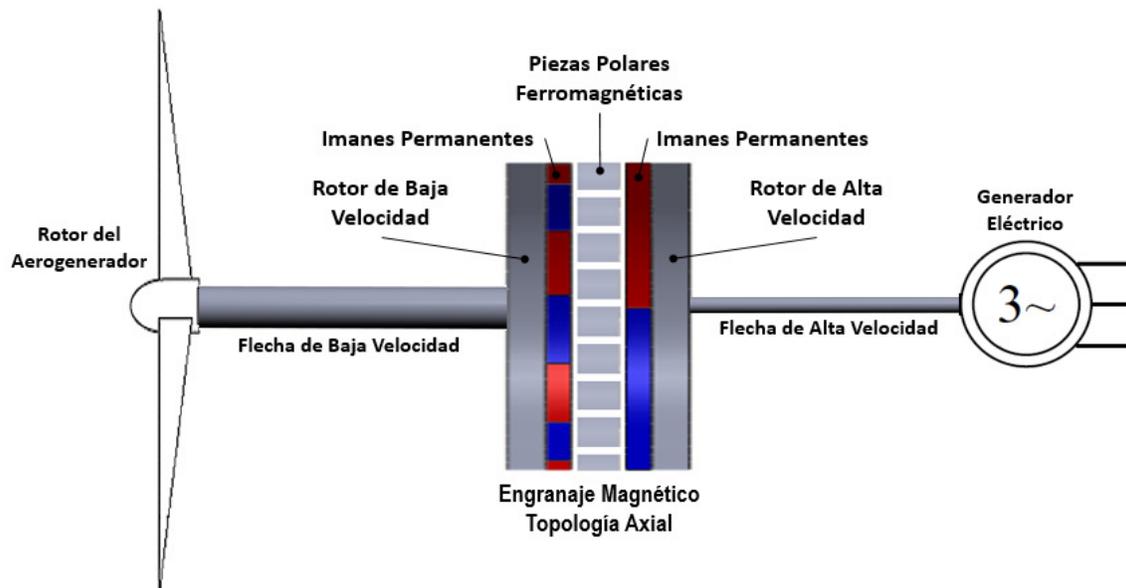


Figura 1.8. Esquema de transmisión de potencia mecánica con engranaje magnético.

Los engranajes magnéticos ofrecen ventajas las siguientes significativas sobre los engranajes mecánicos convencionales:

- Capacidad para aumentar y disminuir la velocidad de entrada.
- Transferencia de potencia sin contacto físico, y por lo tanto pérdidas nulas debido al contacto mecánico (aislamiento físico entre las flechas de alta y baja velocidad).
- Considerable reducción de fatiga mecánica.
- Mayor capacidad de transmisión de par máximo por unidad de volumen (considerablemente más alto que en un motor o en un generador estándar).
- Sin desgaste.
- Relaciones de engranaje altos.

- Operación libre de aceite (sin lubricación).
- Protección inherente de sobrecarga (cuando se presenta una sobrecarga, los engranajes magnéticos experimentan un deslizamiento que evita que el efecto de sobrecarga impacte en el sistema).
- Alta densidad de par.
- Potencial para obtener una alta eficiencia.
- Mantenimiento muy reducido y mejoramiento de la fiabilidad.
- Eliminación de ruido acústico y mínima vibración.

El estudio de los engranajes magnéticos es un tema vigente que por su tecnología se ha convertido en un persuasivo argumento para detonar proyectos en materia de transmisión de potencia mecánica en sistemas de generación de energía eólica. Los trabajos que se han realizado buscan mejorar su manufactura con fines de aplicación industrial. A pesar de que ya ha comenzado la comercialización de productos basados en engranajes magnéticos para la industria [31], la mayor parte de la producción de estas tecnologías permanece todavía en la fase de prototipo, lo que representa una atractiva oportunidad en temas de investigación.

1.4 Antecedentes del Proyecto de Tesis

La idea de transmitir potencia mecánica por medios magnéticos se planteó durante los primeros años del siglo XX [50]. Al principio, se intentó construir estructuras muy similares a las transmisiones con engranajes mecánicos. Éstos se reemplazaban por imanes o electroimanes que conservaban la misma forma que sus contrapartes mecánicas. Durante el siglo pasado, se propusieron una cantidad considerable de diseños de transmisión por medios magnéticos, publicados en patentes y en artículos académicos, los cuales presentaban simulaciones obtenidas con programas basados en elementos finitos [51] – [88]. Sin embargo, sus estructuras no dejaban de tener la misma configuración que los diferentes tipos de engranajes mecánicos. Estas configuraciones se estudian en el Capítulo 2 de esta tesis. Tales diseños se consideraban como una conversión directa de los engranajes mecánicos, y utilizaban comúnmente imanes de ferrita en sus configuraciones que no permitían utilizarlos en su totalidad durante la transmisión. Debido a ello, las transmisiones magnéticas exhibían

un pobre desempeño, por lo que su estudio dejó de ser atractivo. En los años 80s, aparecieron los imanes de “tierras raras” con características muy superiores a los de ferrita [90] – [92]. Las transmisiones magnéticas con imanes permanentes de alta energía, que ya se identificaban como engranajes magnéticos, volvieron al interés de académicos e inventores. Pero no fue sino hasta principios de este siglo XXI cuando se presentaron los primeros diseños de engranajes magnéticos de alta energía [100] – [114]. Estos diseños utilizan principalmente imanes de neodimio y su configuración topológica es completamente diferente a aquellas que trataban de imitar a sus análogos mecánicos. Durante la primera década de este siglo se presentaron las dos principales topologías que dan cauce al concepto moderno de engranaje magnético conforme a la magnetización de sus imanes permanentes: radial y axial. La mayor parte de los trabajos de investigación y desarrollo se inclinaron por la topología radial, en parte por ser la primera que se empezó a investigar. Por el contrario, un reducido número de investigaciones se enfocaron en la topología axial. En la Línea de Investigación de Potencia y Energías Renovables del TecNM Campus La Laguna se tomó nota de ello se planteó el objetivo de investigar al engranaje magnético con topología axial. Los trabajos que se han reportado en torno a este tipo de engranaje magnético se centran en mejorar su desempeño y lograr mayor densidad de par. Para esto, se han planteado cambios de sus diferentes componentes, modificando, por ejemplo, el tamaño y la forma de los imanes permanentes y las piezas polares, así como en la optimización de su estructura. Mediante un profundo análisis de la literatura hasta el año 2022, se constató que el estudio de los engranajes magnéticos se encuentra ya en una etapa de maduración, pero su estudio de ninguna manera está agotado. El análisis de la literatura reveló que no existían publicaciones de trabajos que abordaran el engranaje magnético con topología axial considerando una combinación del método del circuito equivalente magnético basado en reluctancias, y formulación de mallas, junto con un esquema de optimización multiobjetivo usando algoritmos genéticos. El estudio este tópico ha dado como resultado esta tesis, cuyo contenido se presenta detalladamente en este documento.

1.5 Objetivos de la Investigación y Contribuciones

La investigación realizada en esta tesis se centra en el estudio y diseño de un engranaje magnético con imanes permanentes de alta energía, de montaje superficial y con magnetización axial. El enfoque está dirigido hacia una potencial aplicación en el tren motriz de una caja multiplicadora, la cual es el elemento principal del sistema de transmisión de potencia mecánica en un aerogenerador, y a la vez la causante de fallas importantes en el sistema eoloeléctrico. Existen algunas topologías que se han analizado para llevar a cabo tal aplicación, como la coaxial radial y la lineal. Sin embargo, no existe literatura suficiente donde se haya considerado la topología axial para aplicaciones en aerogeneradores. Todo el estudio realizado en este trabajo se enfoca en analizar al engranaje magnético con topología axial con una configuración de sistema multiplicador, tal y como lo hacen las cajas multiplicadoras con engranajes mecánicos en los aerogeneradores actuales.

El primer objetivo de investigación en este trabajo de tesis es explorar el método de circuito equivalente magnético formado con redes de reluctancias y formulación de mallas, la cual ha pesar de ser una de las configuraciones más sencillas para el modelado de máquinas eléctricas ofrece resultados bastante aceptables. Existe un número reducido de publicaciones que han realizado este tipo de investigación basada en permeancias y análisis nodal.

El segundo objetivo consiste en aplicar al modelo del engranaje con circuito equivalente magnético, un esquema de optimización empleando algoritmos genéticos. Existen otros algoritmos diferentes de optimización que se han aplicado a esta topología. Sin embargo, pero no se ha encontrado evidencia de que se haya aplicado un esquema de optimización como el utilizado en esta tesis.

La principal contribución de este trabajo de tesis se sintetiza en el desarrollo y análisis de un modelo para un engranaje magnético con topología axial, utilizando el método del circuito equivalente magnético. La red de reluctancias y la formulación de mallas facilitan la construcción y la solución de este modelo. El alcance de la tesis comprende la simulación del modelo mediante un programa computacional en MATLAB. Los resultados obtenidos son comparados y validados con un modelo basado en elemento finito construido con el software

comercial ANSYS-Maxwell. La contribución más destacada de la investigación realizada es que se abre una nueva línea de investigación que posiciona a la Línea de Investigación de Potencia y Energías Renovables del TecNM Campus La Laguna como una de las principales precursoras en el estudio de los engranajes magnéticos a nivel nacional.

1.6 Estructura de la Tesis

La tesis está estructurada en cinco capítulos principales y un sexto capítulo que contiene las conclusiones generales y la descripción de trabajos futuros. Al final, un apartado de Referencias contiene todas las fuentes de información, principalmente libros y artículos, consultados para dar soporte a la investigación realizada. El contenido de cada capítulo se presenta a continuación:

El Capítulo 1 expone datos importantes sobre la problemática que enfrentan los fabricantes de aerogeneradores en la caja multiplicadora. El objetivo aquí es encontrar una justificación documentada para poder considerar un sistema que la sustituya. Con esta base, se estudia la tecnología elemental de los aerogeneradores con un enfoque en el sistema de transmisión de potencia mecánica. En este sistema se analiza el desempeño de la caja multiplicadora y la problemática ocasionada en la transmisión de potencia. Para abordar tal problemática, se analizan las alternativas más relevantes para su posible sustitución, entre las que destaca la tecnología de engranajes magnéticos.

En el Capítulo 2, se presenta una discusión detallada del estado del arte referente a los sistemas de transmisión de potencia mecánica que utilizan arreglos de engranajes. Se analizan los engranajes mecánicos desde una perspectiva del origen de sus fallas, que al final de cuentas repercuten en la multiplicadora convencional de un aerogenerador. En la búsqueda de una alternativa a esta problemática, se estudia toda la teoría básica de los engranajes magnéticos, incluyendo sus potenciales aplicaciones en aerogeneradores. En este capítulo, se concluye que el engranaje magnético con topología axial es un adecuado objeto de estudio para llevar a cabo su investigación en esta tesis.

El Capítulo 3 presenta la revisión de la literatura en torno al engranaje magnético con topología axial, así como una explicación detallada de su estructura, de su topología y de su principio de operación. También se estudian las diferentes técnicas utilizadas para su modelado y análisis, entre las cuales destaca la del circuito equivalente magnético. Este método es una opción viable para llevar a cabo su análisis pues requiere un bajo esfuerzo computacional y los resultados son bastante precisos y confiables.

En el Capítulo 4 se desarrolla el modelado del engranaje magnético. Con base en el estudio de los capítulos anteriores, se utiliza el método del circuito equivalente magnético para explicar la forma en que se construye el modelo mediante redes de reluctancias. También se presenta la formulación basada en una configuración de mallas y se analiza la solución del sistema de ecuaciones no lineales empleando el método de Newton–Raphson.

El Capítulo 5 se presenta el esquema de optimización para obtener el diseño óptimo del engranaje magnético estudiado. Se estudian los conceptos básicos de acuerdo con el contexto del esquema de optimización aplicado, que consiste en el uso de algoritmos genéticos multiobjetivo para optimizar el modelo desarrollado en MATLAB. Comparando los resultados de este modelo con un modelo de elementos finitos en software comercial se valida y verifica el desempeño del producto de esta tesis, logrando cumplir con los objetivos de investigación planteados.

Finalmente, en el Capítulo 6 se presentan las conclusiones de esta tesis y se plantea el trabajo futuro, seguido del apartado de las Referencias.

Capítulo 2

Estado del Arte de la Transmisión de Potencia Mecánica basada en Sistemas de Engranajes

2.1 Engranajes Mecánicos

Un engrane es una rueda con un determinado número de dientes (rueda dentada), simétricamente espaciados para engranar con los dientes de otra rueda dentada con el fin de transmitir movimiento. Cuando un engrane individual se acopla con otro, se crea un par de engranes o engranaje. Un engranaje, identificado también como sistema de engranes, y en ocasiones como tren de engranes (varios engranes acoplados), es el mecanismo que históricamente ha resultado ser el más eficiente para acoplar máquinas con diferentes velocidades. Su función cinemática es transmitir potencia mecánica con movimiento rotacional, desde un eje de entrada hasta un eje de salida, por medio del contacto entre dientes que se van acoplando sucesivamente conforme el sistema gira. En su configuración más simple, un engranaje se compone de una rueda dentada con un pequeño número de dientes (engrane menor llamado piñón), que engrana con una rueda que tiene un número mayor de dientes (rueda o engrane). Los ejes respectivos de ambos engranes son paralelos, tal y como se observa en la Figura 2.1.

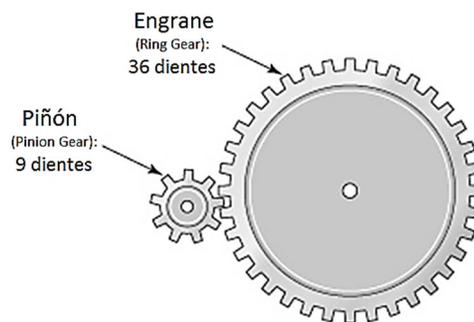


Figura 2.1. Engranaje simple: engrane y piñón [33].

En la literatura sobre diseño de mecanismos [32] – [34], el engrane que está unido al eje motriz o de entrada (fuente de potencia) generalmente se identifica como el impulsor (*driving*) mientras que el engranaje que está unido con el eje de carga o de salida se conoce como el impulsado (*driven*). Una ilustración de estos conceptos puede observarse en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Engranaje simple: impulsor e impulsado [33].

En los sistemas eólicos utilizados para la generación de electricidad, los engranajes se usan principalmente para transmitir un par de torsión y adaptar velocidades. En tales sistemas, el engranaje de la multiplicadora incrementa la velocidad, pero debe aceptarse una reducción en el par de torsión. La transmisión de par depende de la relación de engranaje, del número de engranes, de la circunferencia y del número de dientes de los engranes, así como de la cantidad de etapas que componen el engranaje. Con base en la Figura 2.3, supóngase que el engrane unido al eje motriz es el engrane de entrada, E , el cual tiene un número de dientes igual a N_E , y desarrolla un par T_E girando a una velocidad angular constante ω_E . Este movimiento se transfiere a través del contacto directo en el punto de paso P (común a ambos engranes), obteniéndose un giro en el engrane de salida S , el cual está unido al eje de carga que consta de N_S dientes y genera un par T_S a una velocidad angular ω_S . La velocidad del engrane de salida permanece constante obedeciendo a la *ley fundamental de los engranajes*, la cual establece que, *la razón de velocidad angular entre los engranes de un tren de engranes debe mantenerse constante a través del acoplamiento*. Este es el criterio fundamental que rige la selección de los perfiles del diente en cada engrane. Si esto no se cumpliera para el engranaje, se producirían vibraciones y problemas de impacto, incluso a velocidades bajas [34].

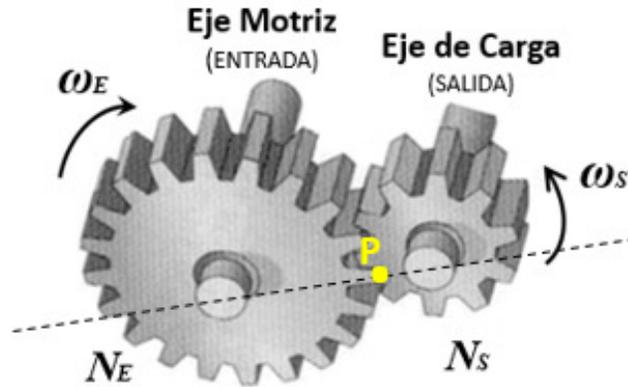


Figura 2.3. Ilustración de la relación de engranaje [34].

Para el esquema mostrado en la Figura 2.3, la relación de velocidades angulares, que es igual a la relación cinemática de ambos engranes, es la *relación de engranaje* (G_R) dada por la siguiente ecuación:

$$G_R = \frac{\omega_S}{\omega_E} = \frac{T_E}{T_S} = \pm \frac{N_E}{N_S} \quad (2.1)$$

Nótese que la ecuación 2.1 toma en consideración la disposición de los engranes que conforman el engranaje, ya sean externos o internos. Un *engranaje externo*, como el mostrado en la Figura 2.4a, invertirá la dirección de rotación de los engranes, lo cual implica un signo negativo en dicha ecuación. Un *engranaje interno*, como el de la Figura 2.4b, tendrá la misma dirección de rotación, lo que dará un signo positivo en la ecuación. Esta última configuración, generalmente se utiliza en los engranajes planetarios ya que ofrece una configuración compacta.

La ecuación 2.1 señala también que la relación de velocidades y la relación de pares puede calcularse a partir del número de dientes en los engranes acoplados. Dichas relaciones deben ser siempre valores enteros, es decir, $G_R > 1$, dependiendo de si la relación de velocidad o relación de par es mayor que 1. De esta manera, G_R expresa la relación general de un tren de engranes independientemente del cambio en la dirección de giro o de la dirección del flujo de potencia a través del tren de transmisión, sin importar si opera como un reductor o como multiplicador de velocidad.

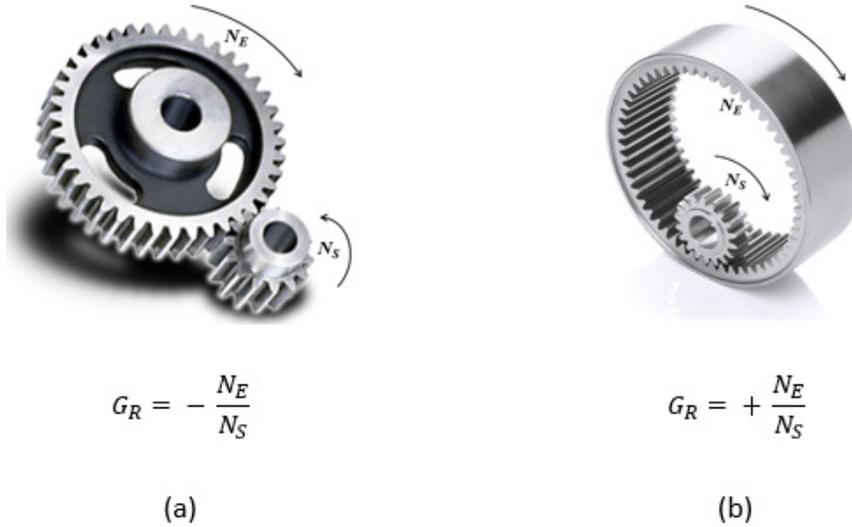


Figura 2.4. Dos configuraciones del engranaje simple: (a) Engranaje externo. (b) Engranaje interno. [34].

En un aerogenerador la relación de engranaje corresponde a una transmisión de multiplicador de velocidad [35], y está definida como:

$$G_R = \frac{\omega_{generador}}{\omega_{rotor}} \quad (2.2)$$

donde $\omega_{generador}$ es la velocidad rotacional en el eje del generador y ω_{rotor} es la velocidad rotacional del eje principal del rotor del aerogenerador, ambas cantidades en rpm. Con base en la Figura 1.4, estas cantidades se indican en la Figura 2.5.

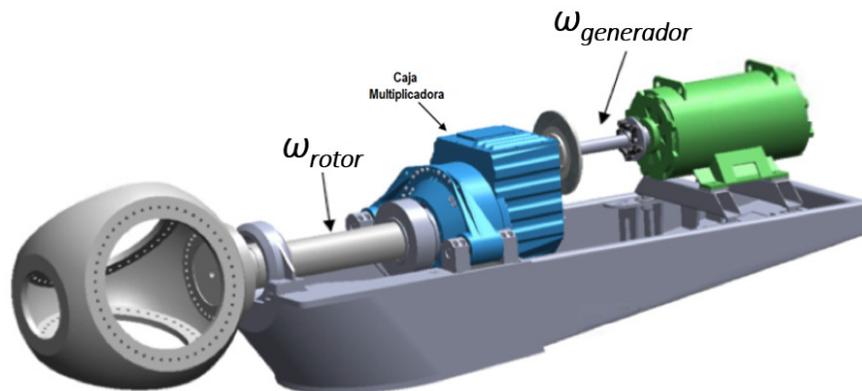


Figura 2.5. Relación de transmisión en un aerogenerador [7].

2.1.1 Topología de los Engranajes Mecánicos

La función cinemática de los engranajes mecánicos o convencionales es transmitir potencia mecánica con movimiento rotacional desde un eje de entrada hasta un eje de salida. Estos ejes pueden ser paralelos, perpendiculares, o dispuestos en cualquier otro ángulo entre ambos. Para ello los engranajes se diseñan en diferentes configuraciones o topologías de acuerdo a una aplicación en particular. Entre los diseños más comunes, según la forma del diente y disposición de sus ejes, se encuentran los engranajes *rectos*, *helicoidales*, *de gusano*, *cónicos*, *piñón y cremallera*, además de los *planetarios*. En la Figura 2.6 se ilustran estas topologías.

Los *engranes rectos* se utilizan para transmitir *movimiento rotatorio entre ejes paralelos*. Por lo común estos engranajes son cilíndricos, y los dientes son rectos y paralelos al eje de rotación del engranaje. Este diseño es el tipo más fundamental, más común, más simple y menos costoso, pero también es el que provoca más ruido entre las diferentes topologías. Los engranajes rectos solo pueden acoplarse si sus ejes son paralelos. En la Figura 2.6a se muestra un engranaje recto. Con este diseño se forman los dos tipos de engranajes de la Figura 2.4. En el engranaje externo (Figura 2.4a), el sentido de giro de los dos engranes es siempre opuesto, mientras que, en el engranaje interno (Figura 2.4b), ambos engranes siempre giran en el mismo sentido.

Por su cinemática, y desde un punto de vista de transferencia de movimiento, los *engranajes helicoidales* no son muy diferentes de los engranajes rectos. De hecho, un engranaje helicoidal se considera una extensión de un engranaje recto hacia una geometría más compleja, ya que los dientes se encuentran formando lo que se conoce como un ángulo de hélice con respecto al eje del engrane. En la Figura 2.6b puede observarse el engranaje tipo helicoidal de ejes paralelos. Este tipo de engranajes operan con menores tensiones de contacto y con una transferencia de movimiento más uniforme. Además, tienen un contacto más suave y más gradual entre sus superficies angulares conforme sus dientes se acoplan, y en consecuencia son más silenciosos que los engranajes rectos. Sin embargo, uno de sus inconvenientes es la generación de fuerzas axiales parásitas. Las cargas axiales resultantes deben ser cuidadosamente consideradas durante su diseño.

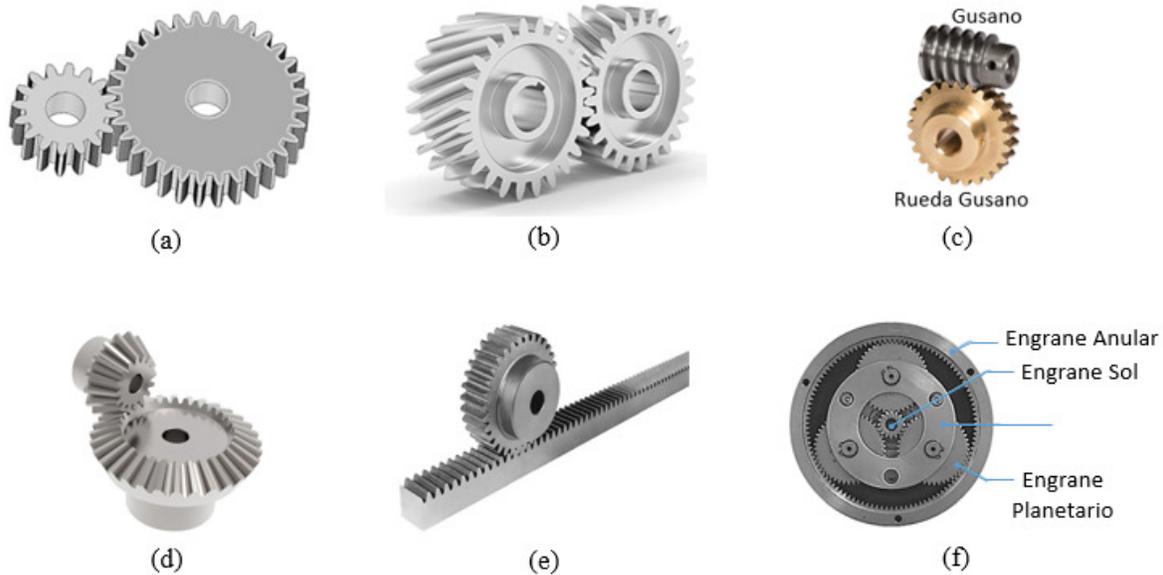


Figura 2.6. Topologías básicas de engranajes mecánicos: (a) Engranaje recto. (b) Engranaje helicoidal. (c) Engranaje de gusano. (d) Engranaje cónico. (e) Engranaje piñón y cremallera. (f) Engranaje planetario. [32] – [34].

Los *engranes de gusano* se emplean para *transmitir movimiento rotatorio entre ejes que no pueden tener una intersección y que forman casi siempre un ángulo de 90°*. Sin embargo, no existe razón alguna por la que no se puedan usar otros ángulos entre los ejes si el diseño así lo requiriera. En la Figura 2.6c se muestra este mecanismo. El engranaje de gusano tiene la ventaja de lograr relaciones de engranajes o de transmisión muy altas en un pequeño paquete y puede soportar cargas muy grandes. Quizá su ventaja más interesante, que otros engranajes no tienen, es que puede diseñarse para que sea imposible de retroceder en su giro. El gusano puede girar fácilmente a la rueda gusano, pero ésta no puede girar al gusano. Esto es porque el ángulo de los hilos en la rosca en espiral del gusano es tan poco profundo que cuando la rueda gusano intenta girar, la fricción entre esta rueda y el gusano mantiene a este último en su lugar. Tal característica lo hace útil en aplicaciones donde la carga no pueda sostenerse (tienda a regresarse), manteniéndola así sin retroceder y sin la necesidad de utilizar un freno. Desde un punto de vista cinemático, la relación de engranaje para un engranaje gusano está definida en la misma forma que para los otros tipos engranajes, es decir, como una relación entre el número de los dientes correspondientes, considerándose que el número de dientes para el gusano es su número de hilos.

El engranaje de gusano puede ser usado para accionamientos en ángulo recto. Sin embargo, para *cualquier ángulo entre dos ejes, incluyendo 90°*, los engranajes cónicos pueden ser la solución. Los *engranajes cónicos transmiten movimiento entre flechas cuyos ejes pueden tener una intersección*, mientras que sus planos de rotación pueden variar, esto los hace muy útiles cuando es necesario cambiar la dirección de los ejes. Usualmente estos engranajes están montados en ejes a 90°, pero pueden diseñarse para trabajar con cualquier otro ángulo. En la Figura 2.6d se muestra un engranaje cónico de dientes rectos. Este tipo de engranaje presenta el mismo problema que los dientes en los engranajes rectos, pues a medida que cada diente se acopla se impacta al diente adyacente en cada avance. A pesar de que su principal inconveniente es la dificultad de su manufactura, tiene la ventaja de operar a altas velocidades y altas cargas con un buen índice de precisión. Un engranaje cónico muy delgado prácticamente tiene las mismas propiedades que un engranaje recto. De esta similitud, se deduce que la relación de engranaje para un par de engranes cónicos es determinada de la misma forma que para los engranes rectos y para los helicoidales.

El *engranaje piñón y cremallera*, ilustrado en la Figura 2.6e, está integrado por un eje o barra dentada conocida como *cremallera* que engrana con una rueda circular también dentada llamada *piñón*. Este arreglo se utiliza para *convertir movimiento de rotación en movimiento lineal*. Por lo general, cuando se hace girar el piñón, que es un tipo de engranaje recto, éste origina un desplazamiento lineal en la cremallera. Dado que la cremallera con longitud infinita no es posible en el mundo real, los engranajes de piñón y cremallera no se utilizan para transferir movimiento continuo; se utilizan más bien para transferir movimiento de traslación.

Una de las topologías de engranajes que tiene una relevancia importante en la industria eólica es el *engranaje planetario*, también conocido como epicicloidal. Una versión típica de esta topología se ilustra en la Figura 2.6f. Las cajas multiplicadoras de los aerogeneradores utilizan en su gran mayoría arreglos de engranajes tipo planetario/helicoidal de tres etapas como parte principal de su sistema de transmisión de potencia mecánica. Esto se debe a que el engranaje planetario ofrece más precisión, mayor rigidez torsional y una mejor distribución de las cargas, incrementando con ello su vida útil. Además, pueden proveer relaciones de transmisión óptimos. Los sistemas de engranajes planetarios con engranes helicoidales en comparación

con los que tienen engranes rectos de ejes paralelos ordinarios, tienen una relación de contacto más grande entre sus dientes, la cual se define como el número de dientes que engranan en un momento dado. Mientras que en un engranaje recto típico esta relación de contacto es de 1.5, en un engranaje helicoidal es de 3.3, esto es un poco más que del doble. Los engranajes planetarios también exhiben densidades altas de potencia en su transmisión, son capaces de soportar cargas mayores y pueden tener altas relaciones de transmisión. Además, este tipo de engranajes pueden ofrecer una gran variedad de combinaciones para aumentar sus aplicaciones con un diseño compacto [36], [37].

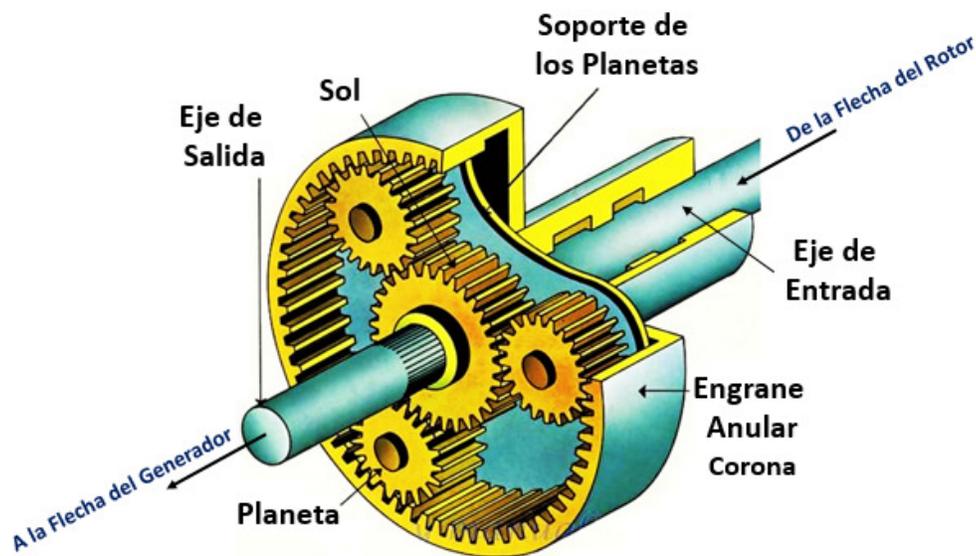


Figura 2.7. Engranaje planetario típico [37], [41].

La Figura 2.7 muestra un engranaje planetario típico, el cual consta de tres engranes *planetas* montados sobre un soporte móvil o *porta-planetas*. Éstos giran alrededor de un engrane central al que se le da el nombre de *sol*. Para llevar a cabo una reducción o un incremento en la velocidad, se incorpora un engrane externo con dentado interior conocido como engrane *anular o corona*, el cual engrana con los planetas. Para asegurar que la carga se distribuya por igual, el sol “flota” de manera que pueda encontrar un eje que asegure su equilibrio y compense los errores colectivos en el desvío de los respectivos ejes de la rueda solar, del soporte planetario y también del anular.

Aunque el engranaje planetario es más utilizado en la caja de transmisión de vehículos, su uso en las multiplicadoras de los aerogeneradores ha sido fundamental en el acoplamiento de los ejes de baja y alta velocidad para transmitir potencia mecánica. De acuerdo con la Figura 2.7, el porta-planetas es impulsado por un par de entrada proveniente de la flecha de baja velocidad que conecta con el rotor. El sol proporciona el par de salida hacia el generador, mientras que el engrane anular o corona permanece fijo. También se pueden agregar engranes planetarios redundantes. Esto produce un mejor equilibrio de fuerzas pues al agregar más engranes planetarios se aumenta el número de fuerzas, pero los planetas adicionales en nada contribuyen al comportamiento cinemático. Sea cual fuere el número de planetas utilizados únicamente se puede emplear un solo soporte o brazo.

En general, los aerogeneradores modernos con tecnología de generadores eléctricos de alta velocidad, requieren trabajar con relaciones de transmisión mayores a 1:100. Sin embargo, no es práctico tener una multiplicadora de solamente una etapa para lograr una mayor relación. En la práctica, una relación de transmisión igual o mayor a 1:100 requiere de tres etapas. Para minimizar el tamaño y el peso, particularmente en las primeras dos etapas de alto par y baja velocidad, usualmente se emplea un engranaje planetario en el cual la carga se comparte a través de uno o más pasos de carga paralelos. En la Figura 1.5 se presentó una multiplicadora de tres etapas.

Los criterios relevantes para evaluar el rendimiento de un engranaje son la *densidad de par* o relación par/volumen referente a la capacidad para transmitir par dentro de la unidad de volumen, y la *eficiencia*, considerada como la relación salida de potencia/entrada de potencia, expresada como un porcentaje o como una fracción decimal.

En un mecanismo de transmisión de potencia compuesto por *engranajes rectos*, la eficiencia es muy alta, pudiendo alcanzar hasta un 99% en sistemas con engranajes de alta velocidad que se fabriquen de buen material, con una excelente mano de obra y que tengan una apropiada lubricación en su operación. En condiciones promedio de trabajo es común alcanzar una eficiencia de entre 97% y 98% con relaciones de transmisión desde 1:1 hasta 10:1. Sin embargo, la desventaja que tienen estos engranajes es el ruido que generan durante

su operación, además de ser propensos a sufrir desgaste y desarrollar juego entre ellos más rápidamente que en los otros tipos. Los *engranes helicoidales* son menos eficientes que los engranajes rectos debido a la fricción por deslizamiento a lo largo del ángulo de hélice, que normalmente es de 10° a 30° . Además, exhiben una fuerza de reacción y cargas radiales a lo largo de sus flechas, mismas que los rectos no presentan. Un engranaje helicoidal de ejes paralelos (Figura 2.6b) tiene alrededor de un 96% a 98% de eficiencia y su relación de engranaje está entre 1:1 y 8:1.

El *engranaje de gusano* usualmente es usado cuando hay necesidad de transferir movimiento entre ejes perpendiculares, y también cuando se requieren una alta reducción de engranaje y una alta multiplicación de par. Típicamente, el rango de eficiencias al que opera este tipo de engranaje está entre un 50% para una doble relación de reducción de 400:1 y un 90% para una relación de reducción simple de 5:1.

Los *engranajes cónicos* son como los engranajes rectos, excepto por su configuración básica en forma cónica. Al estar montados con ejes que tienen intersección (no son paralelos como en los rectos) se consigue un arreglo que minimiza la fricción entre los engranes llegando a ser tan eficientes como los engranajes rectos, con eficiencias en el rango de 96% a 98%, pero con relaciones de transmisión desde 5:1 hasta 400:1.

La característica principal del *engranaje piñón y cremallera* es su alto nivel de eficiencia, alcanzando entre 98% y 99.5%. Usualmente representan una de las mejores opciones en casos de fuerzas axiales elevadas. La relación de engranaje determina el número de revoluciones que hace el piñón en relación con la distancia lineal que recorre la cremallera sobre la que se mueve. Dependiendo del tamaño de este engranaje, su relación de transmisión puede ser desde 3:1 hasta 13.7:1 en tecnologías con sistema de piñón de rodillos [38].

Los *engranajes planetarios* son sistemas que se caracterizan por su alta eficiencia. Se utilizan en aplicaciones que requieren relaciones de transmisión altas, dimensiones pequeñas y una gran relación potencia/peso. Existen varias configuraciones de este tipo de engranaje. El diseño más simple consta de una etapa y se caracteriza una forma altamente eficiente y

efectiva de transmitir potencia mecánica. Aproximadamente el 97% de la entrada de potencia se entrega como salida, con relaciones de engranaje de entre 3.48:1 y 7.2:1. Con dos etapas la eficiencia disminuye a 95% y la transmisión se realiza entre 12.1:1 y 51.8:1. Las de tres etapas tienen una eficiencia del 92% con transmisiones de 63:1 a 373:1. Finalmente, las de cuatro etapas presentan una eficiencia del 90% y una relación de transmisión que va de 403:1 a 2687:1 [39]. Los engranajes planetarios tienen una pérdida de eficiencia típica del 3% por etapa. Esto asegura que una alta proporción de la energía que se ingresa (alrededor de 97%) se transmita a través de la caja de engranajes, en lugar de desperdiciarse en pérdidas mecánicas dentro de ella.

Para el caso específico de la caja de engranajes en un aerogenerador, en una multiplicadora convencional de tres o cuatro etapas, la primera etapa es con frecuencia una transmisión planetaria ya que ese diseño maneja mejor el par alto, mientras que las dos últimas etapas utilizan engranajes helicoidales. Una relación de transmisión común en las multiplicadoras es de aproximadamente 1:90, con una velocidad de entrada de 16.7 rpm desde el rotor y una velocidad de salida de 1500 rpm para el generador. Sin embargo, cada fabricante maneja sus estándares de acuerdo al tamaño de los aerogeneradores que produce.

2.1.2 Causas de Falla en los Engranajes Mecánicos

El mecanismo de las transmisiones con engranajes es simple, los dientes de los engranes se acoplan y cada uno rueda sobre el otro para transmitir potencia mecánica. Sin embargo, para dos engranes cualesquiera que giran tocándose, se crean tensiones de contacto entre ellos. Cuando esto sucede, la capacidad de transmisión de potencia está limitada por su resistencia a dos modos principales de falla: una está relacionada con la fatiga superficial en el flanco de los dientes (*picaduras*) y la otra es debida a la fatiga por *flexión* en la raíz de los dientes (contribución de la fricción del diente) [40]. En la Figura 2.8a, se puede observar el mecanismo de dos engranes acoplados, mientras que la Figura 2.8b muestra una ilustración de cómo se desarrollan las fuerzas de fricción en el punto de paso (punto teórico definido como de primer contacto) entre dos dientes debido al movimiento cinemático en el engranaje.

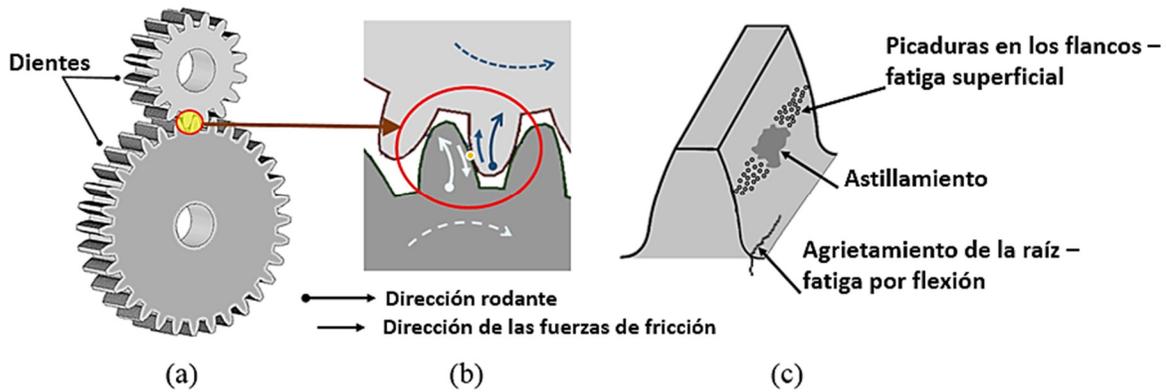


Figura 2.8. Un mecanismo ordinario de transmisión por engranajes: (a) Dos engranajes engranando. (b) Mecánica del engranaje entre dientes (en el punto de primer contacto). (c) Fallas en los dientes del engrane. [40] – [42].

Las picaduras en los flancos de los dientes son el daño más significativo que se produce con los engranajes. Éstas inician con la aparición de pequeñas cavidades sobre la superficie de los flancos que crecen hasta formar verdaderos hoyos. Tal anomalía es causada por tensiones de contacto cíclicamente variables debido a la acción propia de engranaje y se acentúa con cualquier irregularidad de la superficie en presencia de un lubricante; de hecho, la picadura es una falla relacionada con la lubricación. Cuando la picadura es progresiva, ésta se vuelve más peligrosa, causando fallas debido a un proceso de fatiga cuando los dientes de los engranes están sujetos a altos esfuerzos de contacto y muchos ciclos de estrés. Las fallas también pueden deberse a un problema con los engranes que no ajustan correctamente. En este caso, las picaduras se concentrarán en áreas con mucha carga. El resultado es un área de remoción de metal, que usualmente veces se denomina *descamación* o *astillamiento*. Las picaduras pueden deteriorar los dientes del engranaje y generar fuerzas dinámicas. Estas fuerzas hacen que los dientes del engranaje fallen debido a la fatiga por flexión. En tales casos, la falla de flexión es secundaria y no está directamente relacionada con la lubricación. La Figura 2.8c muestra dos modos comunes de falla en los dientes donde predomina la fatiga. Las picaduras progresivas provocan la destrucción de los flancos de los dientes del engranaje, y en consecuencia estos comienzan a vibrar y, si la operación no se suspende, puede ocurrir la destrucción completa de la transmisión por engranajes [41]. Se puede inferir que estas picaduras dependen directamente de la transferencia de carga. Cuando son destructivas, se

refiere a un problema de sobrecarga superficial. Además, frecuentemente hay fricción por deslizamiento entre las superficies de los dientes del engranaje cuando éste está operando. Esta es una de las principales causas de pérdida de potencia en los engranajes, lo que afecta la eficiencia de la transmisión [42]. Todo esto significa que las pérdidas están fuertemente influenciadas por la carga transmitida y por la fricción entre las superficies de los dientes [43]. Las picaduras representan aproximadamente el 14% de la frecuencia de ocurrencia de los daños en los engranajes, y aunque el 90% de las picaduras se estabilizan y no constituyen una amenaza directa para la vida útil de los engranes, es importante poder detectarlas [44].

Las transmisiones por engranajes también pueden ser ruidosas debido a las fluctuaciones de par asociadas con la transferencia de carga de un diente a otro a medida que los engranes interactúan. Al tener un deslizamiento entre las superficies de sus dientes, el contacto inicial entre éstos se produce a lo largo de todo el ancho del diente a la vez, provocando cargas de impacto audibles que inducen ruido y desgaste. A medida que las caras de los dientes de los engranes se desgastan, desarrollan aristas y pequeños hoyos. Estos se vuelven gradualmente más grandes y, a medida que crecen, estas imperfecciones harán que se produzca aún más ruido. El ruido aumenta bruscamente con el aumento de la velocidad periférica (frecuencia de contacto del diente) y, en menor medida, con una sobrecarga en el diente. La lubricación ayuda a mitigar estos problemas. Sin embargo, muchas de las fallas identificadas están relacionadas con las condiciones tribológicas del sistema de transmisión, las cuales dependen en gran medida de las propiedades lubricantes, que a su vez son función de la temperatura [45]. La agitación del aceite lubricante es otra de las principales pérdidas de potencia en los engranajes. Por lo tanto, la necesidad de mantenimiento frecuente se convierte en una condición crítica para el correcto funcionamiento de los engranajes.

En general, durante la vida útil de una caja de engranajes, no son tolerables ni las picaduras ni el desgaste severo en los engranes. Tales daños podrían conducir a vibraciones inaceptables. Una fuente dominante de vibración se genera por la interacción de cada par de engranes debido a la rigidez variable de acoplamiento. Ésta es una de las excitaciones internas más importantes de la transmisión por engranajes [46]. La rotura de un diente provoca una reducción de la rigidez del engranaje, lo que provoca una vibración anormal de los engranes

[47]. En consecuencia, la energía de vibración se transmite a la carcasa de la caja de engranajes. De hecho, el ruido que ésta irradia al entorno se debe a las vibraciones de su carcasa [48].

Otra de las principales fuentes de vibración inherentes al funcionamiento de una transmisión por engranajes es el *error de transmisión*. Este es un parámetro influenciado por la carga en los engranes, y se define por la diferencia entre la posición angular real del engrane de salida y su posición teórica (la posición que ocuparía si los dientes del engranaje fueran perfectos e infinitamente rígidos). Este error es una consecuencia de la flexión de los dientes que se deforman debida al par que se ejerce sobre ellos y al comportamiento dinámico de la caja de engranajes. Esta diferencia también puede ser el resultado de imprecisiones de fabricación y errores de ensamblaje, o incluso por un mal diseño [49]. El ruido y las vibraciones aumentan a altas velocidades. Por lo tanto, la caja de engranajes puede estar limitada para aplicaciones de grandes velocidades. Además, los problemas de ruido y vibración están directamente relacionados con todas las características del sistema de transmisión con engranajes y afectan su rendimiento. Debido a esto, la necesidad de reducir el ruido y la vibración en las cajas de engranajes se ha convertido en una preocupación importante para los fabricantes.

Dados los inconvenientes asociados a la naturaleza de los sistemas de transmisión convencionales basados en engranajes mecánicos, aún se proponen diseños de mejora para lograr su desempeño requerido en la Industria. Tuma [49] concluye que: “la caja de engranajes es una fuente de vibración y, en consecuencia, de ruido. Los engranajes mecánicos son las principales fuentes de vibración y ruido de alta frecuencia, incluso en unidades nuevas”.

2.2 Engranajes Magnéticos

2.2.1 Topología de los Engranajes Magnéticos

Los engranes mecánicos han alcanzado un desarrollo maduro y se utilizan en gran medida en aplicaciones industriales. Éstos son relativamente económicos y ofrecen una alta relación

par/peso. Es por ello que se ha adoptado su imagen como símbolo de la civilización industrial moderna. Los engranajes mecánicos funcionan bien en la mayoría de las aplicaciones, pero el mecanismo de contacto físico inevitablemente genera los inconvenientes de falla descritas anteriormente. Existen mecanismos con engranajes mecánicos que usualmente se emplean en un tren de potencia, y que por su naturaleza operativa ha sido posible convertirlos a diseños que reproducen su trabajo empleando medios magnéticos o electromagnéticos. Estos diseños se utilizan con fines diversos, con la misma aplicación en la que se les utiliza en su versión mecánica. Entre ellos se encuentran los *engranajes magnéticos*. Básicamente, éstos son acoplamientos basados en imanes permanentes, capaces de transmitir par variando la velocidad en una flecha de salida con relación a la velocidad en una flecha de entrada. Todo esto sin ningún contacto mecánico.

La mayoría de las topologías de engranajes mecánicos se pueden reproducir como engranajes magnéticos, simplemente reemplazando los dientes de metal con polos magnéticos alternos de imanes permanentes. El engranaje magnético más básico es un diseño equivalente al engranaje recto mecánico. Esta es una de las topologías más simples, donde las ranuras y los dientes son reemplazados por los polos norte (N) y sur (S) de los imanes permanentes, respectivamente. La Figura 2.9 muestra un esquema de este tipo de engranaje.

Los engranajes mecánicos utilizan tradicionalmente dientes con núcleo de acero para transmitir la potencia. En la Figura 2.9a, se puede observar cómo los engranes o ruedas dentadas móviles engranan entre sí a través de los dientes metálicos. Por lo que la potencia se transmite a través del contacto físico entre los dientes acoplados del engranaje. Cuando dos ruedas dentadas giran y entran en contacto debido a una fuente externa de energía mecánica, los dientes de una de ellas empujan contra los dientes de la otra. Esta dinámica de contacto da lugar a los problemas inherentes de los engranajes mecánicos, afectando así la transmisión de potencia y generando desgaste de dientes, ruido acústico, vibración mecánica, necesidad de lubricación, mantenimiento periódico y pérdidas de potencia por fricción.

En los engranajes magnéticos, la transferencia de potencia mecánica se basa en los polos de un conjunto de potentes imanes permanentes hechos de tierras raras. La fuerza magnética

entre los imanes transmitirá un par entre éstos de la misma forma que los dientes del engranaje mecánico transmiten potencia empujando o resistiendo a los dientes que se oponen.

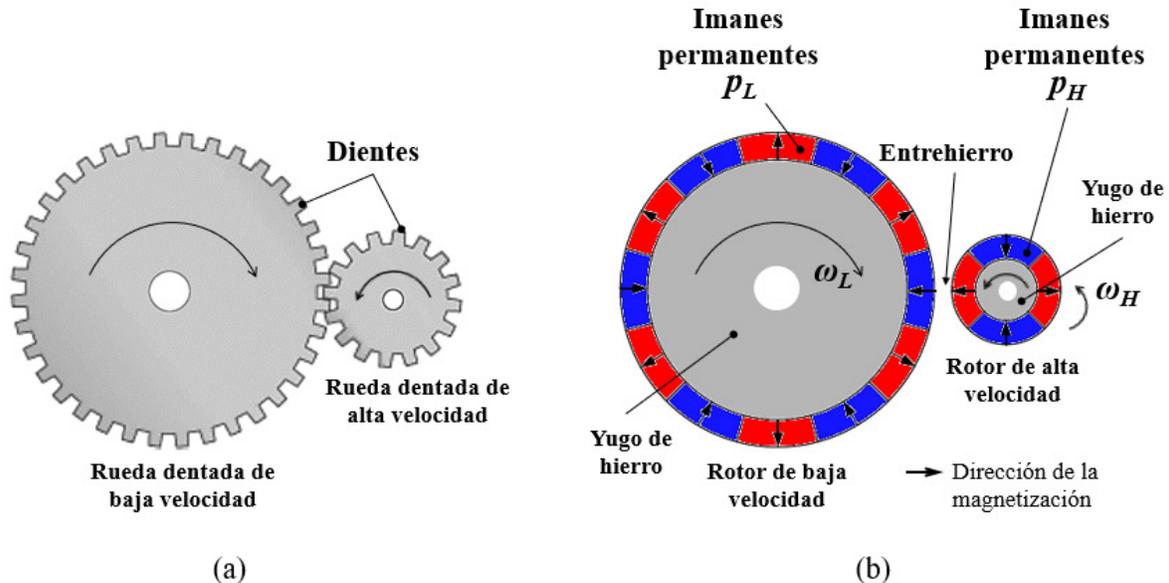


Figura 2.9. Engranajes equivalentes: (a) Engranaje recto mecánico. (b) Engranaje recto magnético.

Los polos N y S de los imanes permanentes, generalmente se representan en colores rojo y azul, respectivamente. En la Figura 2.9b se puede observar cómo éstos se montan alternativamente en el núcleo de hierro de los dos rotors. El espacio de aire entre los rotors es el entrehierro. Cuando esta distancia disminuye, la fuerza magnética entre los imanes se incrementa exponencialmente. Como ocurre con la tecnología de los engranajes, uno de estos rotors gira a una velocidad diferente a la del otro. Cuando un rotor gira, sus polos magnéticos ejercen una fuerza sobre los polos magnéticos en el otro rotor. De esta forma se transmite un par a través del entrehierro haciendo que ambos rotors giren simultáneamente. Por lo tanto, la potencia se transmite sin contacto físico a través de un flujo magnético en el entrehierro.

En un mecanismo multiplicador con engranajes mecánicos, el cambio de velocidad de una rueda motriz a una rueda de carga se define mediante la *relación de transmisión o de engranaje* (G_R) descrita por la ecuación 2.1. Esta relación representa las velocidades de rotación a las que se mueven dos engranes acoplados, cuando uno gira en relación con el otro.

De acuerdo con las Figuras 2.2 y 2.3, el engrane impulsor está conectado a través del eje de entrada a una fuente de energía mecánica (fuente motriz). El engranaje impulsado está conectado a través del eje de salida a una carga. La G_R resulta de la relación entre los diámetros de ambos engranes. Dado que el número de dientes es directamente proporcional al diámetro (cuanto más grande es el engrane, más dientes tiene), la G_R también se puede determinar por la relación del número de dientes en cada engrane. En la Figura 2.9, se puede observar que el engranaje recto representa un sistema con una G_R que conduce a un aumento de la velocidad. Para dos engranes mecánicos acoplados, como se muestra en la Figura 2.9a y como se definió en la ecuación 2.1, la G_R se determina por la relación entre el número de dientes en la rueda dentada de baja velocidad (el engrane de entrada o motriz) y el número de dientes en la rueda dentada de alta velocidad (el engrane de salida o de carga). Con base en tal definición, para el engranaje magnético que se muestra en la Figura 2.9b, con las ranuras y los dientes reemplazados por los polos de imanes permanentes, el G_R se calcula de la misma manera, es decir, como la relación entre el número de pares de polos magnéticos en cada uno de los dos rotores. Si se considera asimismo la relación de velocidades, la relación de transmisión para un engranaje magnético se determina con la siguiente ecuación:

$$G_R = -\frac{\omega_H}{\omega_L} = -\frac{p_L}{p_H} \quad (2.3)$$

donde p_L y p_H son el número de pares de polos de los imanes permanentes montados en el rotor de baja velocidad (ω_L) y en el rotor de alta velocidad (ω_H), respectivamente. El signo menos indica que los dos rotores giran en direcciones opuestas.

2.2.2 Conversión Tradicional de Engranajes Magnéticos

El uso de medios magnéticos con fines de transmisión de potencia no es una idea reciente. Los primeros esfuerzos para aplicar esta tecnología en sistemas de transmisión de potencia mecánica se remontan a los primeros años del siglo XX. En sus primeras etapas de desarrollo, los engranajes magnéticos fueron simples analogías de los engranajes mecánicos. Empleaban configuraciones de engranaje recto, como el mostrado en la Figura 2.9. La idea básica era considerar que los engranajes rectos constituían el principio fundamental de funcionamiento

de los engranajes mecánicos: dos ruedas con un número diferente de dientes montadas en dos flechas separadas con ejes paralelos. Estos dientes estaban en contacto directo conforme las ruedas giraban. Sin embargo, el desarrollo de engranajes análogos que no tengan contacto directo entre dientes implica medios magnéticos. En un principio la magnetización era electromagnética, en la cual se utilizaban bobinas alimentadas por corriente directa. Tales fueron los diseños de Armstrong (1901) y Neuland (1916).

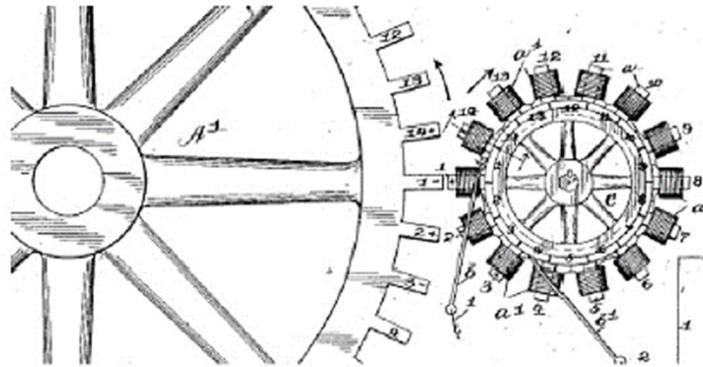


Figura 2.10. El primer engranaje magnético (Armstrong 1901) [50].

Armstrong [50] patentó un dispositivo de transmisión de potencia por medio de una fuerza electromagnética, que quizá es la *primera evidencia documentada sobre engranajes no mecánicos*. Su dispositivo era un engranaje electromagnético de diseño biaxial con ejes paralelos. Una ilustración de este diseño puede observarse en la Figura 2.10. El engrane mayor consistía en una rueda con dientes de acero, mientras que los dientes de la rueda pequeña (piñón) eran bobinas magnetizadas (electroimanes). No utilizaba imanes permanentes. Este engranaje tenía la ventaja de ofrecer una transmisión de potencia sin contacto y una operación silenciosa. Pero se quedaba corto en la cantidad de par que podría ser transferido para el volumen ocupado. La fuerza transmitida de la rueda pequeña a la rueda grande era muy pequeña debido a que por la naturaleza del diseño biaxial solo unos cuantos dientes (de uno a tres dientes) estaban acoplados (haciendo el efecto de engranaje) durante esta transferencia de potencia. Al estar los electroimanes conectados eléctricamente con anillos colectores, éstos conectaban y desconectaban a los electroimanes de acuerdo a su posición relativa con el engrane mayor. La presencia de estos anillos causaba pérdidas innecesarias y por lo tanto se requería de un alto mantenimiento.

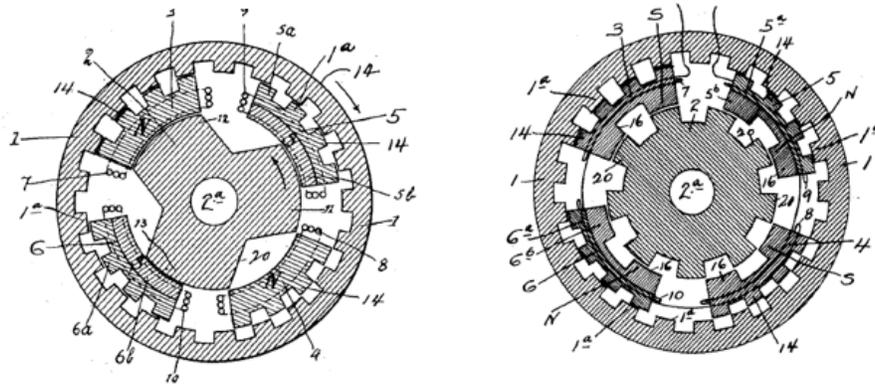


Figura 2.11. Dos diseños del primer engranaje magnético coaxial (Neuland, 1916) [51].

Neuland inventó un engranaje magnético utilizando bobinas e imanes [51]. De acuerdo a los registros, podría tratarse del *primer diseño concéntrico*. También se le identifica como un *engranaje planetario electromagnético tipo coaxial*. El sistema constaba de tres partes (véase la Figura 2.11): rotor externo y rotor interno de acero laminado con dientes ferromagnéticos (dos ejes rotacionales con polos de acero salientes), además de un conjunto de piezas polares para la *modulación magnética* entre ambos rotores. Estas piezas se magnetizaban por imanes permanentes o con un devanado (formando polos electromagnéticos estacionarios). El sistema podía funcionar como un engranaje mecánico, es decir, transmitiendo pares y modificando velocidades. La densidad de par mejoró con respecto a la de los diseños anteriores, ya que la mayor parte de los dientes del engranaje transferían par. Asimismo, las relaciones de transmisión podían ser variables. Pero en el diseño solo había imanes en uno de los ejes, lo que condujo a tamaños imprácticos de entrehierro. Debido a su pobre densidad de par y relativa alta complejidad no se utilizó comercialmente. Sin embargo, marcó un hito hacia el diseño de un engranaje magnético utilizable en la práctica.

Posteriormente se observó que el uso de imanes permanentes llevaría a diseños más eficientes. En 1941 Faus patentó una topología bastante similar al tradicional engranaje recto mecánico [52]. Fue el *primer engranaje magnético que usó imanes permanentes*. Este operaba igual que el engranaje electromagnético de Armstrong (Figura 2.10), pero empleaba imanes permanentes de ferrita en lugar de dientes magnetizados. La Figura 2.12a ilustra el diseño original de la patente de Faus.

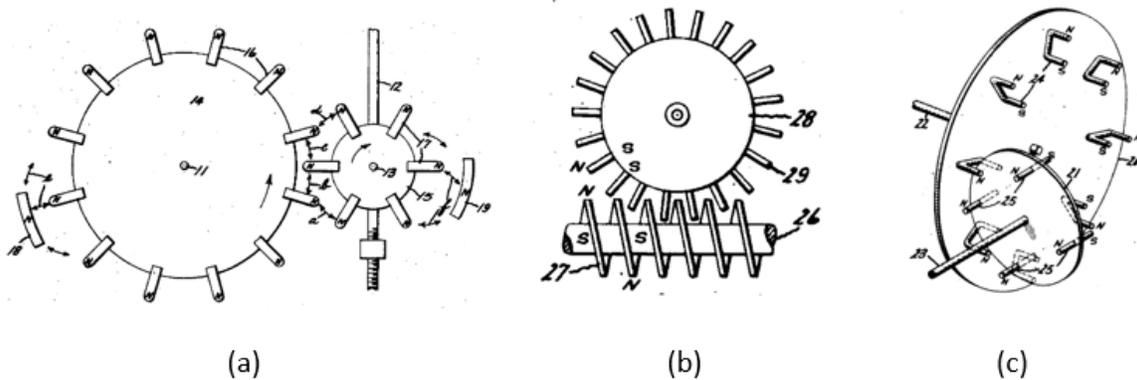


Figura 2.12. Primer engranaje magnético con imanes permanentes de ferrita: (a) Diseño recto. (b) Diseño de gusano. (c) Diseño con ejes perpendiculares. (Faus, 1941) [52].

Todos los polos norte de los imanes apuntaban radialmente hacia afuera, de tal modo que el par se transfería entre los ejes por la repulsión de los polos idénticos de los imanes. Este engranaje mejoró la eficiencia de la potencia transmitida. Sin embargo, el número de imanes interactuando en el engranaje estaba limitado, y por lo tanto su utilización práctica fue baja. Aunque esta topología superó a los diseños previos de tipo recto al eliminar los electroimanes, lo cual disminuyó el peso y el tamaño del engranaje, la idea de Faus era impráctica debido al bajo rendimiento del engranaje y a la baja energía de los imanes de ferrita utilizados, condición que se traducía en una pobre densidad de par en comparación con sus contrapartes mecánicas. Esto también hizo imposible su uso generalizado en la industria. La patente de 1941 de Faus también describe un engranaje de tipo gusano como el mostrado en la Figura 2.12b para aplicaciones de medición, así como un diseño con ejes perpendiculares como el que se observa en la 2.12c. En las siguientes décadas, inventores y desarrolladores mantuvieron la atención en la técnica de transmisión de potencia mecánica por medio de engranajes magnéticos de tipo recto, produciéndose una serie de patentes con interesantes variaciones en sus diseños, [53] – [56].

A partir de ese momento, el uso de imanes permanentes se extendió dando lugar a otras patentes que intentaban mejorar los diseños anteriores. Tal es el caso de Reese (1967) [57], quien presentó un engranaje magnético con arreglo coaxial similar al diseño de Neuland [51], pero con un rotor interno conteniendo imanes permanentes montados. La Figura 2.13 muestra el diseño original de Reese y una ilustración con sus partes principales. El rotor interno era

el rotor de entrada o de alta velocidad. El rotor intermedio con eje de salida estaba compuesto de material de hierro o acero. El rotor externo, estacionario, era de material de hierro. Con este diseño se logró una relación de transmisión de 50:1.

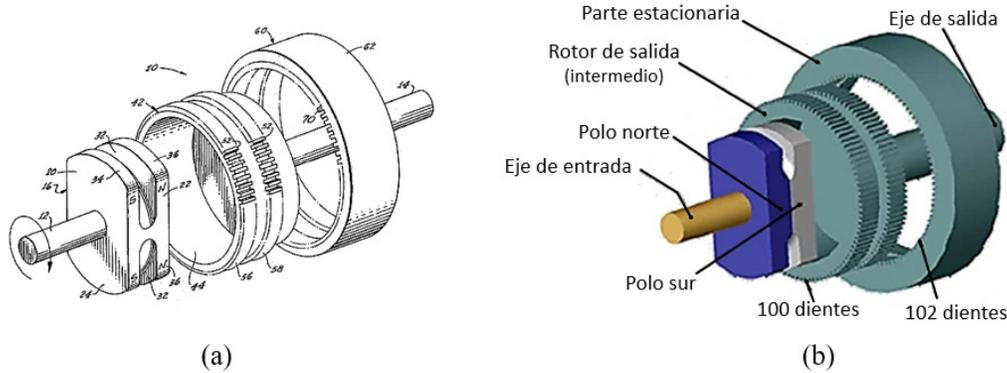


Figura 2.13. Engranaje magnético con arreglo concéntrico y coaxial utilizando imanes permanentes: (a) Diseño original de la patente. (b) Ilustración artística. (Reese, 1967) [57].

En 1968 Martin Jr. presentó la patente de una transmisión magnética compuesta por un engranaje magnético tipo planetario con tres ensambles concéntricos: un rotor interno de alta velocidad y un rotor externo de baja velocidad, ambos con imanes permanentes para producir polos magnéticos alternantes, además de un ensamble de piezas polares de hierro espaciadas para variar el flujo. En la Figura 2.14 se muestra el diseño presentado en esta patente. Este diseño era también similar al concepto de Neuland [51], pero mejorándolo al separar los imanes permanentes y las piezas polares.

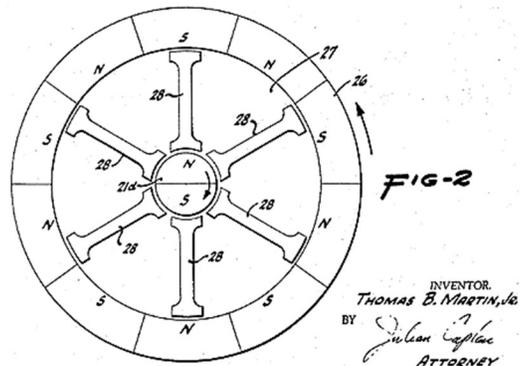


Figura 2.14. Diseño de una transmisión magnética con engranes concéntricos (Martin, 1968) [58].

El diseño de Martin parecería el mejor, pero no fue utilizado industrialmente debido a que los pares transmitidos fueron bajos debido al uso de imanes cerámicos, los cuales tienen una baja remanencia. Una característica especial es que por su construcción llega a tener una alta

relación de transmisión, 1:16. En su patente, Martin describe su diseño como un accionamiento magnético similar a un accionamiento mecánico de engranajes planetarios, considerando al rotor interno como un engrane Sol, al conjunto de piezas polares como los engranes planeta y su soporte, y al rotor externo como un engrane anular o corona dentada. Esta topología se considera como el *primer engranaje magnético de naturaleza planetaria concéntrica con flujo radial*.

En 1991, Ikuta propuso un engranaje magnético sin contacto utilizando imanes de ferrita [59]. Este es un *engranaje magnético recto* de ejes paralelos que incluye dos tipos básicos de acoplamiento magnético. En primer lugar, un *acoplamiento radial* con las dos diferentes topologías que se muestran en las Figuras 2.15a y 2.15b. Estas topologías pueden compararse con sus equivalentes mecánicas de la Figura 2.4, indicadas como engranaje externo y engranaje interno, respectivamente.

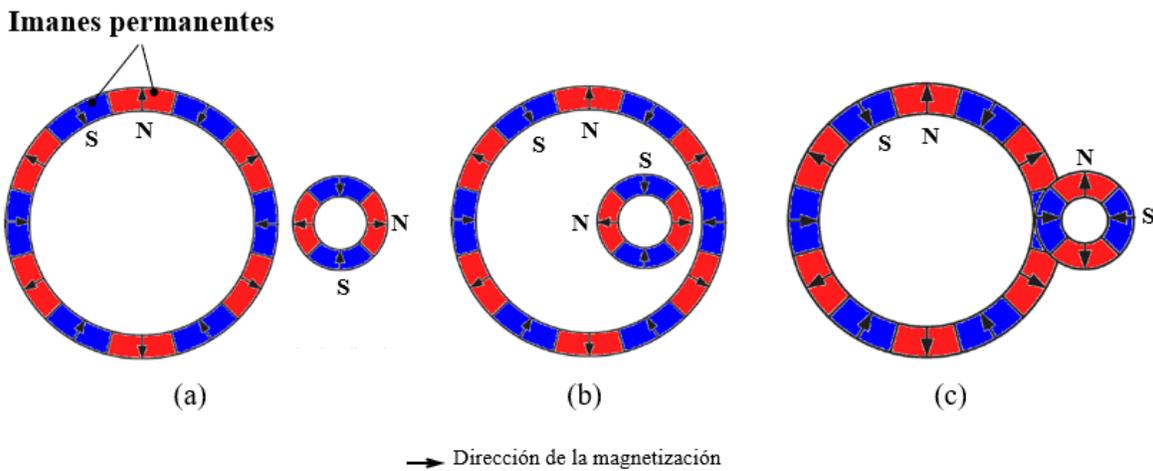


Figura 2.15. Engranaje magnético recto de ejes paralelos: (a) Acoplamiento radial externo. (b) Acoplamiento radial interno. (c) Acoplamiento axial. [59].

Posterior a este diseño radial se desarrolló una configuración con *acoplamiento axial*, cuya topología se ilustra en la Figura 2.15c, [60]. Esta topología axial consta de dos discos metálicos con imanes permanentes montados para formar pares de polos magnéticos en cada uno de ellos. El rendimiento de este tipo de acoplamiento magnético, el par de estado estable y su capacidad de transmisión de par han sido ampliamente estudiados utilizando diferentes enfoques, e investigando con varios materiales ferromagnéticos, así como imanes

permanentes más fuertes [61] – [74]. Sin embargo, como se ha mencionado, aunque la topología de los engranajes magnéticos tipo recto y de eje paralelo es muy simple, no se han utilizado ampliamente para aplicaciones industriales debido a su muy baja densidad de par.

Otras topologías de engranaje magnético han sido reportadas, las cuales conservan la misma forma y los principios de operación similares que sus contrapartes mecánicas. En estas topologías se han empleado imanes permanentes con mejores propiedades magnéticas, siendo la fuerza de repulsión la parte medular del diseño. Algunas de estas topologías son los engranajes magnéticos de gusano, los engranajes magnéticos cónicos y los engranajes magnéticos de piñón y cremallera. La Figura 2.16 ilustra la forma mecánica y su correspondiente equivalencia magnética para cada uno de ellos.

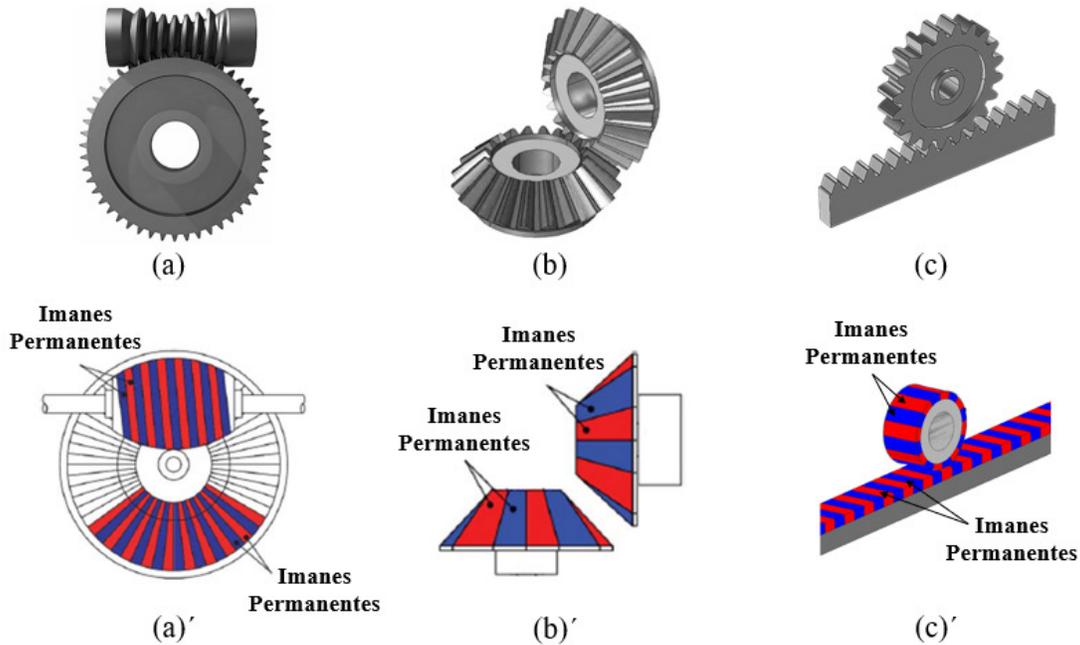


Figura 2.16. Engranajes mecánicos y sus equivalentes engranajes magnéticos: (a)-(a') Engranaje gusano [75]. (b)-(b') Engranaje cónico [79]. (c)-(c') Engranaje piñón-cremallera. [82].

En 1974, Baermann describió en una patente estadounidense un engranaje magnético similar al engranaje mecánico de gusano, pero utilizando imanes de ferrita de bario [75]. Este diseño consiste en un engrane de gusano con dientes helicoidales y una rueda dentada helicoidal. Los dientes están magnetizados con los polos N y S de los imanes permanentes, los cuales están colocados de frente unos contra otros. De esta forma, el giro del engrane de gusano

hace que la rueda de gusano gire debido a la repulsión magnética entre ellos. En 1993, Tsurumoto y Kikuchi publicaron en un artículo académico el diseño básico, el principio de funcionamiento y las características de rendimiento de un nuevo prototipo de *engranaje magnético de gusano* que utiliza imanes permanentes de samario-cobalto (SmCo_5) [76]. Este engranaje magnético de prueba logró una relación de engranaje de 1:33, y un par máximo transmitido de 11.5 Nm. Utilizando la suma del volumen del engrane de gusano y de la de rueda gusano, este engranaje tendría una densidad de par de aproximadamente 0.1 kNm/m^3 . Estos mismos autores también desarrollaron análogos magnéticos para engranajes cónicos [77], [78]. Otros investigadores han continuado trabajando en esta topología de ejes perpendiculares [79] – [81].

Un *engranaje magnético de tipo cónico* funciona de la misma manera que un engranaje recto al intercambiar el ángulo de intersección. Por lo tanto, esta topología también se ha estudiado como un engranaje magnético recto de eje perpendicular. Aunque la topología de los engranajes magnéticos de eje paralelo o de eje perpendicular es muy simple, los resultados de los trabajos de investigación muestran que su densidad de par es todavía muy baja, típicamente menor de 12 kNm/m^3 , de ahí que su uso en aplicaciones industriales es limitado. No obstante, el estudio de este tipo de engranaje magnético ha contribuido con importantes avances científicos. En 1996, Yao determinó experimentalmente que, para un engranaje magnético perpendicular, el par de acoplamiento magnético depende del número de polos magnéticos, del área de los polos cubierta por los imanes y de la fuerza del campo magnético de éstos, así como de la separación entre ellos [80]. Además, demostró que el par se incrementa conforme el número de polos magnéticos aumenta, y también crece conforme la distancia disminuye por debajo de una separación crítica establecida, pero disminuye si el número de los polos disminuye conforme la separación se vuelve más grande que dicha distancia crítica. En este diseño esa distancia de separación crítica para los imanes de neodimio sinterizados con núcleo de hierro de 2 mm de espesor estuvo entre 9 mm y 11 mm. Posteriormente, Muruganandam presentó el diseño de un prototipo de engranaje magnético cónico con una relación de engranaje de 1:4 y un par de 27 Nm [81]. En su trabajo demostró que el engranaje magnético cónico tiene un volumen, un peso y un par a plena carga

significativamente mejores en comparación con los del engranaje cónico mecánico comercial.

El *engranaje magnético de piñón-cremallera* se utiliza para convertir un movimiento de rotación en movimiento lineal. Este tipo de engranaje es capaz de realizar esencialmente todas las operaciones de su equivalente mecánico, siendo muy similar a él tanto en construcción como en aplicaciones, pero sin los inconvenientes de su operación por contacto. Sin embargo, solo se han publicado unos pocos estudios relacionados con esta topología [82].

Otra topología que es de importante relevancia en aplicaciones industriales, incluyendo la industria eólica, es el engranaje planetario. Similar a su contraparte mecánica, el engranaje magnético planetario tiene densidad de par alta y una capacidad de transmisión de potencia mayor que las topologías anteriores.

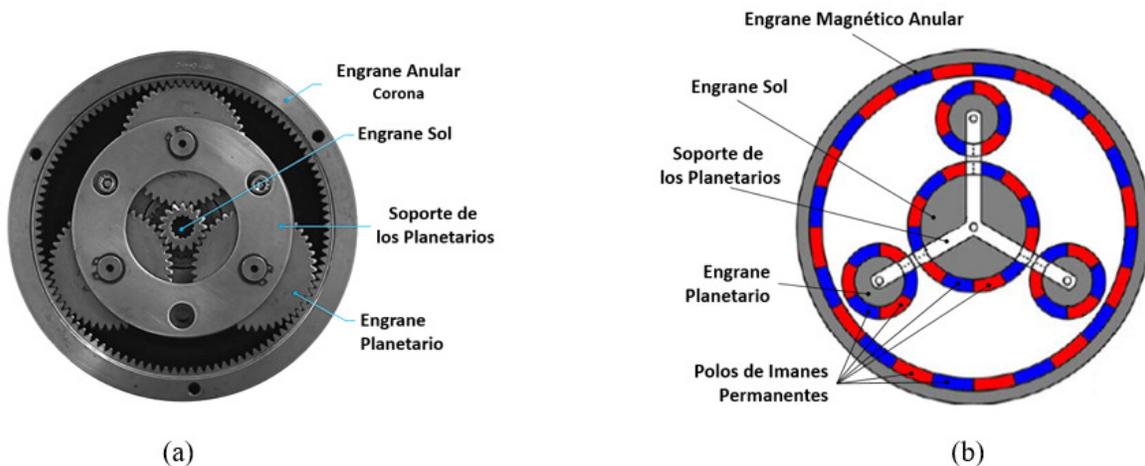


Figura 2.17. Engranaje planetario: (a) Versión mecánica. (b) Versión magnética. [88].

Inicialmente, el *engranaje magnético planetario* se diseñó con una geometría tal y como se obtendría directamente de la topología de su análogo mecánico, como se muestra en la Figura 2.17. Para esta topología destacan los diseños de Tsurumoto, [83] – [87]. Pero quizá el trabajo más sobresaliente fue el publicado por Huang, en 2008 [88]. A pesar de que es otra adaptación del engranaje mecánico planetario tradicional y de que opera bajo sus mismos principios, la propuesta de Huang expone notables avances en el desarrollo de los engranajes magnéticos. En su trabajo presenta el diseño, la simulación y la construcción del prototipo

de una caja de engranajes magnéticos planetaria para aplicaciones en sistemas de transmisión de par. En este prototipo se utilizaron potentes imanes permanentes de tierras raras (neodimio-hierro-boro). El arreglo de engranes combina la estructura de un engranaje mecánico planetario (Figura 2.7) con el principio de transmisión del engranaje magnético recto (Figura 2.9). La clave para el mejoramiento de la transmisión de par fue el número de engranes magnéticos planetarios. En la Figura 2.17 se muestra la configuración de este engranaje con tres engranes planetas. Para su versión magnética, Huang propone incrementar este número a seis a fin de elevar el par de transmisión casi al doble. La simulación del prototipo demostró que la topología con tres engranes planetarios puede alcanzar una densidad de par de 48.3 kNm/m^3 , mientras que con seis engranes planetarios la densidad de par es casi 100 kNm/m^3 . Esta densidad de par es comparable a la de un engranaje mecánico recto ($100 - 200 \text{ kNm/m}^3$). Sin embargo, en las pruebas experimentales resultaron valores considerablemente más bajos (alrededor de 16 kNm/m^3). No se explicó la razón de esta sustancial disminución en la densidad de par que se esperaba. Aun así, el trabajo de Huang marcó un antecedente para otros trabajos de investigación, con un interés creciente en utilizar el engranaje magnético planetario para diversas aplicaciones, como son generación de energía eólica y la propulsión eléctrica.

En general, todas estas topologías de engranaje magnético presentan características mecánicas y de rendimiento dinámico bastante aceptables, y queda demostrado que es posible construir mecanismos de transmisión de potencia sin que exista contacto entre sus partes móviles, evitando así los inconvenientes que presentan los engranajes mecánicos. Al reemplazar los dientes mecánicos por pares de polos de imanes permanentes alternos, se logra un engranaje magnético que es copia funcional de su contraparte mecánica. De ahí que puedan considerarse como engranajes de conversión tradicional. Sin embargo, en estas topologías, pocos son los imanes permanentes que participan simultáneamente en la transmisión de potencia, lo que resulta en una baja densidad de par si se les compara con la de los engranajes mecánicos, lo que hace que sean poco atractivos para aplicaciones industriales de gran escala. La excepción puede estar en el engranaje magnético planetario, que exhibe densidades de par altas. En esta topología, cuanto mayor sea el número de engranes planetarios, mayor será la densidad de par, ya que hay más imanes permanentes

involucrados en el acoplamiento del campo magnético en comparación con las topologías anteriores. Sin embargo, la inclusión de más planetas, requiere una configuración mecánica más compleja. Aun así, el interés por el engranaje magnético planetario ha prevalecido entre los investigadores y académicos.

2.2.3 Fuentes de Energía de los Engranajes Magnéticos

Los materiales de los imanes permanentes resultan ser la clave para que se lleve a cabo, de una manera eficiente, la transmisión de par en los engranajes magnéticos. El desarrollo de estos materiales se remonta a muchos siglos atrás, pero no fue sino hasta el siglo pasado cuando se les dió un uso más específico para proporcionar la excitación en las máquinas eléctricas, y en consecuencia, en la tecnología emergente de los engranajes magnéticos.

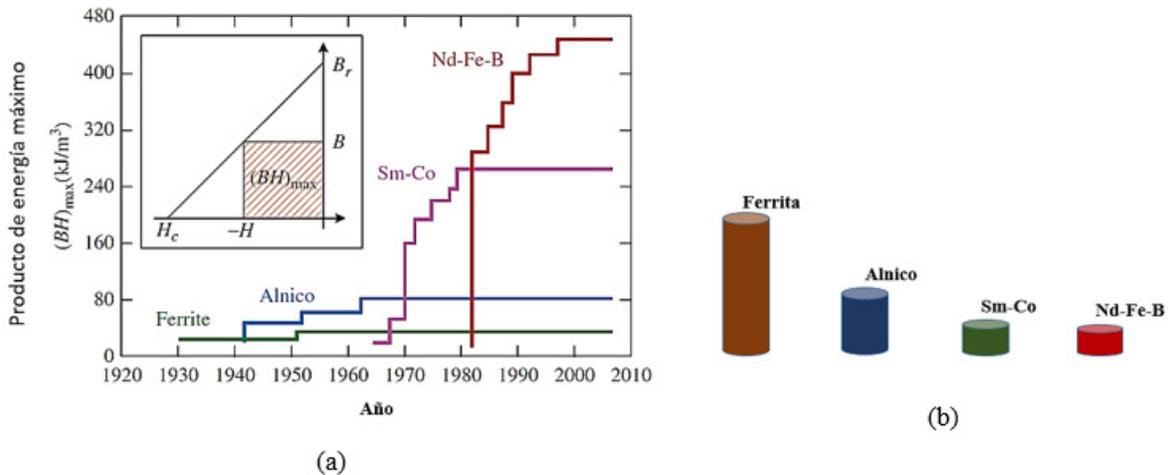


Figura 2.18. Desarrollo de los materiales para imanes permanentes: (a) Evolución de la densidad de energía (BH) en el siglo XX. (b) Comparación de las densidades de energía. [89].

Como se muestra en la Figura 2.18, el progreso de los materiales para imanes permanentes siguió un comportamiento escalonado, y cada material se desarrolló y mejoró antes de ser reemplazado por uno nuevo [89]. En particular, la densidad de energía o el producto de máxima densidad de energía $(BH)_{max}$ correspondiente, ha tenido una mejora drástica a partir de 1980.

Las primeras topologías de engranajes magnéticos, como las ilustradas en la Figuras 2.9, 2.15 y 2.16, se desarrollaron inicialmente utilizando imanes de *ferrita*, la cual es un material cerámico ferromagnético cuyo principal componente es óxido de hierro, y se combina químicamente con estroncio y bario. El imán de ferrita fue inventado en la década de 1930. Su uso se ha favorecido por ser un imán comercialmente barato debido a la abundancia de sus materias primas y al bajo costo de producción. Este tipo de imán tiene la ventaja de una alta permeabilidad magnética y una alta coercitividad, pero también un elevado coeficiente de temperatura y una baja densidad de energía, lo que hace que sea sensible a las variaciones de temperatura, así como voluminoso en tamaño para aplicarlo en engranajes magnéticos.

Posteriormente se utilizaron imanes permanentes con una aleación principal de aluminio-níquel-cobalto (AlNiCo) para desarrollar engranajes magnéticos. De este material fueron los primeros imanes permanentes comerciales ampliamente utilizados, cuyo desarrollo comenzó en 1931 cuando fue desarrollado en Japón, con mejoras sustanciales en la década de 1960. El imán de AlNiCo ofrece una alta densidad de flujo remanente y un costo bajo. Debido a su alta temperatura de Curie, se puede utilizar en aplicaciones en las que la fuerza de campo magnético es necesaria a altas temperaturas de operación. Pero desafortunadamente presenta una baja coercitividad, por lo que es muy fácil su desmagnetización. El producto de máxima densidad de energía, la cual es proporcional a la energía almacenada en el imán, no es alto en estos materiales. Por lo tanto, los primeros engranajes magnéticos produjeron densidades de par muy bajas, y en consecuencia no recibieron mucha atención en ese momento ni por parte de las instituciones de investigación ni de la industria.

El descubrimiento de materiales magnéticos de alta densidad energética estimuló un aumento significativo en la investigación para lograr imanes con valores más altos, tanto del producto de máxima densidad de energía (el factor de mérito más común para un imán permanente) como de la coercitividad (resistencia a la desmagnetización). Esto condujo al desarrollo de potentes imanes permanentes de tierras raras. Aquí, el término de “tierras raras” puede ser engañoso, pues estos materiales no son particularmente raros ni preciosos, sino que pertenecen a un grupo de 17 elementos químicos que abundan en la naturaleza, cuyas propiedades únicas permiten formar aleaciones en las cuales los campos producidos por ellas

poseen una gran fuerza magnética. Tal es el caso del samario-cobalto (Sm-Co) y del neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B).

Los imanes permanentes de Sm-Co fueron la primera familia de imanes de tierras raras. Estos se desarrollaron y comercializaron en los Estados Unidos durante la década de 1960, lográndose otras composiciones a partir de 1970. Los imanes de Nd-Fe-B desarrollados en Japón y Estados Unidos aparecieron por primera vez en el mercado en 1984 [88]. Debido a sus propiedades magnéticas que incluyen una alta remanencia, una alta coercitividad y una alta densidad de energía, estos imanes permanentes de tierras raras fueron ampliamente adoptados para la fabricación de engranajes magnéticos. Una diferencia básica entre ambos tipos de imanes es que los imanes de Sm-Co presentan una alta temperatura de Curie (temperatura por encima de la cual el elemento ferromagnético pierde su capacidad para ser magnetizado) y un bajo coeficiente de temperatura, mientras que en los de Nd-Fe-B la temperatura de Curie es relativamente baja. Ésta es quizá su principal desventaja, lo que limita su uso para aplicaciones de alta temperatura. Aun así, el material de Nd-Fe-B se considera con mejores propiedades magnéticas que el de Sm-Co. De ambos, los imanes permanentes de Nd-Fe-B se usan más que los de Sm-Co para accionamientos motrices, debido principalmente a sus ventajas relativamente económicas, a una mayor asequibilidad y a una mayor fuerza de campo magnético. Es importante mencionar el Nd-Fe-B tiene el más alto producto de energía máxima $(BH)_{\max}$ de entre todos los imanes permanentes disponibles en la actualidad [90] – [92]. Sin embargo, debido a un crecimiento exponencial en la demanda de este material en las dos últimas décadas, su precio ha llegado a ser volátil, y en ocasiones se comercializa excesivamente caro.

Con los avances en la tecnología de imanes, el uso de potentes imanes permanentes de tierras raras para aplicaciones de engranajes magnéticos, se convirtió en una actividad de rutina y el concepto de transmisión de par sin contacto a través de la interacción de campos magnéticos aumentó la atención tanto de ingenieros como de instituciones de investigación y de la industria. Hoy en día, los imanes permanentes de tierras raras son esenciales para una amplia gama de aplicaciones en la tecnología moderna que requieren de imanes potentes. Actualmente, los materiales de tierras raras, principalmente de Nd-Fe-B, ya se han integrado

en la industria de vehículos eléctricos y en los sistemas de generación de energía eólica, pero su uso comercial para la transmisión de potencia mecánica aún está en desarrollo.

2.2.4 Engranajes Magnéticos con Modulación de Campo

Los principales criterios que evalúan el rendimiento de un engranaje mecánico durante la transmisión de potencia, se basan en la *densidad de par* o relación par/volumen: referente a la capacidad para transmitir par dentro de la unidad de volumen, y la *eficiencia*: considerada como la relación potencia de salida/potencia de entrada, la cual se expresa ya sea como un porcentaje o bien como una fracción decimal. Así queda claro que estos dos criterios son un factor importante que deben considerarse en el diseño de los engranajes magnéticos.

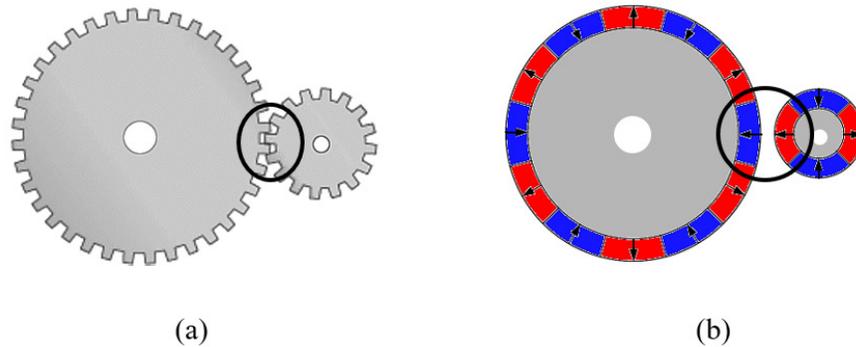


Figura 2.19. Engranajes análogos: (a) Engranaje recto mecánico. (b) Engranaje recto magnético. [60].

Los primeros diseños de engranajes magnéticos propuestos como una conversión tradicional de su equivalente mecánico exhibían una doble desventaja en común: su densidad de par y su relación de transmisión eran muy bajas, esto era debido principalmente a que solo una fracción de los imanes permanentes participaba activamente en la transmisión de par en un momento específico. Con base en la ilustración de la Figura 2.19, se observa como los engranajes mecánicos acoplan o engranan de uno a tres dientes a la vez, por lo que al diseñar de forma análoga los engranajes magnéticos, éstos tenían una pobre utilización de los imanes, y en consecuencia una baja capacidad para la transmisión de potencia mecánica, con densidades de par de menos de 12 kNm/m^3 [60]. Para un caso particular como la topología de engranaje tipo recto, el área de contacto entre los engranes es muy pequeña. Los estudios sobre el acoplamiento magnético [88] confirmaron que solo se puede lograr una transmisión

de par mayor cuando se acopla simultáneamente una gran cantidad de imanes. El secreto es pues, abarcar con ellos la mayor parte del perímetro del engranaje.

Teniendo la disponibilidad de los materiales para obtener potentes imanes permanentes de tierras raras con alta densidad de energía, se intensificaron los trabajos en las topologías magnéticas basadas directamente en las estructuras mecánicas. Entre todas estas topologías, el engranaje de tipo planetario recibió un considerable impulso, ya que se observó en su configuración que una cantidad mayor de imanes permanentes se involucraban en el acoplamiento de campo magnético en comparación con las otras topologías de engranajes magnéticos derivados de sus análogos mecánicos convencionales. A raíz de esta observación, se presentaron diseños de engranaje magnético planetario de 3, 4, 5, 6 y 9 planetas [93] – [98] con resultados analíticos y experimentales sobresalientes, convirtiéndola así en una de las topologías mejor estudiadas para lograr un engranaje magnético que reemplazaría a su análogo mecánico. Simulaciones con 6 engranes planetas alcanzaron densidades de par de 97.3 kNm/m^3 [97]. Sin embargo, a pesar de mostrar ventajas superiores para la transmisión de par, se considera que sus diseños tienen aún muchas piezas móviles, el cual es un inconveniente que les resta preferencias para aplicaciones que requieren su integración en máquinas eléctricas con imanes permanentes [99].

Mientras que los trabajos sobre el engranaje magnético planetario basado en la conversión de su contraparte mecánica seguían proyectándose, incluso más allá de la primera década de este siglo, una nueva topología se consolidaba como un innovador engranaje magnético que podía acoplar simultáneamente todos los imanes permanentes para la transmisión de par. Esta topología disruptiva, presentada por Atallah y Howe en 2001 [100] consiste en una configuración completamente diferente a lo que podría ser una conversión directa de un engranaje mecánico. Destaca en esta topología la aplicación del principio de *modulación de flujo magnético*, una idea propuesta por Neuland en 1916 [51]. Su configuración adopta el concepto de las patentes de Reese (1967) [57] y de Martin (1967) [58], que de hecho fueron aportaciones de mejora al planteamiento de Neuland. El diseño de Atallah básicamente utiliza tres estructuras: 1) un rotor interno de alta velocidad concéntrico y 2) un rotor externo de baja velocidad. Cada rotor tiene un núcleo de hierro e imanes permanentes con *magnetización*

radial montados en su superficie. Entre los dos rotores se encuentra 3) un anillo estacionario de piezas polares ferromagnéticas separadas entre sí. La función de este modulador consiste en reorganizar y *modular* la distribución del campo magnético producido por los imanes permanentes, de manera que entre los dos rotores se pueda establecer un acoplamiento magnético para transmitir par. Dado que la acción de engranaje está condicionada por el principio de la modulación de campo magnético para que se lleve a cabo la transmisión de potencia mecánica, a esta nueva topología se le conoce como *engranaje magnético de flujo modulado*, o también, *engranaje magnético con modulación de campo* [101]. Su configuración básica se ilustra en la Figura 2.20.

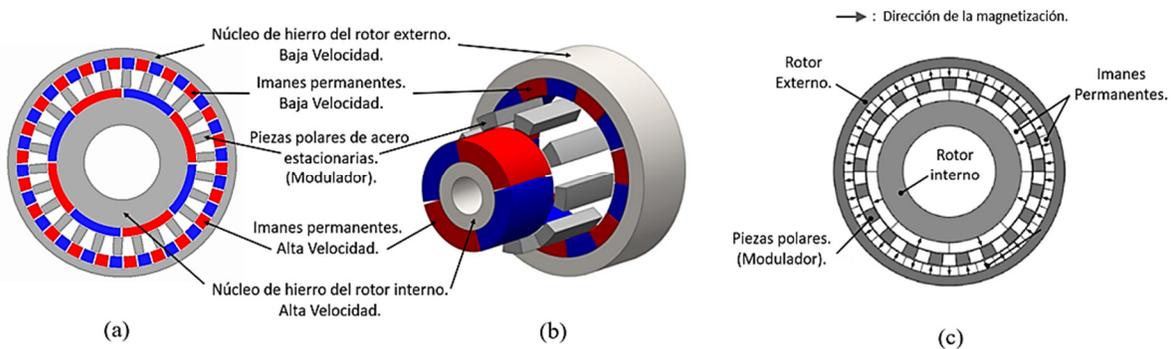


Figura 2.20. Engranaje magnético con modulación de campo: Elementos principales de sus componentes activas: (a) Vista frontal. (b) Vista isométrica. (c) Magnetización radial. [60], [101].

El engranaje magnético con modulación de campo conserva una estrecha relación con el engranaje magnético planetario convertido análogamente de su equivalente mecánico. En la Figura 2.21 se muestra la operación análoga entre ambos, con el rotor externo actuando como el engrane anular, el rotor interno como el engrane Sol y las piezas polares de acero estacionarias (modulador) como engranes planetarios (por su campo magnético que gira y no por las piezas polares mismas). Nótese que en contraste con la versión del engranaje magnético planetario convertido directamente de su análogo mecánico, la topología del engranaje magnético con modulación de campo presenta menos partes móviles [99].

Por sus características operativas, es común identificar al diseño de Atallah como un *engranaje magnético planetario concéntrico* [102], o bien, como un *engranaje magnético planetario coaxial* [103]. Aunque resulta claro que tal diseño corresponde a un *engranaje magnético coaxial radialmente magnetizado*. Esta terminología puede resultar no adecuada

ya que otros diseños siguieron evolucionando conservando el concepto del engranaje con modulación de campo, pero con cambios en la topología y disposición de sus componentes.

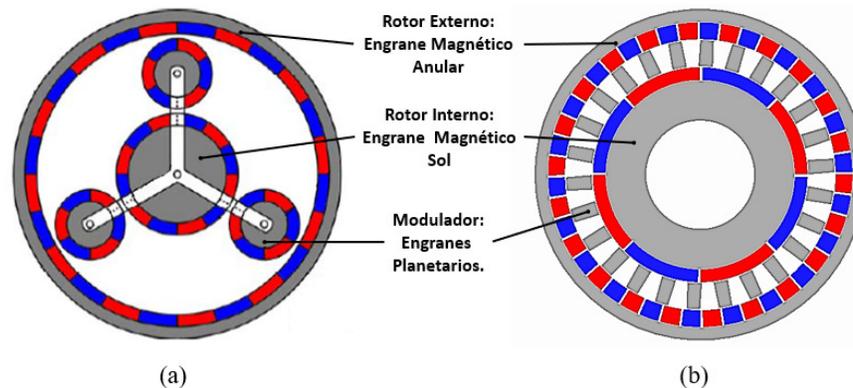


Figura 2.21. Engranaje magnético: (a) Tipo planetario. (b) Con modulación de campo. [99].

Desde un punto de vista diseño, los engranajes magnéticos pueden organizarse en dos tipos principales: por un lado, están los engranajes magnéticos de conversión tradicional, que se derivan al reemplazar los dientes de acero por pares de polos magnéticos de imanes permanentes; en éstos, el engranaje entre dientes mecánicos es sustituido por un acoplamiento de campos magnéticos: si bien, este tipo de engranaje magnético de conversión directa puede evitar los inconvenientes causados por una transmisión con contacto físico, su desempeño no tiene ventajas comparativas frente a sus equivalentes mecánicos. Por otro lado, se tienen los engranajes magnéticos con modulación de campo, que no se derivan de un engranaje mecánico análogo. En este tipo de engranaje magnético, el efecto de engranaje se efectúa por la modulación de los campos magnéticos de los imanes permanentes realizada por los segmentos ferromagnéticos entre los dos rotores. Estos engranajes, además de tener una operación sin contacto físico, proveen una alta densidad de par que es comparable con la de los engranajes mecánicos.

La topología del engranaje magnético con modulación de campo se presentó en 2001, [100]. Con estudios de simulación se investigó la densidad de par exhibiendo resultados mayores a los 100 kNm/m^3 . Los detalles de su diseño, principio de operación y análisis de su rendimiento fueron explicados en 2004 por el mismo equipo de Atallah, [104], utilizando un prototipo experimental con relación de transmisión de 5.75:1, que alcanzó una densidad de par de 72 kNm/m^3 y una eficiencia superior a 97%. Tal vez, su mérito principal es el arreglo

concéntrico de sus tres estructuras, lo que permite que todos los imanes permanentes contribuyan simultáneamente a la transmisión de par. Dieciocho años después de su presentación, nuevos estudios con un diseño optimizado del engranaje magnético concéntrico coaxial, con imanes permanentes en montaje superficial y magnetización *radial*, lograron densidades de par de 274 kNm/m^3 con simulaciones 2D y 210 kNm/m^3 con simulaciones, 3D basadas en el análisis de elemento finito, [105].

El engranaje magnético con modulación de campo, concéntrico, coaxial, con montaje superficial de los imanes permanentes de tierras raras en ambos rotores y magnetización radial, se ha convertido en un referente de la topología básica de los engranajes magnéticos de alto rendimiento, ya que su configuración ha demostrado tener una capacidad con la que se logra una alta densidad de par y alta eficiencia. Muchos de los avances en el ámbito de los engranajes magnéticos han girado en torno de este diseño. De hecho, el término de *engranaje magnético* se emplea actualmente como un sinónimo de esta topología, [101].

Una cantidad considerable de trabajos de investigación, algunos con diseños y prototipos, han seguido desarrollándose en un esfuerzo por mejorar el desempeño del engranaje magnético con flujo modulado de estructura concéntrica y coaxial. Sobre este concepto, se han presentado numerosas configuraciones que, en última instancia, buscan optimizar los parámetros de diseño con el propósito de obtener una densidad de par mayor y mejor eficiencia en el proceso de transmisión de potencia mecánica, todo ello dirigido a fortalecer su aplicación en el entorno industrial. Y aunque esta topología ha demostrado ser bastante eficiente y de alto desempeño, desde un principio se presumía la posibilidad de que el montaje superficial de los imanes permanentes en los rotores exhibiría problemas de integridad mecánica, argumentos que fueron verificados conforme esta primera versión del engranaje magnético eficiente, maduraba y se estudiaba con profundidad creciente, [106], [107], [60], [105].

Una forma en la que se puede medir el esfuerzo de investigadores, académicos y desarrolladores en la evolución de los engranajes magnéticos, es considerar la manera en la que los imanes permanentes se han utilizado para llevar a cabo el acoplamiento magnético,

con un enfoque en la dirección de su magnetización. En este contexto, destacan dos topologías básicas: la topología con diseño *lineal* y la topología con flujo *axial*. Sus diseños originales, estándar, se muestran en la Figura 2.22.

El engranaje magnético *lineal* presenta una topología tubular como se muestra en la Figura 2.22a, [108]. Su principio de operación es similar al del engranaje magnético coaxial con flujo radial descrito en [104]. Estudios de simulación demostraron que esta topología puede lograr una densidad de fuerza transmitida mayor a 1.7 MN/m^3 . Una investigación, que utilizó un prototipo construido para una aplicación aeroespacial, concluyó que el diseño lineal es sensible a la separación axial entre los anillos de las piezas ferromagnéticas [109]. En la publicación presentada, se argumentó que, cuando se combina con una máquina lineal de imanes permanentes, el engranaje magnético lineal puede ofrecer importantes ventajas, tales como su aplicación en la generación de energía undimotriz a partir de las olas marinas, hecho que fue estudiado, analizado y confirmado en publicaciones posteriores, [110] – [113].

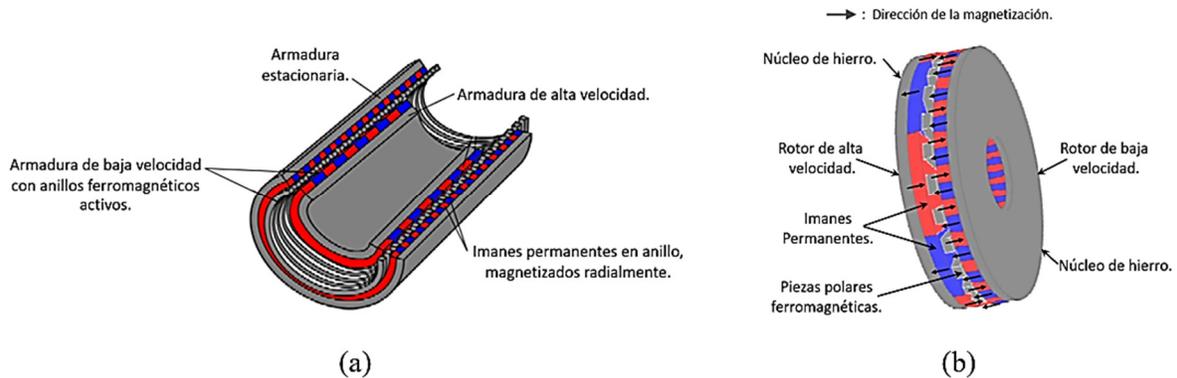


Figura 2.22. Engranaje magnético: (a) Topología con diseño lineal. (b) Topología de flujo axial. [60].

El engranaje magnético con flujo *axial* consiste en dos rotores con forma de discos, cada uno con imanes permanentes en montaje superficial que alternan sus polos norte y sur, desde los cuales se obtiene un flujo con dirección axial en lugar de que sea radial. Entre ambos rotores se ubica un anillo modulador de piezas polares ferromagnéticas, formando así una estructura tipo *sándwich*. El diseño se muestra en la Figura 2.22b, [114]. De igual forma que para el diseño lineal, el tipo axial se describe con el mismo principio de operación dado para el engranaje magnético coaxial con flujo radial. En su publicación original, la topología axial reportó una densidad de par que excede los 70 kNm/m^3 , en estudios de simulación, señalando

que las fuerzas axiales ejercidas en los rotores de alta y baja velocidad son relativamente bajas. La publicación mencionó que esta topología es adecuada en aplicaciones que requieren de un aislamiento hermético entre los ejes de entrada y salida, principalmente en bombas para el sector químico y farmacéutico, siendo útil también en la industria alimentaria y la aeroespacial, [114]. Sin embargo, su diseño simple pronto atraería la atención para investigar la potencialidad de sus aplicaciones en otras industrias, como la eólica, detalles que se mencionan en el siguiente capítulo.

En el estudio de estas primeras topologías desarrolladas por el equipo de Atallah que, de suyo, fueron las que detonaron el desarrollo moderno de los engranajes magnéticos de alta eficiencia, los trabajos para mejorar sus desempeños se dirigieron hacia el análisis de sus fuentes de excitación, representadas por imanes permanentes de tierras raras radialmente magnetizados. Se descubrió que la densidad de flujo en los entrehierros (espacios de aire que separan a los rotores del anillo modulador) varía en gran medida con el diseño de cada rotor, principalmente con la manera en que son utilizados los imanes permanentes montados en la superficie de sus núcleos. Se plantearon entonces diferentes arreglos en los imanes permanentes, orientando los trabajos, no sólo hacia la dirección de su magnetización, sino también hacia la exploración de nuevas configuraciones geométricas para reducir su volumen, lo que dio lugar a las topologías que se muestran en la Figura 2.23.

Rasmussen [115] propuso una topología para fortalecer la estructura mecánica del engranaje magnético convencional, configurando el rotor interno de alta velocidad con imanes permanentes rectangulares magnetizados en dirección tangencial, dispuestos como en una rueda de radios en lugar del montaje superficial, como se muestra en la Figura 2.23a. La simulación con elemento finito y las pruebas en prototipo mostraron una densidad de par de 92 kNm/m^3 . La eficiencia teórica era de 96%, pero sólo se logró un 81%, atribuyendo esta reducción a detalles constructivos en el prototipo. Se propuso explorar otros diseños que incluyeran una completa optimización en su construcción. Con este mismo esquema, Uppalapati [116], en un trabajo posterior, planteó un esquema de bajo costo utilizando imanes de ferrita, en una topología con enfoque de flujo tanto en rotor interno como externo. El diseño se muestra en la Figura 2.23b. Los resultados experimentales arrojaron una densidad

de par de 239 Nm/L. Sin embargo, al utilizar acero sólido en sus componentes, las pérdidas por corrientes de Eddy fueron altas, reduciendo la eficiencia del diseño.

Un arreglo Halbach de imanes permanentes, tiene la cualidad de incrementar el campo magnético en un lado del arreglo, cancelándolo en el lado opuesto. Halbach [117] y Choi [118], demostraron que este tipo de arreglo permite tener una intensidad de campo fuerte y densidad de flujo en el entrehierro bastante aceptable.

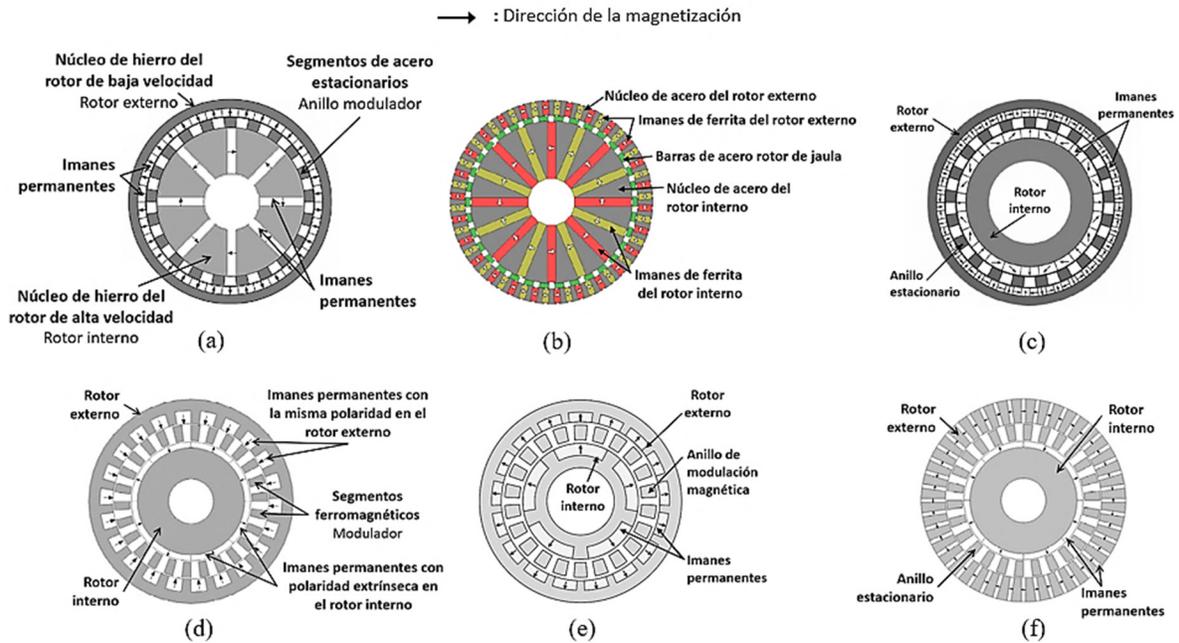


Figura 2.23. Topologías del engranaje magnético coaxial con modulación de campo: (a) Magnetización tangencial rotor interno. (b) Magnetización tangencial rotor interno con imanes de ferrita. (c) Magnetización Halbach con imanes en montaje superficial. (d) Magnetización radial, misma polaridad en rotor externo. (e) Magnetización radial, misma polaridad en ambos rotores. (f) Magnetización tangencial rotor externo. [115] – [124].

Jian [106], [119], incorporó el arreglo Halbach al engranaje magnético coaxial en un diseño de imanes permanentes con montaje superficial. Esta topología se muestra en la figura 2.23c. Los resultados en los estudios de simulación verificaron una densidad de par 13% mayor que la calculada en la topología convencional. Sin embargo, al considerar las fuerzas centrífugas y los esfuerzos mecánicos, el montaje superficial de los imanes no permite que este diseño sea apropiado para una transmisión donde se requiera alta velocidad o alto par, además de

que la topología Halbach presenta dificultades para lograr un buen ensamble mecánico. Fujita [120], observó que todas las piezas polares estacionarias del modulador, contribuyen a la transmisión de par cuando los imanes permanentes se encuentran en montaje superficial. Tal observación le llevó a proponer un engranaje magnético coaxial con una forma optimizada de sus piezas polares estacionarias y un arreglo Halbach en los imanes del rotor de alta velocidad (rotor interno). Con un modelo analítico se concluyó que, con las piezas polares propuestas, la transmisión de par podría incrementarse a más de un 15% en comparación con las piezas convencionales. Som [121], llevó a cabo estudios y experimentos con un engranaje magnético coaxial con magnetización Halbach, concluyendo que, aunque esta topología puede generar un alto par comparado con la topología convencional, definitivamente sigue teniendo dificultades para lograr una adecuada implementación práctica.

Liu [122], propuso e implementó una topología para el engranaje magnético concéntrico como la que se muestra en la Figura 2.23d. Lo peculiar en este diseño, es que, mientras en el rotor interno se tienen imanes permanentes en una disposición convencional, es decir, montados superficialmente con polaridades alternadas, en el rotor externo los imanes permanentes, magnetizados con la misma polaridad, están insertados a lo largo de la circunferencia del núcleo de hierro en un intento de mejorar la integridad mecánica del engranaje y reducir el material de imanes permanentes, tratando de mantener la capacidad de transmisión de par. El volumen de imanes permanentes efectivamente se redujo significativamente hasta un 16.5%, pero el bajo número de estos materiales en el rotor externo del prototipo produjo una disminución en la densidad de par, alcanzando 53.3 kNm/m³. Shen [123] realizó un estudio exhaustivo de la topología propuesta por Liu [122], proponiendo un engranaje magnético en el cual todos los imanes en cada rotor, externo e interno, están magnetizados en la misma dirección radial. La Figura 2.23e muestra la topología propuesta por Shen. En su prototipo, Shen utilizó imanes de ferrita para reducir costos. Con pequeñas modificaciones en su geometría, con este prototipo se logró reducir el volumen de la cantidad de imanes permanentes a un 75% en el rotor externo y a un 80% en el rotor interno, con una mejora en la densidad de par de un 24%, todo ello comparado con los valores obtenidos en el prototipo convencional con la topología de montaje superficial.

Li [107], modificó la topología propuesta por Rasmussen [115]. El diseño de Li consistió en colocar los imanes permanentes en el rotor interno en montaje superficial con magnetización radial, mientras que los imanes en el rotor externo, con forma rectangular tipo radio, tenían una magnetización tangencial, como se observa en la Figura 2.23f. En estudios de simulación con elemento finito 2D se obtuvo una densidad de par muy cercana a la obtenida por Rasmussen, 98.1 kNm/m^3 , aproximadamente un 25% más alto que el valor de la topología convencional, pero con pequeñas ondulaciones adicionales en el par. En una investigación posterior, Jing [124], trabajó con la topología de Li, obteniendo una densidad de par de 162.31 kNm/m^3 con estudios de simulación en 2D. Jing explicó que este incremento en la densidad de par se debía a los cambios que realizaron en la geometría de los imanes permanentes del rotor interno y a la magnetización tangencial de los imanes permanentes del rotor externo.

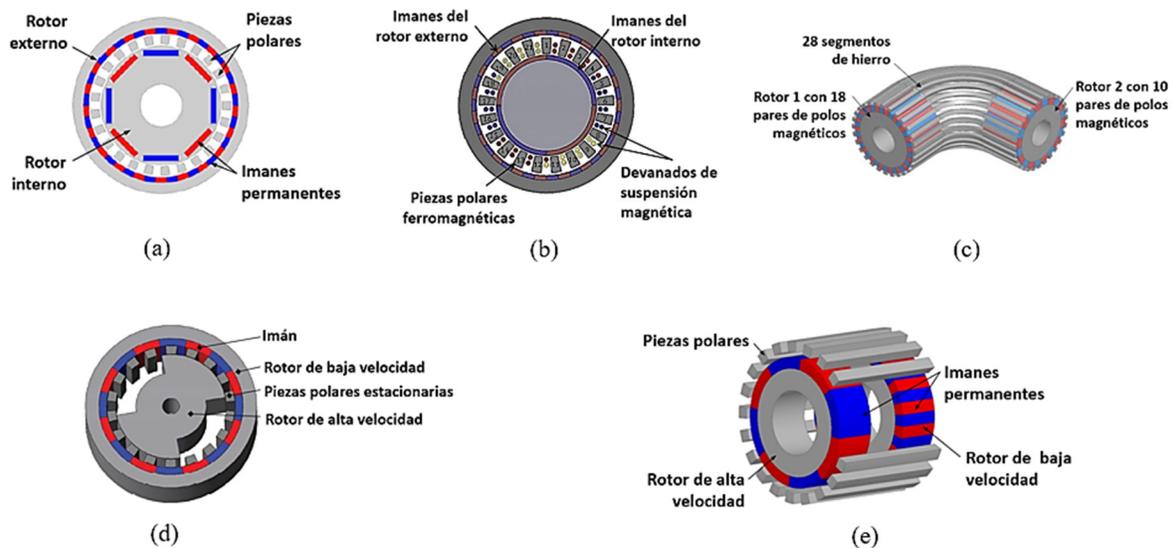


Figura 2.24. Variaciones de las topologías del engranaje magnético coaxial con flujo modulado: (a) Engranaje magnético con magnetización paralela rotor interno. (b) Engranaje magnético con suspensión magnética entre las piezas polares. (c) Engranaje magnético con intersección de ejes. (d) Engranaje magnético de reluctancia. (e) Engranaje magnético de flujo transversal. [125] – [132].

Existen otras topologías que conservan el diseño coaxial con modulación de campo, que presentan diferentes configuraciones en la geometría y disposición de sus componentes. Estas topologías, si bien, no exhiben altas densidades de par, son propuestas interesantes que buscan alcanzar en sus diseños las cualidades de un engranaje magnético de alto desempeño.

En la Figura 2.24a, se muestra una configuración propuesta por Frank, [125], [126], consistente en un engranaje magnético concéntrico con anillo modulador estacionario reforzado e imanes permanentes rectangulares con magnetización paralela en rotor interior. El diseño de la Figura 2.24b fue propuesto por Abdel-Khalik [127], un engranaje magnético concéntrico sin rodamientos y con devanados de levitación incrustados en las piezas polares actuando como suspensión magnética. La Figura 2.24c ilustra la topología presentada por Liu [128] siguiendo el concepto del engranaje magnético coaxial, pero con los moduladores de flujo magnético curvados, resultando en un diseño para aplicaciones en las cuales los ejes que se deban acoplar no se cruzan. La topología en la Figura 2.24d fue presentada por Aiso [129], empleando polos salientes en el rotor de alta velocidad (interno) con el propósito de tener una estructura simple y robusta, logrando de este modo un engranaje magnético de reluctancia para una transmisión a altas velocidades. La Figura 2.24e es el diseño de un engranaje magnético con topología de flujo transversal, introducido y analizado por Yong [130], con la intención de aumentar la resistencia mecánica en las partes con mayor debilidad de la topología concéntrica, pero manteniendo una alta densidad de par. Bomela [131], con una ligera variante en el diseño de esta topología transversal, mejoró la densidad de par, pero con un resultado muy por debajo del que se puede obtener con el engranaje magnético concéntrico con flujo radial. Posteriormente, Desvaux [132], en un estudio experimental, concluyó que la topología transversal presenta limitaciones para muchas aplicaciones. Sin embargo, resulta interesante destacar que el concepto de flujo transversal, cuyo diseño tiene similitudes con la topología axial, muestra ser uno de los diseños que, después de la topología concéntrica con flujo radial, ha presentado sugestivas propuestas de aplicación en máquinas con imanes permanentes utilizadas en los sistemas de generación de potencia con energía eólica, [133] – [136].

Muchas topologías basadas en el concepto de engranaje magnético coaxial con modulación de flujo, se han propuesto con la finalidad de llegar a un modelo con el que se obtenga una alta densidad de par que permita una óptima transmisión de potencia mecánica. En su mayoría, estas topologías dependen de la selección y configuración de algunos parámetros de diseño y de la forma en que se han utilizado los imanes permanentes para proveer el flujo magnético, con un enfoque en la dirección de su magnetización. La evolución dinámica con

la que se ha desarrollado la tecnología del engranaje magnético, permite entender que muchas publicaciones expongan los resultados de sus investigaciones argumentando topologías de alto rendimiento, cuando alcanzan por vez primera soluciones que antes no se habían presentado. Pero si el objetivo primordial es tener topologías con un alto rendimiento, sin acotar ninguno de los parámetros que definen su desempeño, necesariamente se considerarían geometrías y estructuras que tenderían a alejarse de la configuración del arreglo coaxial, algunas conservando su esencia, pero otras inevitablemente adoptando nuevos enfoques. Estas topologías no sólo se evaluarían en términos de la densidad de par y eficiencia, sino también considerando relaciones de engranaje apropiadas y un equilibrio entre costo, peso y volumen. Algunos conceptos propuestos para satisfacer estas características, con resultados aceptables, se muestran en los diseños de la Figura 2.25, y son estructuras de conversión tradicional que adoptan en algunas de sus componentes una rotación excéntrica.

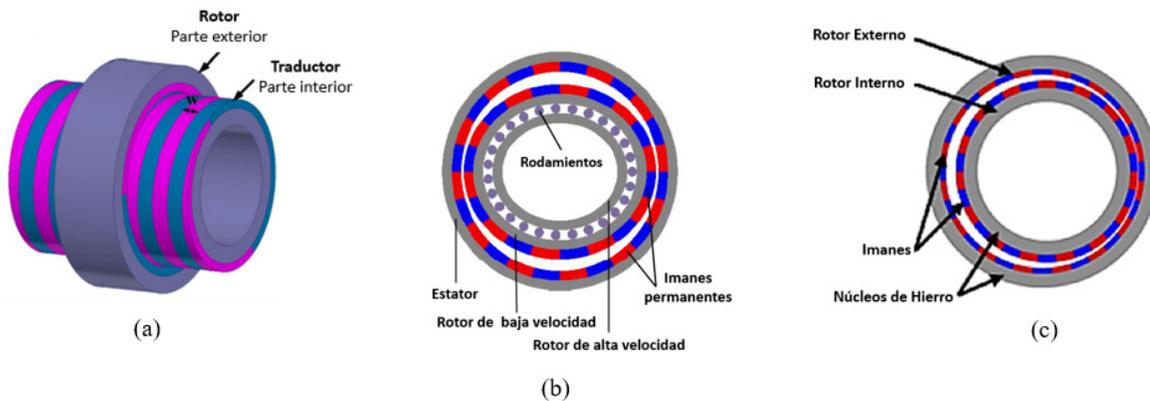


Figura 2.25. Diseños del engranaje magnético, diferentes al concepto coaxial con flujo modulado: (a) Engranaje magnético *trans-rotatorio*. (b) Engranaje magnético *armónico*. (c) Engranaje magnético *cicloidal*. [137] – [145].

El engranaje magnético *trans-rotatorio*, en la Figura 2.25a, se diseñó para convertir movimiento lineal en movimiento rotatorio. Presentado y analizado experimentalmente por Pakdelian, [137] – [140], sus propuestas incluyen aplicaciones para la generación de energía undimotriz, [141], [142]. La Figura 2.25b corresponde a la topología de un engranaje magnético *armónico* estudiado por Rens [143], [144]; esta topología es adecuada para aplicaciones que requieren alta relación de transmisión (mayores que 20:1). Sin embargo, su implementación se complica por requerir un rotor de baja velocidad que sea flexible. Una

topología que atrae considerablemente la atención de investigadores y desarrolladores, principalmente por el grado de eficiencia que presenta, es la del engranaje magnético *cicloidal* de flujo radial mostrado en la Figura 2.25c. Esta topología fue presentada por Jorgensen [145], demostrando que potencialmente es capaz de lograr altas densidades de par y altas relaciones de transmisión con altos niveles de eficiencia. En México, el diseño cicloidal fue ampliamente estudiado analíticamente y experimentalmente por Chicurel Uziel[†], [146], dejando un legado invaluable de divulgación sobre el tema de transmisiones de engranes magnéticos [147]. No obstante, aún con todas las virtudes que tiene el engranaje magnético con topología cicloidal para aplicaciones potenciales en transmisiones magnéticas, su construcción es aún más complicada que la del tipo concéntrico coaxial. Esto pudiera explicar el por qué la mayor parte de los trabajos de investigación y desarrollo se han inclinado al engranaje magnético concéntrico con modulación de campo. Sin embargo, un juicio más razonado sobre esta posible conclusión, puede fundamentarse en los resultados del trabajo de Gardner [148]. En su publicación sostiene que, para relaciones de transmisión bajas, la topología coaxial óptima logra generalmente densidades de par mayores que la cicloidal optimizada, y que, por el contrario, en relaciones de transmisión medias y altas, el engranaje cicloidal puede superar al coaxial, con ciertas limitaciones en el grosor de los imanes, ya que la topología cicloidal varía con algunos parámetros de diseño, como su radio exterior. Gardner concluye que la estructura cicloidal enfrenta importantes desafíos de fabricación, principalmente por el hecho de que el eje de un rotor debe orbitar el eje del otro rotor.

Con base en las topologías de engranajes magnéticos mostradas, las que presentan alta densidad de par, alta relación de engranaje y alta eficiencia pueden resumirse en tres grandes categorías según su diseño: *concéntrico*, *armónico* y *cicloidal*, en consideración de su uso potencial para sustituir al engranaje mecánico de la multiplicadora en los aerogeneradores.

2.3 Aplicaciones de Engranajes Magnéticos en Aerogeneradores

Los aerogeneradores de eje horizontal utilizan, convencionalmente, engranajes mecánicos en el tren motriz para transmitir la potencia mecánica desde el rotor hacia el generador eléctrico. La configuración básica de este sistema de transmisión, que se muestra en la Figura 1.4 y se esquematiza en la Figura 2.26a, consiste en una caja multiplicadora que permite adecuar la salida de baja velocidad y alto par del eje de las palas del rotor, al eje de alta velocidad y bajo par en la entrada del generador, que regularmente es una máquina de imanes permanentes caracterizada por su alta densidad de par. Sin embargo, por la problemática inherente al mecanismo de engranajes mecánicos, un segmento importante de la industria de aerogeneradores elige prescindir de la multiplicadora adoptando un sistema de accionamiento directo para mover al generador directamente desde las palas del rotor, según se muestra en la Figura 1.7 y se ilustra en la Figura 2.26b. Aunque el accionamiento directo es una solución real para evitar los problemas asociados a la multiplicadora, el generador que se requiere es muy grande, causando problemas de peso y tamaño en el sistema de generación eolieléctrica. Ante estos inconvenientes, una alternativa es el uso de engranajes magnéticos.

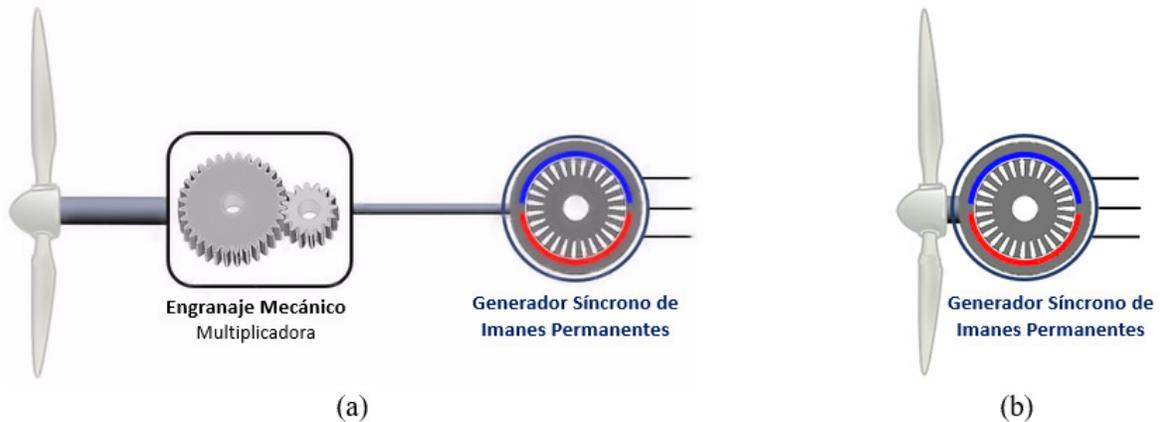


Figura 2.26. Ilustración del tren motriz en un aerogenerador: (a) Esquema convencional: accionamiento indirecto mecánico. (b) Accionamiento directo tradicional. [150].

Los engranajes magnéticos han demostrado tener excelentes capacidades de operación y transmisión de par, competitivas con las que exhiben los engranajes mecánicos [104], y las máquinas eléctricas con imanes permanentes presentan importantes ventajas comparadas con

las máquinas de excitación electromagnética, [149]. Estas cualidades han llevado a que se estudien diferentes formas de combinar engranajes magnéticos con máquinas eléctricas, con el propósito de lograr un esquema que provea una transmisión con alto rendimiento. Para esto, el engranaje magnético con topología concéntrica de flujo modulado ha sido considerado como el más idóneo, principalmente por presentar una óptima utilización de los imanes permanentes en sus rotores, interno y externo, y con ello una alta densidad de par. Por su geometría, este dispositivo adquiere la capacidad para integrarse con una máquina de imanes permanentes para aplicaciones en sistemas eólicos. Pero para lograr un máximo desempeño del tren motriz en aplicaciones prácticas, es fundamental considerar factores relativos al volumen, peso y costos del sistema. Esto da lugar a que las investigaciones, además de enfocarse en lograr una transmisión con alta densidad de par y alta eficiencia, también centren su atención en buscar estructuras mecánicas más simples y compactas, con mejor utilización de los imanes permanentes y costos de fabricación más bajos [150]. El interés por optimizar del tren motriz en un aerogenerador, al grado de eliminar los problemáticos elementos de transmisión mecánicos, ha impulsado el planteamiento de esquemas en los que prácticamente el generador eléctrico pueda ser accionado directamente por las palas del aerogenerador. El resultado es la *máquina de imanes permanentes integrada con engranaje magnético*, cuya ilustración se muestra en la Figura 2.27a, [151].

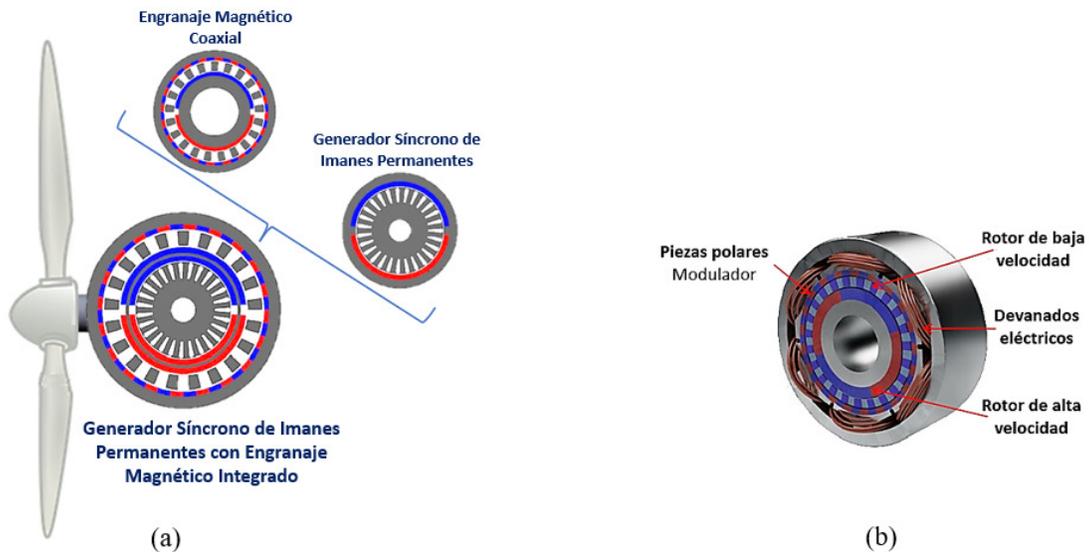


Figura 2.27. Configuraciones del tren motriz en un aerogenerador utilizando la tecnología de engranajes magnéticos: (a) Máquina de imanes permanentes integrada con engranaje magnético [151]. (b) Pseudo accionamiento directo [156].

La máquina de imanes permanentes integrada con engranaje magnético, es una topología formada por un engranaje magnético coaxial *acoplado mecánicamente* a un generador de imanes permanentes, de modo que puedan compartir un rotor común de alta velocidad. Esta configuración pretende maximizar los beneficios de ambos elementos en un solo arreglo con alta densidad de par y alta eficiencia. El diseño, además de presentar un sistema más compacto y ligero, comparado con el accionamiento directo tradicional, ofrece superar las fallas que ocurrirían en una transmisión con engranajes mecánicos. En aerogeneradores, esta topología permitiría una captación directa del viento teniendo las palas montadas en la estructura del rotor externo del engranaje magnético, con parámetros de par y velocidad que la hacen sumamente atractiva para los sistemas eoloelectrónicos. Actualmente, los estudios sobre esta topología continúan a nivel experimental con diferentes configuraciones orientando las investigaciones a mejorar el desempeño de esta máquina. Algunos trabajos se han presentado con prototipos para aplicaciones en aerogeneradores, [150] – [153].

Otras topologías utilizan el concepto anterior para optimizar el sistema de conversión de energía eólica, [154]. Si en el rotor externo de baja velocidad se añade además un conjunto de bobinas, para producir un campo magnético adicional, por el cual se pueda controlar la velocidad y dirección de giro del rotor interno, la máquina evoluciona a un esquema identificado como *pseudo accionamiento directo*, [155]; en esta topología, un engranaje magnético coaxial con flujo modulado y un generador de imanes permanentes se encuentran *mecánica y magnéticamente acoplados*. En la Figura 2.27b se muestra la estructura de este diseño [156]. En aplicaciones con sistemas eólicos, el rotor externo de baja velocidad del engranaje magnético es accionado directamente por el eje de las palas del aerogenerador, mientras que el rotor interno de alta velocidad se encuentra acoplado con el eje del rotor del generador eléctrico, en una sola estructura. Esta topología fue desarrollada por la empresa británica Magnomatics® y ya se encuentra insertada en el mercado promoviéndose para varias aplicaciones [157], señalando que en sistemas de pseudo accionamiento directo para aerogeneradores se incluye el engranaje magnético más grande que se ha fabricado hasta ahora [158]. El pseudo accionamiento directo fue usado para construir el prototipo de un sistema de conversión de energía eólica, utilizando una máquina asíncrona para representar

la dinámica del rotor del aerogenerador [159]. La simulación por computadora y las pruebas experimentales, demostraron que el sistema propuesto ofrece características de menor volumen y menor peso, además de un rendimiento energético mayor comparado con un sistema tradicional de transmisión directa. Otros trabajos publicados han investigado el concepto de pseudo accionamiento directo en prototipos del tren motriz de un aerogenerador, [160] – [164]. Una variante de la estructura conceptual con acoplamiento mecánico y magnético, es el *generador sin escobillas doblemente alimentado para generación eléctrica con potencia eólica*, [165] – [167]. Consiste en una configuración idéntica al engranaje magnético coaxial, en el cual se han reemplazado los imanes permanentes de los rotores por dos devanados estacionarios alimentados por una excitación de corriente alterna (ca); el único elemento giratorio es el modulador, que es accionado por la fuente de energía mecánica (rotor del aerogenerador), en un arreglo coaxial entre los devanados interno y externo. En esta topología el voltaje del devanado externo, conectado a la red eléctrica, se ajusta en función de la velocidad de las piezas polares ferromagnéticas del modulador que depende de la velocidad del viento, con el fin de operar a la máquina a su máxima potencia. La operación de baja velocidad de este diseño, lo convierte en un atractivo esquema de accionamiento directo para pequeños sistemas de generación eoloelectrónica, con un costo reducido por la eliminación de los imanes permanentes, pero también con una reducción de par transmitido. Un estudio de las topologías descritas [154], detalla que la máquina integrada y el pseudo accionamiento directo, se caracterizan por un esquema de integración directa de un engranaje magnético coaxial y un generador de imanes permanentes, y por lo tanto una densidad de par más alta, en comparación con los esquemas híbridos que tienen, por lo menos, un rotor de imanes permanentes del engranaje magnético reemplazado por un devanado de armadura. Sin embargo, tienen el inconveniente de una estructura mecánicamente compleja y una tendencia a generar problemas de confiabilidad en el sistema de conversión de potencia mecánica. La topología del generador doblemente alimentado, que básicamente es una estructura conceptual de engranaje magnético, en el cual los imanes permanentes se han sustituido por devanados, se expone como la más simple al operar con un solo elemento rotatorio; no obstante, tienen una capacidad de par mucho menor, siendo ésta una de las debilidades de las topologías que combinan imanes permanentes y devanados de armadura, que en algunos trabajos se identifican como *máquinas de flujo modulado*, [168] – [170].

Para una aplicación práctica en aerogeneradores, la integración de un engranaje magnético con un generador eléctrico es una alternativa deseada porque plantea las ventajas de un esquema de accionamiento directo para operaciones a baja velocidad y alto par, y que, como otra alternativa, el uso de un engranaje electromagnético reduciría aún más el espacio ocupado como un sistema de conversión de energía eólica en energía eléctrica. Pero aun presentando alta eficiencia y densidades de par competitivos para una generación eoloeléctrica, la máquina integrada tiene inconvenientes relacionados con su manufactura, y que el engranaje electromagnético, con una estructura más simple y la posibilidad de ofrecer rangos más amplios de velocidad, puede exhibir una menor capacidad de par.

También, es conocido que el engranaje magnético coaxial con magnetización radial tiene una estructura simple, en la que la utilización eficiente de los imanes permanentes le permite ofrecer una alta densidad de par para aplicaciones en sistemas eólicos. Si bien, un engranaje magnético es capaz de llevar a cabo una transmisión de potencia mecánica, utilizarlo como único elemento del tren motriz, no deja de ser una transmisión pasiva, dado que no tiene puertos eléctricos de entrada ni de salida como el engranaje electromagnético.

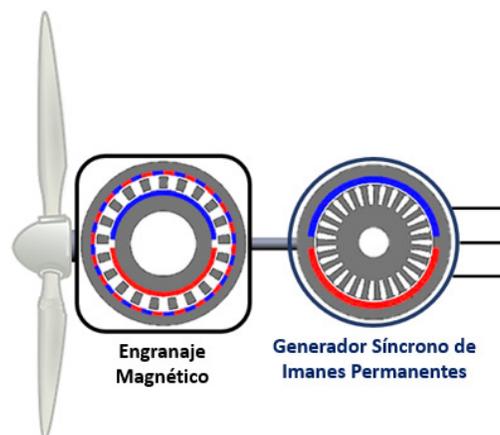


Figura 2.28. Ilustración del tren motriz en un aerogenerador. Esquema convencional: accionamiento indirecto magnético [171].

Para evitar la estructura compleja de una máquina integrada, probablemente el método más simple consiste en sustituir la multiplicadora en el esquema convencional por un engranaje magnético, acoplado mecánicamente con un generador síncrono de imanes permanentes de alta velocidad, como se aprecia en la Figura 2.28. Este esquema se identifica como *accionamiento indirecto magnético* [171], o *transmisión semidirecta con engranaje*

magnético [172]. Se ha planteado como una solución intermedia entre el esquema convencional de accionamiento indirecto mecánico y el accionamiento directo tradicional, destacando los méritos del engranaje magnético coaxial con magnetización radial para superar las desventajas de una transmisión mecánica y señalar la competitividad de esta topología para aplicaciones en sistemas de generación con energía eólica.

En esta revisión sobre los mecanismos basados en engranajes, puede apreciarse que los engranajes magnéticos representan una importante tecnología emergente que se investiga para obtener una óptima transmisión de potencia mecánica. Se ha visto que, en las dos décadas de desarrollo, muchas topologías que se han presentado dependen de la selección de los parámetros de diseño y de la forma en que se han utilizado los imanes permanentes de tierras raras. Más aún, se han puesto en relieve diferentes conceptos estructurales en las que la tecnología del engranaje magnético se incorpora en máquinas eléctricas para lograr un esquema de óptimo desempeño en el tren motriz de aerogeneradores.

Durante la segunda década de este siglo, se han multiplicado los trabajos de investigación que estudian los diferentes diseños del engranaje magnético para aplicaciones en aerogeneradores, abordando cuestiones para mejorar su densidad de par y optimizar su estructura topológica. El esquema que más atención ha recibido es el concéntrico con magnetización radial [173] – [193], pero también se han presentado sugestivas propuestas considerando otras topologías. Tal es el caso del engranaje magnético lineal que, como se ha mencionado, su estudio conduce hacia aplicaciones para la generación de energía undimotriz, [110] – [113], [194], [195]. Otras topologías, no menos importantes, corresponden al engranaje magnético trans-rotatorio, también con aplicaciones en la generación undimotriz [141], [142], y al engranaje magnético de flujo transversal para aplicaciones en aerogeneradores, [133] – [135]. Se agrega a estas topologías el generador Vernier de imanes permanentes, que puede categorizarse como una máquina integrada con engranaje magnético, [196], [197]. Este tipo de máquina, se propone como una alternativa bastante razonable para un esquema de accionamiento directo en aerogeneradores, principalmente por ofrecer una alta densidad de par debido al efecto de engranaje magnético en su arquitectura, [189], [198] – [205].

Si bien, se ha presentado una diversidad de conceptos estructurales en torno al uso de engranajes magnéticos para aplicaciones en aerogeneradores, este tema sigue en pleno desarrollo. Los resultados actuales señalan que la topología concéntrica coaxial sigue siendo la más estudiada. Sin embargo, queda una estructura con arquitectura igualmente concéntrica cuya investigación aún no está agotada, siendo ésta el engranaje magnético con flujo axial. Esta topología tiene un diseño mucho más simple comparado con el de flujo radial, y ofrece aplicaciones potenciales para operar como parte del tren motriz en aerogeneradores. Aun cuando el engranaje magnético con flujo axial ha sido también estudiado como parte de la estructura de máquinas integradas, [206] – [213], son escasas las publicaciones que directamente incluyen a esta topología en estudios con aplicaciones en la transmisión de potencia mecánica, [199], [214] – [216]. Es pues, este tema, una asignatura que abre la posibilidad de continuar con su estudio para conocer mejor su arquitectura y sondear la posibilidad de una aplicación en los sistemas eoloelectrónicos. Este es el objetivo del presente trabajo.

Capítulo 3

Engranaje Magnético con Topología Axial

3.1 Revisión de la Literatura

El engranaje magnético con flujo axial ha resultado ser adecuado para la transmisión de potencia mecánica, en sistemas que requieren un aislamiento hermético entre los ejes de entrada y salida. De igual manera, es particularmente útil para aplicaciones en las que la longitud axial del engranaje impone limitaciones, lo que le hace ideal para integrarse en mecanismos de accionamiento directo en aerogeneradores. Un diseño mejorado sobre trabajos previos, en las propiedades de transmisión de par, fue inicialmente publicado por Mezani, Atallah y Howe en 2006, [114], y paulatinamente ha adquirido considerable interés por su ventaja potencial de ofrecer una alta densidad de flujo, equiparable a la que exhibe la topología clásica con magnetización radial. El diseño estándar del engranaje magnético con flujo axial se muestra en la Figura 2.22b.

La arquitectura axial representa una novedad por la relativa sencillez en su diseño conceptual. Y aunque no con el énfasis con que se ha estudiado la estructura con flujo radial, la topología axial también ha sido analizada y estudiada en diferentes trabajos. Chen [217], realizó un análisis cuantitativamente comparativo en el que se contrasta el desempeño de estas dos topologías básicas de engranajes magnéticos. Entre sus objetivos, buscó obtener una guía para aplicaciones industriales. Los resultados de este análisis señalan los aspectos positivos de cada topología destacando que pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones desarrollando un desempeño óptimo. En un estudio posterior, una comparación paramétrica entre ambas topologías, efectuada por Gardner [218], en diseños con imanes permanentes en montaje superficial, describe que los engranajes magnéticos con flujo radial son una mejor selección en la mayoría de las aplicaciones prácticas, enfatizando sin embargo que los

engranajes con flujo axial tienen una ventaja significativa en aplicaciones donde es posible tener un radio exterior grande y una longitud axial pequeña, y además, donde se requiere transmitir potencia mecánica a través de una barrera plana. Estas cualidades disponen a la topología axial con una excelente ventaja, ya que con una relación grande de diámetro exterior/longitud axial, el engranaje magnético de flujo axial tiene el potencial de ofrecer una alta densidad de par, incluso mayor, comparada con su equivalente de flujo radial, [217].

De los trabajos con mayor trascendencia, para lograr un rendimiento óptimo del engranaje magnético con flujo axial, se pueden contar aquellos realizados con un diseño que emplea una topología con *enfoque de flujo*. Esta topología consiste en disponer los imanes del engranaje en arreglos bien definidos, de manera que todo el flujo producido por ellos se pueda concentrar a fin de lograr altas densidades de flujo en el entrehierro, de acuerdo con una aplicación particular deseada. Para lograr una configuración de imanes permanentes con enfoque de flujo, se utilizan diferentes técnicas entre las cuales se considera la dirección de la polarización [219]. El engranaje magnético coaxial con flujo radial fue previamente estudiado incluyendo la topología con enfoque de flujo, con imanes magnetizados en dirección tangencial, [107], [115], [124], [195], [220], [221].

El primer estudio del engranaje magnético con flujo axial y topología con enfoque de flujo lo realizó Acharya, usando primero imanes de ferrita, [222], y después de NdFeB, [223]. El diseño se muestra en la Figura 3.1a. En ambos casos, los imanes fueron rectangulares y se magnetizaron en una dirección azimutal, forzando el paso del flujo en dirección axial. Con esta disposición de los imanes se logra el efecto de enfoque de flujo, observando que el engranaje magnético con flujo axial es capaz de proporcionar una mejor densidad de par, incluso mayor a la del engranaje coaxial con flujo radial. Esta característica obedece al hecho de que las superficies del engranaje ocupadas para la interacción de los campos magnéticos, son mayores en la topología axial, comparadas con la topología radial. Acharya observó que, además de una correcta dirección de magnetización, si se dimensiona correctamente la estructura del engranaje magnético con flujo axial, debería lograrse densidades de par más altas que el engranaje con flujo radial y que la densidad de par en una topología con enfoque de flujo, se puede aumentar cambiando el área de los imanes frente al entrehierro.

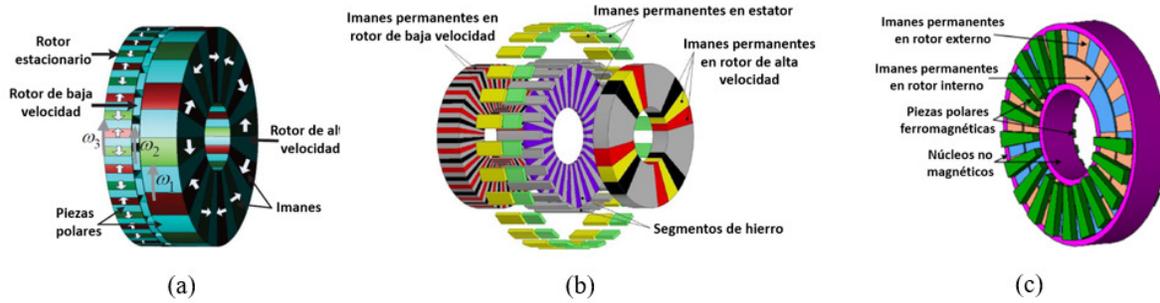


Figura 3.1. Topologías propuestas del engranaje magnético con flujo axial: (a) Engranaje magnético con enfoque de flujo (Acharya [223]). (b) Engranaje magnético híbrido con flujo transversal-axial (Peng [224]). (c) Engranaje magnético con flujo modulado (Zhu [225]).

En los estudios de simulación de la investigación de Acharya, concluyeron que un engranaje magnético de flujo axial con topología de enfoque de flujo puede operar con una densidad de par volumétrico de 289.8 Nm/L, cuando se utiliza un diámetro exterior de 280 mm. Sin embargo, el diseño presentado exhibe problemas para su manufactura, principalmente porque requiere de una estructura mecánica robusta para mantener un entrehierro pequeño y uniforme en la dirección axial [222].

Peng [224], propuso un engranaje magnético híbrido integrando una versión con flujo transversal y una con flujo axial, en una sola unidad. Como se aprecia en la Figura 3.1b, este diseño emplea imanes permanentes adicionales en el modulador de flujo con el propósito de producir un par adicional en la transmisión. El desempeño de esta nueva topología se evaluó mediante simulaciones con el método de elemento finito 3D, obteniendo una densidad de par de 181.2 kNm/m³, que en comparación con la densidad de par de 150.7 kNm/m³, calculada en el engranaje magnético con flujo axial convencional, logra una mejora del 20% sobre el diseño estándar de este tipo de engranaje.

Zhu [225], trabajó con un diseño centrado en la función de modulación del engranaje magnético con flujo axial. En su configuración, utilizó dos anillos de modulación estacionarios, colocados en ambos lados de los rotores, según se muestra en la Figura 3.1c. Con esta variación, la propuesta ofrece ventajas de una estructura mecánica más simple y una longitud teóricamente ilimitada del entrehierro entre los dos rotores. Las simulaciones del diseño optimizado dieron como resultado una densidad de par de 77 kNm/m³.

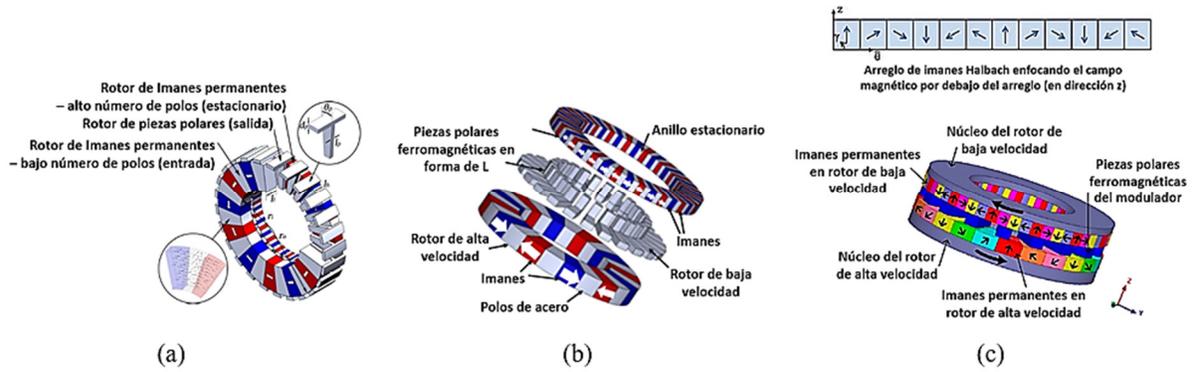


Figura 3.2. Otras topologías propuestas del engranaje magnético con flujo axial: (a) Engranaje magnético híbrido con flujo transversal-axial y moduladores en forma de T (Yin [226]). (b) Engranaje magnético con moduladores en forma de L e imanes en forma de rueda de radios (Tsai [227]). (c) Engranaje magnético con arreglos de imanes Halbach (Johnson [228], Hu [229]).

Yin [226], propuso una variación en la topología con enfoque de flujo, presentando el diseño híbrido de un engranaje magnético con las piezas polares del modulador de flujo en forma de T. Esta forma permitiría crear pasos de flujo en sentido axial y transversal, reduciendo el nivel de saturación en las piezas polares en comparación con la topología axial estándar. El enfoque de flujo se logra con imanes permanentes circunferencialmente magnetizados. El diseño se ilustra en la Figura 3.2a. Los análisis de simulación en 3D, con el diseño optimizado, resultaron en una aceptable densidad de par de 282.56 Nm/L. Pero en la práctica, esta configuración sería mecánicamente complicada para su fabricación.

En un trabajo muy similar al anterior, Tsai [227] presentó un innovador diseño del engranaje magnético con flujo axial utilizando la tecnología de impresión 3D para sortear los problemas de fabricación debidos a la complejidad geométrica. El prototipo impreso en 3D, utilizó piezas polares en el modulador en forma de L. Una ilustración del diseño se muestra en la Figura 3.2b. Para minimizar costos, se emplearon imanes de ferrita dispuestos en forma de rueda de radios, logrando el efecto de enfoque de flujo. Con esta configuración, se reduciría la dispersión de flujo, pero la densidad de par sería solamente de 3 kNm/m³. En esta investigación se efectuaron también estudios de simulación en 3D con elemento finito, considerando imanes de NdFeB, obteniendo una densidad de par de 74 kNm/m³. Este fue uno de los primeros trabajos experimentales del engranaje magnético con flujo axial en topología con enfoque de flujo.

Johnson [228] en la publicación de su investigación, señala que existen dos métodos que han sido utilizados para incrementar la densidad de par en los diseños de engranajes magnéticos; menciona las configuraciones de imanes permanentes con enfoque de flujo y los arreglos Halbach. [117], [119]. Johnson implementó arreglos de imanes permanentes con magnetización Halbach en ambos rotores de un engranaje magnético con flujo axial. Estos arreglos se muestran en la parte superior de la Figura 3.2c. Con estudios de simulación paramétrica en 3D utilizando elemento finito, demostró que la densidad de par podría incrementarse hasta en un 65.7% en comparación con el diseño equivalente de imanes con montaje superficial. Hu [229] presenta el trabajo analítico de un engranaje magnético axial con arreglos de imanes permanentes Halbach, basado en la distribución de flujo en el entrehierro. La topología es la misma que el diseño estándar (véase la Figura 2.22b), diferenciándose únicamente en las orientaciones de magnetización de los imanes permanentes. Recuérdese que, en el engranaje magnético con flujo axial estándar, los imanes permanentes están magnetizados axialmente, mientras que el diseño Halbach tiene imanes permanentes con orientaciones diferentes en su magnetización, como se puede ver en el engranaje magnético de la parte inferior en la Figura 3.2c. La investigación de Hu incluye un análisis de los parámetros dimensionales más característicos y un proceso de optimización con el software Maxwell y el método de elemento finito 3D, a fin de maximizar la densidad de flujo. Con el modelo optimizado se logró una densidad de par de 93.3 kNm/m^3 , equivalente a una mejora de poco más de 19% con respecto a la densidad de par de 78.1 kNm/m^3 del modelo no optimizado.

Kouhshahi [216] presentó el primer estudio que incluye un análisis del rendimiento experimental de un engranaje magnético con flujo axial utilizando la topología con enfoque de flujo, con la posibilidad de una aplicación en energías renovables. Para obtener un diseño que pudiera construirse, maximizando la densidad de par, se realizó un análisis paramétrico en la geometría de los rotores, utilizando herramientas de elemento finito. Por consideraciones prácticas de fabricación, el engranaje magnético con flujo axial se construyó utilizando imanes rectangulares, basándose en el modelo de Acharya [223]. El efecto de enfoque de flujo se llevó a cabo aumentando la relación entre el área de la superficie del imán y el área del polo de acero frente al entrehierro. El engranaje magnético construido se

ensambló en un banco de pruebas, en donde el rotor de baja velocidad se accionó mediante un motor de inducción, representando el par de entrada, mientras que el rotor de alta velocidad fue conectado a un generador de imanes permanentes al cual se entregó el par de salida del engranaje magnético. Los resultados de este trabajo arrojaron un valor calculado de densidad de par de 173.02 Nm/L, y un valor medido experimentalmente de 152.3 Nm/L. Aunque el valor experimental es un 12% menos del valor calculado en la simulación, los autores lo consideran significativamente mayor que el valor obtenido en pruebas con un diseño de engranaje magnético con topología estándar. No obstante, en las conclusiones de la publicación, se advierte que las grandes fuerzas axiales que se verifican en este tipo de engranaje dejan un importante desafío para su construcción, principalmente para mantener mecánicamente un entrehierro pequeño.

El estudio del engranaje magnético con flujo axial, considerándolo como un dispositivo independiente, presenta retos importantes para la proyección de su aplicación en diferentes industrias, incluyendo la eólica. Pero existe otra manera de orientar su estudio. Johnson [209] define, literalmente que, como una extensión natural de un engranaje magnético pasivo, se puede obtener una configuración con diferentes topologías que integre directamente un engranaje magnético con flujo axial a una máquina eléctrica convencional, para formar una estructura compacta única que combina los beneficios de un engranaje magnético y la simplicidad de una máquina de accionamiento directo. Este diseño se identificó en el capítulo anterior, para el engranaje magnético coaxial con flujo radial, como *máquina de imanes permanentes integrada con engranaje magnético*. Varios trabajos se han publicado destacando los méritos de esta topología, ahora con flujo axial.

Niguchi [206] presentó la primera propuesta de una máquina integrada con engranaje magnético de flujo axial. Una interpretación de su diseño se muestra en la Figura 3.3a. En este diseño, solamente el rotor de alta velocidad tiene imanes permanentes montados superficialmente en un núcleo de acero al carbón. El rotor de baja velocidad se compone de piezas polares de acero y el estator tiene devanados concentrados trifásicos. El eje de salida de la máquina está conectado al rotor de baja velocidad. La densidad de par calculada por simulación con elemento finito 3D fue relativamente baja, 15 kNm/m³, principalmente por

el reemplazo de los imanes por devanados estacionarios en uno de sus rotores, aunque los autores señalan que este valor fue tres veces mayor que el logrado con su modelo de engranaje magnético con flujo radial.

Uno de los primeros trabajos significativos para la industria eólica, sobre la aplicación de la máquina integrada con topología axial, fue el que presentó Wang [214]. En este trabajo, se publicó el diseño, optimización, construcción mecánica y evaluación experimental del desempeño de una máquina de imanes permanentes con engranaje magnético de flujo axial para una aplicación en el tren de potencia en un aerogenerador. En la Figura 3.3b se ilustra el diseño mecánico de la máquina propuesta. Los resultados con un modelo optimizado demostraron que es posible obtener una densidad de par de 105 kNm/m^3 en la región activa del engranaje magnético, cuando éste opera con un diámetro exterior de 320 mm. Esta densidad de par es comparable con la de un arreglo típico de engranajes mecánicos en la caja multiplicadora de un aerogenerador. El cálculo se realizó considerando únicamente el engranaje optimizado, con un diámetro mayor a la del generador eléctrico. De acuerdo con las observaciones de los autores, si el diámetro es igual tanto en el engranaje como en el generador, la densidad de par disminuye en alrededor de un 50%. En tal caso, la topología concéntrica con flujo radial, en donde el generador de imanes permanentes se integra dentro del engranaje magnético, sería la opción más adecuada. Las pruebas al prototipo fabricado, revelan que la máquina propuesta por Wang exhibe un factor de potencia de 0.93 y una eficiencia de 92.55%, además de tener una estructura compleja. Un detalle peculiar de este diseño, que puede tratarse como ventaja, es que tanto el engranaje magnético con flujo axial y el generador de imanes permanentes pueden optimizarse de manera individual, incrementando las posibilidades de obtener un mejor rendimiento en la máquina integrada. Sin embargo, al estar físicamente independientes el engranaje y el generador, sin compartir partes comunes, no se podría considerar a esta máquina como un diseño compacto.

En su investigación, Johnson [209] subrayó las ventajas de combinar un engranaje magnético con un generador eléctrico, de bajo par y alta velocidad, para obtener una única máquina integrada con mayor capacidad de densidad de par, con un potencial para aplicaciones en sistemas de accionamiento directo de aerogeneradores.

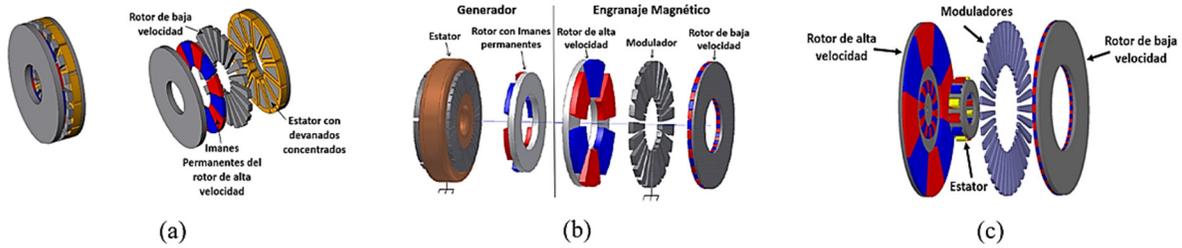


Figura 3.3. Topologías de la máquina integrada con engranaje magnético de flujo axial: (a) Máquina integrada con flujo axial propuesta por Niguchi [206]. (b) Generador de imanes permanentes integrado con flujo axial propuesto por Wang [214]. (c) Generador de imanes permanentes integrado con flujo axial propuesto por Johnson [209].

Para la configuración propuesta, Johnson puntualiza la importancia del engranaje magnético con topología axial con respecto a la topología radial, desde una simple óptica analítica. Para esquemas similares en el entrehierro, en la topología radial el par aumenta con el cuadrado del radio debido principalmente a que el área del entrehierro aumenta haciéndolo linealmente. En la topología axial el par aumenta con el cubo del radio, debido a que el área del entrehierro aumenta con el cuadrado de ese radio. Luego, dado que el volumen aumenta con el cuadrado del radio, el engranaje magnético con flujo axial teóricamente puede alcanzar una densidad de par que aumenta linealmente con el radio, mientras que en el engranaje magnético con flujo radial la densidad de par es, idealmente, independiente del radio. Este análisis hace suponer que los engranajes magnéticos con flujo axial favorezcan los diseños con diámetros exteriores de mayor tamaño y longitudes axiales cortas para lograr altas densidades de par. Y como esto es teórico, queda considerar en todo diseño mecánico las limitaciones prácticas asociadas a la construcción de un prototipo experimental. Partiendo de este análisis, Johnson presentó el prototipo de una máquina integrada con engranaje magnético de flujo axial, en el que el generador eléctrico de imanes permanentes se monta en el orificio interno del rotor de alta velocidad del engranaje magnético. El diseño se puede apreciar en la Figura 3.3c. En lugar de conectarlos en serie, como accionamiento indirecto, al combinar de esta forma los dos subsistemas, generador y engranaje magnético, se obtiene una máquina integrada de diseño compacto que puede operar como un sistema de accionamiento directo. Puesto que los radios exteriores se mantienen sin variación, se esperaría que esta configuración pueda alcanzar una densidad de par volumétrico alto. Sin embargo, para aislar magnéticamente el engranaje con flujo axial del generador de imanes permanentes, es necesario un entrehierro

radialmente grande, que se contrapone con el tamaño compacto de la máquina integrada. Con parámetros optimizados en ambos subsistemas de la máquina integrada, se realizaron simulaciones y se efectuaron pruebas en el prototipo fabricado. Para las pruebas de simulación con el método de elemento finito 3D, se consideró en el engranaje un entrehierro de 1 mm, en el lado del rotor de alta velocidad, y un diámetro exterior de 239 mm, logrando una densidad de par de 60.6 kNm/m^3 . Las pruebas experimentales en el prototipo, con un entrehierro de 4.8 mm y un diámetro exterior de 260 mm, resultaron en una densidad de par de 7.8 kNm/m^3 . Como era de esperarse, el valor en la densidad de par obtenido en las pruebas experimentales es bajo, debido a la considerable longitud del entrehierro, pero el carácter optimista de los autores precisa que quedó demostrada la viabilidad de esta topología.

Además de investigar el engranaje magnético con flujo axial como dispositivo independiente en [216], Kouhshahi trabajó también en el diseño de una máquina integrada con este tipo de engranaje magnético considerando la topología de enfoque de flujo, [208], [211]. El diseño consiste, principalmente, en un generador para aplicaciones de baja velocidad en el que un engranaje magnético de flujo axial se integra en el estator de flujo radial. En el prototipo construido, el rotor de alta velocidad del engranaje magnético con flujo axial, utiliza la topología de enfoque de flujo, lo cual le permite ser utilizado como elemento común para el estator y el engranaje magnético, reduciendo con ello la cantidad de material magnético en esa parte del diseño. La máquina propuesta aparece en la Figura 3.4a. La publicación aborda esencialmente el diseño del estator y presenta las pruebas experimentales de la configuración que denomina como generador con engranaje magnético integrado y enfoque de flujo axial. La velocidad de entrada es baja, por lo que se puede considerar con un gran potencial para aplicaciones en sistemas de generación eólica. Sin embargo, los autores señalan que el diseño presenta inconvenientes de complejidad mecánica. Mencionan que debido a que los polos del rotor de alta velocidad comparten simultáneamente una disposición radial y axial es complicado mantenerlos en su lugar, por lo que hubieron de fabricarse como segmentos de acero sólido. Además, resulta un desafío tener un entrehierro pequeño por lo que resulta algo complicado construir el generador integrado de flujo axial. El uso de segmentos de acero sólido en los rotores de alta y baja velocidad, es la causa de que el diseño propuesto sólo pueda proyectarse para aplicaciones de muy baja velocidad.

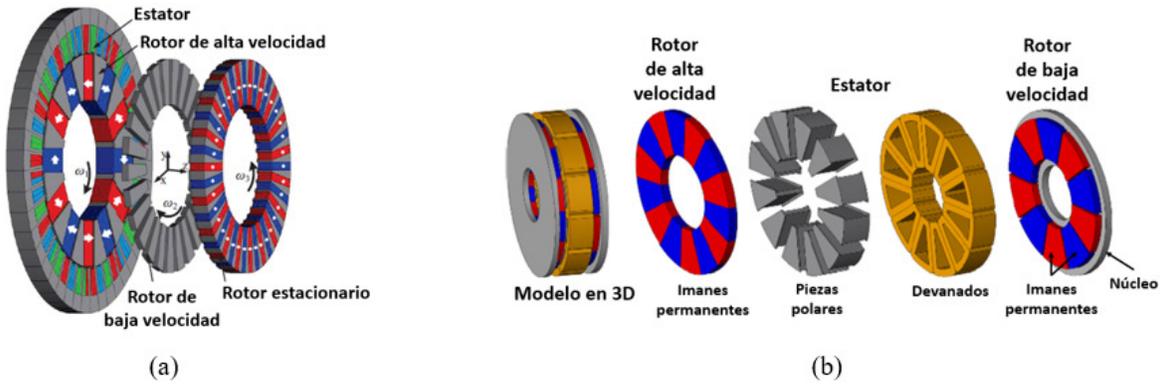


Figura 3.4. Topologías de la máquina integrada con engranaje magnético de flujo axial: (a) Generador integrada con flujo axial y enfoque de flujo propuesto por Kouhshahi [211]. (b) Máquina integrada con flujo axial propuesta por Khatab [230].

En el modelo de Kouhshahi, la densidad de par en la región activa obtenida de simulaciones con software de análisis con elemento finito 3D, fue de 114 Nm/L, mientras que el valor logrado con pruebas experimentales alcanzó 94.4 Nm/L, equivalente a una reducción de 17.2% del valor medido con respecto al valor calculado.

Khatab presentó dos trabajos consecutivos que concluyeron en un importante análisis comparativo entre una nueva máquina de imanes permanentes con engranaje magnético de flujo axial integrado y una máquina de imanes permanentes con flujo axial convencional, [210], [230]. La configuración del diseño propuesto se muestra en la Figura 3.4b. Se realizaron comparaciones del desempeño de ambas máquinas teniendo el mismo volumen, en condiciones sin carga y con carga. El estudio se realizó mediante simulaciones con elemento finito 3D y con pruebas experimentales en prototipos construidos para cada máquina. Las simulaciones mostraron que es posible mejorar la densidad de par cuando se combina una máquina de imanes permanentes con un engranaje magnético optimizado. Los resultados medidos con los prototipos indicaron que la máquina de imanes permanentes con flujo axial convencional presenta un desempeño ligeramente superior en condiciones sin carga, mientras que la máquina de imanes permanentes con engranaje magnético de flujo axial integrado exhibe una densidad de par mayor comparado con la topología convencional. Con este trabajo es posible considerar que la densidad en una máquina de imanes permanentes se puede ver mejorada integrando el efecto de engranaje magnético.

Una variedad de trabajos que siguieron a la publicación de la versión estándar del engranaje magnético con flujo axial, [114], han confirmado la importancia de esta topología en el interés de investigadores, académicos, inventores y organizaciones industriales. Los resultados de estos trabajos apuntalaron el conocimiento de este tipo de engranaje magnético, principalmente en la segunda década de este siglo, explorando su rendimiento con una diversidad de estudios analíticos y experimentales. Se han presentado variantes en el diseño básico estándar, con modificaciones estructurales para obtener sencillas pero sugerentes configuraciones con potencial para aplicaciones industriales, [231] – [241]. Otros estudios han empleado modelos analíticos, aplicando métodos matemáticos y computacionales, para predecir la distribución de campo magnético en el entrehierro [242], [243]; para comprender teóricamente el principio de operación y las características de transmisión de par [244]; o, para analizar el campo magnético cuando se combina con otra topología en una estructura híbrida [245]. De igual manera, se han llevado a cabo importantes investigaciones aplicando métodos para minimizar los efectos del par de detención (*cogging torque*) en el desempeño del engranaje magnético con topología axial [246] – [249]. En el contexto de las máquinas eléctricas con imanes permanentes, este par se identifica asimismo como par de saliencia, oscilante, parásito o de reluctancia, y representa una fuente indeseable de vibración y ruido, lo que lleva a que los diseñadores de máquinas eléctricas siempre se ocupen de reducirlo. En los engranajes magnéticos se considera que es causado por la interacción entre los imanes permanentes en el rotor de alta velocidad y las piezas polares ferromagnéticas del modulador. Para lograr distinguir el concepto, Gerber [250] propone definiciones de *cogging torque* para engranajes magnéticos como para máquinas eléctricas con engranaje magnético integrado. En el diseño de engranajes magnéticos, resulta imprescindible considerar con cuidado este par ya que el valor del denominado factor de par de detención (*cogging factor*) será el que defina la mejor combinación de imanes permanentes y piezas polares ferromagnéticas en el engranaje para obtener el mayor par de transmisión posible.

Investigaciones recientes estudian al engranaje magnético con topología axial, evaluando la dinámica estructural cuando se presentan diferentes condiciones operativas. Se analizan los efectos de la desalineación, principalmente en el rotor de alta velocidad, de interés para aplicaciones en aerogeneradores, [251]; se examinan las características de rendimiento

transitorio bajo diferentes cargas, considerando este estudio como uno de los primeros pasos importantes en el proceso de diseño de un engranaje magnético [252]; y se investiga sobre los efectos de las fuerzas magnéticas en términos de deformación de las piezas polares del modulador, utilizando dos variantes del engranaje magnético con diferente relación de transmisión: de valor fraccionario y de valor entero, observando el rendimiento del engranaje a través de las características del par de transmisión obtenido [253]. Cabe decir que una relación de transmisión o de engranaje con valor fraccionario, ofrece el mejor rendimiento en términos de transferencia de par, conclusión expuesta anteriormente por Frank [173] en su trabajo sobre la exploración de relaciones de transmisión de engranajes magnéticos para aerogeneradores.

Al comenzar la tercera década de este siglo, el engranaje magnético con flujo axial sigue siendo objeto de estudio con el fin de ser utilizado como una opción cada vez más viable para la transmisión de potencia mecánica. Tres nuevas publicaciones presentan revisiones actualizadas, con un análisis minucioso, sobre la evolución de las topologías de las máquinas eléctricas de imanes permanentes, incluyendo las que integran el engranaje magnético con topología axial, para mejorar la densidad de par en sistemas de transmisión. Una buena parte del contenido de estas publicaciones, es posible considerarlo como una ampliación de las dos secciones anteriores en esta tesis. Entre las conclusiones presentadas por Wang [254], sobresale el reconocimiento de la topología de la máquina de imanes permanentes con flujo modulado, que incorpora el efecto de engranaje magnético, como una opción prometedora para lograr una alta densidad de par en diversas aplicaciones, entre las que se cuentan los aerogeneradores. De igual manera, Chen [255] califica a la máquina síncrona de imanes permanentes, entre ellas la que integra el engranaje magnético, como una topología que cumple las condiciones para su aplicación en sistemas de generación eoloeléctrica.

Mientras se publicaba, en el año 2012, el trabajo de Niguchi [206] con la primera propuesta de una máquina integrada con engranaje magnético de flujo axial, aparecía simultáneamente una revisión de Capponi [256] sobre los avances en la tecnología de máquinas de imanes permanentes con topología de flujo axial; esta publicación aún no consideraba la integración del engranaje magnético en las máquinas eléctricas. Ha sido hasta tiempos recientes (2021)

en que una actualización de la revisión de Capponi [256] ha sido publicada por Nishanth [257]; éste, quizá sea el primer trabajo con un estudio del estado del arte sobre el progreso logrado en el análisis y diseño de la topología de las máquinas eléctricas de imanes permanentes con flujo axial. En este trabajo, se considera como una variante emergente y oportunidad de investigación, entre otras topologías, a la configuración de la máquina de imanes permanentes que integra el efecto del engranaje magnético con flujo axial.

Estas publicaciones perfilan su contenido, en general, como una guía sistemática para el modelado, análisis, fabricación, selección y diseño de máquinas de imanes permanentes con flujo modulado, comprendiendo las que tienen el efecto de engranaje magnético, con posibilidad de aplicaciones en aerogeneradores. Además, son presentadas como referencias útiles para detonar, en investigadores e ingenieros, ideas más innovadoras en el área de diseño de máquinas eléctricas con imanes permanentes. Sin embargo, terminan por reconocer que aún existen desafíos técnicos para superar límites de confiabilidad y de par, de manera que se logre un esquema óptimo para la transmisión de potencia mecánica, principalmente en aspectos de modelado y dificultades para la fabricación.

Es razonable decir que una revisión de las topologías de máquinas eléctricas que incluye al engranaje magnético, es una referencia útil que enriquece la evolución de su estudio, como lo exponen las tres publicaciones anteriores. A lo anterior, conviene enfatizar que, específicamente para el diseño de un engranaje magnético, una tarea imprescindible es considerar un estudio de optimización y, por lo menos, un modelo de simulación que permita obtener resultados para evaluar el diseño propuesto, antes y después de la optimización, tal como lo perfila Nishanth [257] para los diseños de máquinas eléctricas. El proceso de optimización consiste, esencialmente, en obtener los mejores valores para aquellos parámetros que tienen alto impacto en el par de salida y densidad de par del engranaje con el fin de maximizar estas cantidades. En particular, para el engranaje magnético con flujo axial, existe una minoría de publicaciones que presenten detalles de su optimización. Estas son recientes y estudian al engranaje magnético con diferentes configuraciones.

El engranaje magnético propuesto por Yin [226] es una topología híbrida con flujo axial y transversal que probablemente fue el primer diseño optimizado que involucra la topología axial. La forma en T de las piezas polares del modulador permite reducir la saturación de los materiales magnéticos y la dispersión de flujo. Con el objetivo de incrementar la densidad de par, cinco parámetros geométricos fueron optimizados utilizando un análisis de barrido paramétrico secuencial. Estos parámetros fueron la longitud axial de los rotores de baja y alta velocidad, y de las piezas polares del modulador, además del espesor de la barra periférica y la amplitud de arco de las piezas polares.

Hu [229] presentó un engranaje magnético con topología axial y arreglos de imanes permanentes con magnetización Halbach que se optimizó empleando el software Maxwell con ayuda del método de elemento finito 3D. En este proceso de optimización, seis parámetros tuvieron un papel importante en la generación del par y densidad de par, relacionados con la longitud axial de los imanes permanentes en los rotores, la geometría de las piezas polares del modulador, el radio exterior y la posición de los imanes permanentes en el rotor de baja velocidad. La optimización permitió obtener una densidad de par con un incremento de 19%.

En otra publicación, Afsari [258] presenta el análisis y diseño optimizado de un engranaje magnético de reluctancia con topología axial. En este trabajo, la optimización paramétrica se realizó en cantidades efectivas durante el proceso de diseño teniendo como función objetivo una máxima densidad de par. Para la optimización, se utilizó un software de elemento finito 3D, ocupando un tiempo de alrededor de 57 horas en una computadora con procesador core i7 y 64 GB de memoria RAM. Siete parámetros fueron los que se optimizaron, siendo éstos la longitud axial de los imanes permanentes, del núcleo del rotor estacionario, de las piezas polares del modulador, de los dientes de reluctancia y del núcleo del rotor de alta velocidad, además de otras dimensiones geométricas de los imanes permanentes y de los dientes de reluctancia. Con el modelo optimizado la densidad de par se incrementó de 9.6 kNm/m^3 a 11.07 kNm/m^3 .

Un engranaje magnético similar al presentado por Sepaseh en [249], fue optimizado por este mismo autor [259] utilizando el algoritmo de optimización conocido como enjambre de partículas (PSO por sus siglas en inglés: *particle swarm optimization*) combinado con un modelo de elemento finito 3D. En este trabajo, el engranaje magnético con topología axial tiene un diseño multiobjetivo, considerando como objetivos de optimización las condiciones de alta densidad de par y bajo par de detención, además de la reducción en el costo de los materiales activos. Se seleccionaron nueve parámetros de diseño para la optimización, y sólo cinco requirieron ser optimizados: el radio exterior del engranaje, la longitud axial del rotor de alta velocidad, el paso polar del rotor de baja velocidad, la amplitud de arco de las piezas polares del modulador y el paso polar interno del rotor de alta velocidad. Los resultados del diseño optimizado [259] se compararon cuantitativamente con los del modelo mejorado, de estructura similar, diseñado en [249]. En el modelo optimizado, la densidad de par se incrementó en un 22.7%; el par de detención disminuyó, manifestándose en un par de rizado (*torque ripple*) más bajo, con una disminución de 32.8% en el rotor de alta velocidad y un 17% en el de baja velocidad. Además, se verificó que el costo de los materiales activos bajó casi a la mitad. En este trabajo, los autores enfatizan que, previamente, los engranajes magnéticos con flujo axial no se habían optimizado considerando simultáneamente la densidad de par y el par de detención.

Para las máquinas eléctricas de imanes permanentes integradas con engranaje magnético, también han sido considerados los métodos de optimización en el proceso de su diseño. Bramerdorfer [260] publica un estudio del estado del arte basado en las técnicas y tendencias de la optimización del diseño de máquinas eléctricas. En esta publicación se exponen las generalidades sobre el problema de la optimización, definiéndolo como un proceso iterativo en lugar de un procedimiento puramente secuencial, formulado mediante objetivos y restricciones. Asimismo, explica detalles de su aplicación con un ejemplo que hace referencia al diseño de una máquina eléctrica.

Khatab [210] presenta el diseño óptimo de una máquina de imanes permanentes con engranaje magnético de flujo axial integrado. Para maximizar la capacidad de transmisión de par de la máquina se realizó una optimización global, basada en un algoritmo genético (GA

por sus siglas en inglés: *genetic algorithm*), utilizando el análisis de elemento finito 2D con el software ANSYS-Maxwell. Luego, con el software de análisis con elemento finito 3D JMAG, se investigó la influencia de los parámetros individuales en el par de salida de la máquina. Los parámetros optimizados y analizados individualmente, cada uno con un intervalo como restricción, fueron aquellos relacionados con la influencia en el par de la máquina, concretamente las dimensiones de los imanes permanentes y la geometría de las ranuras, así como la relación entre los diámetros exterior e interior de la máquina. La conclusión general fue que la máquina propuesta exhibe un bajo par de rizado y que las dimensiones óptimas obtenidas tienen una buena coincidencia entre los métodos de optimización aplicados para dos condiciones, cuando la máquina trabaja como engranaje magnético (condición sin carga) y cuando lo hace como máquina magnéticamente integrada con el engranaje (condición bajo carga).

Yang [261] utiliza el algoritmo genético para obtener el diseño óptimo de una máquina vernier de imanes permanentes alineados con flujo axial, de doble rotor. Recuérdese que, cuando la máquina vernier de imanes permanentes se configura como una máquina síncrona integrada con un engranaje magnético y es utilizada en un sistema de accionamiento directo, la calidad del par promedio y del factor de potencia son consideradas como cantidades clave en el diseño y optimización de la máquina. En la topología axial que se estudia en este trabajo, tales cantidades definen el objetivo del diseño óptimo de la máquina. Para incrementarlas, el criterio se centra en la optimización de la estructura diente-ranura del estator, ya que esa estructura domina el paso del flujo principal y por lo tanto es una parte sensitiva para lograr un alto par y un elevado factor de potencia. Los parámetros optimizados son aquellos que se relacionan con la geometría de la ranura y del diente del estator, y las restricciones son valores para el par promedio y el factor de potencia definidos en el experimento. Con el algoritmo genético se obtuvieron los resultados óptimos de par y factor de potencia, cuyos valores exhibieron un ligero aumento, lo que finalmente se verificó con el software de análisis con elemento finito 2D y 3D.

En un diseño más convencional de la máquina vernier de imanes permanentes con flujo axial, con rotor simple, Wang [262] realizó una investigación sobre la fuerza electromagnética axial

que puede tener un efecto adverso en la máquina. El propósito fue optimizar su diseño para garantizar que su funcionamiento fuera estable. Para ello, se estudió la influencia de diferentes parámetros de diseño en el par de salida y en la fuerza electromagnética axial. En la investigación se analizaron cuatro parámetros de diseño, que resultaron sensibles a la fuerza electromagnética axial, relacionados con las geometrías de los dientes del estator y de los imanes permanentes del rotor. Para llevar a cabo la optimización, las variables objetivo fueron mantener estable el par de salida, así como reducir el valor y la densidad de fuerza máxima de la fuerza electromagnética axial de todo el rotor, tanto como fuera posible. Durante el proceso aplicado para optimizar los parámetros de diseño, se construyó un modelo con elemento finito 2D y se utilizaron herramientas matemáticas para predecir el valor de las funciones objetivo y aplicar una operación de muestreo en los parámetros de diseño; después, se utilizó el algoritmo genético para buscar el resultado optimizado requerido. Los resultados fueron satisfactorios conforme a los objetivos planteados, validando los resultados de la simulación con el análisis de elemento finito 3D. Los autores destacan en sus conclusiones que el proceso de optimización y los parámetros de diseño adecuados, pueden usarse como una referencia para suprimir de manera efectiva la fuerza electromagnética axial en una máquina de imanes permanentes con flujo axial.

Los estudios sobre el engranaje magnético continúan. Las revisiones de la literatura dan evidencia de que la topología con flujo modulado e imanes permanentes axialmente magnetizados, sigue aumentando el interés de investigadores y académicos. En particular, el engranaje magnético con flujo axial exhibe ventajas únicas, como la creación de entrehierros uniformes y ajustables, una estructura mecánicamente simple, bajo volumen, alta relación par/peso debido a la baja longitud axial y un ensamble sencillo, con potencial para aplicaciones en sistemas de transmisión de potencia mecánica [227]; además, si la relación entre el diámetro exterior y la longitud axial es grande, aumentará su capacidad para lograr una alta densidad de par si se lo compara con la topología radial [252]. En cuanto a la arquitectura estándar, original, y la optimización de su diseño, el estudio del engranaje magnético con flujo axial aún sigue en desarrollo, principalmente para mejorar la densidad de par [260]. Se puede verificar que no existen publicaciones concretas sobre la optimización del engranaje magnético con flujo axial como elemento del sistema motriz en un

accionamiento indirecto magnético para un aerogenerador. Se ha optimizado de manera individual aplicando el método PSO [259], pero aún no con el GA.

Estos detalles detonan una oportunidad de investigación para profundizar en el conocimiento de los engranajes magnéticos, un trabajo del que esta tesis se ocupa. Y este trabajo, sin duda, puede considerarse relevante cuando aún no se han consolidado experiencias previas en el tema. En este sentido, algunas publicaciones recientes [255] – [257] subrayan la importancia de continuar investigando con la topología axial, capitalizando los avances y contribuciones de otros investigadores, para generar experiencias propias en la inteligencia de esta tecnología. En las secciones siguientes se examinan detalles del engranaje magnético con flujo axial, que incluyen el modelado y la simulación de un diseño para la optimización de características que puedan satisfacer una posible aplicación en el sistema de transmisión de potencia mecánica para un aerogenerador.

3.2 Estructura y Principios de Operación

La estructura básica del engranaje magnético con flujo axial se muestra en la Figura 2.22b, y en la Figura 3.5 se pueden observar los detalles de esta topología con sus principales partes desacopladas. Básicamente se compone de dos rotores, con núcleos de material ferromagnético, sobre los cuales se colocan arreglos de imanes permanentes de tierras raras con alta energía para producir los campos magnéticos. Los imanes están montados superficialmente en las caras internas de los rotores, alternándose en un polo norte y un polo sur; tienen magnetización axial y proveen, con sus campos magnéticos, la excitación en el engranaje. Cada imán es un polo magnético en este sistema. Un rotor opera a baja velocidad con p_l pares de polos. El otro rotor opera a alta velocidad con p_h pares de polos. Con el propósito de formar pasos magnéticos adecuados, entre los dos rotores, y separado de cada uno de ellos por un entrehierro (espacio de aire), se inserta un anillo compuesto de n_s segmentos o piezas polares de material ferromagnético laminado, en hojas delgadas simétricamente distribuidas, que se encargan de realizar la modulación de los campos magnéticos actuando en los entrehierros.

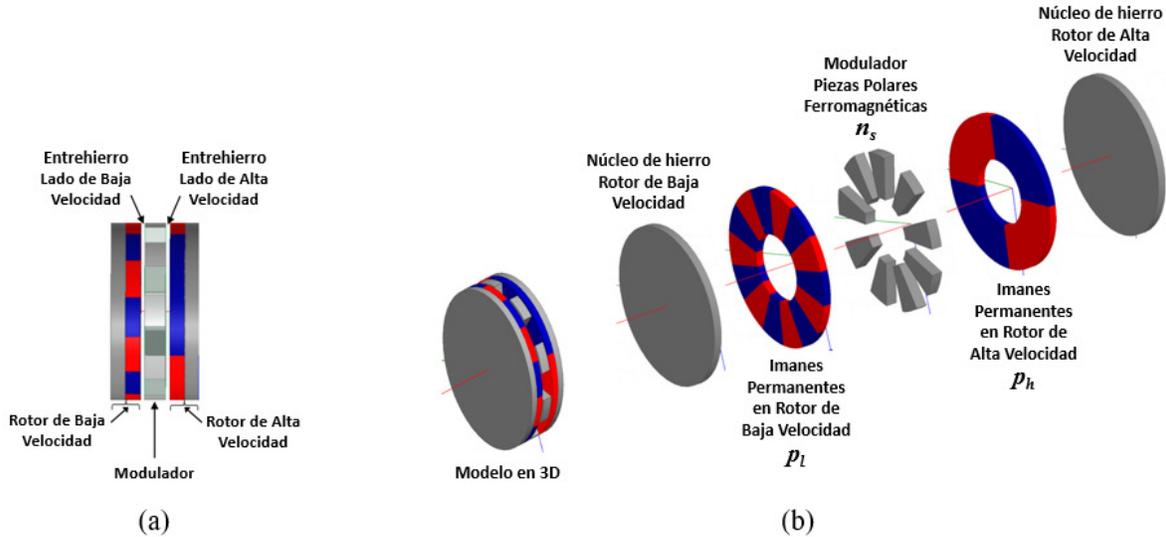


Figura 3.5. Estructura del engranaje magnético con topología axial: (a) Vista general de sus componentes principales. (b) Vista desacoplada y seccionada.

Entre las piezas polares, existen ranuras o espacios que se rellenan generalmente de material epóxico, con el fin de procurar una resistencia estructural que favorezca una alta transmisión de par. Al incorporar un modulador de piezas ferromagnéticas en su estructura, el engranaje magnético con flujo axial se clasifica en la categoría de engranajes magnéticos con modulación de campo. La clave de esta tecnología, descansa precisamente en la existencia de las piezas polares, las cuales, al llevar a cabo el proceso de modulación, permiten que ocurra la acción de engranaje para lograr la transferencia de par a través de los entrehierros. Además, el diseño axial le permite tener un máximo uso de los imanes permanentes con capacidad para lograr alta densidad de flujo en una estructura relativamente simple.

La operación del engranaje magnético con topología axial se basa en el principio de la modulación del flujo magnético. Mediante la Figura 3.6 es posible entender el fundamento de este principio. De acuerdo con la teoría de máquinas eléctricas, cuando dos estructuras de naturaleza giratoria, con fuentes de excitación magnética, se encuentran próximas, con sus campos magnéticos frente a frente, se producirá una transmisión de par entre ambas bajo la condición de que el número de polos de una sea igual al número de polos de la otra. Este es el caso que se observa en la Figura 3.6b; el esquema ilustra un acoplador magnético que funciona utilizando el concepto de que polos iguales se repelen y polos opuestos se atraen.

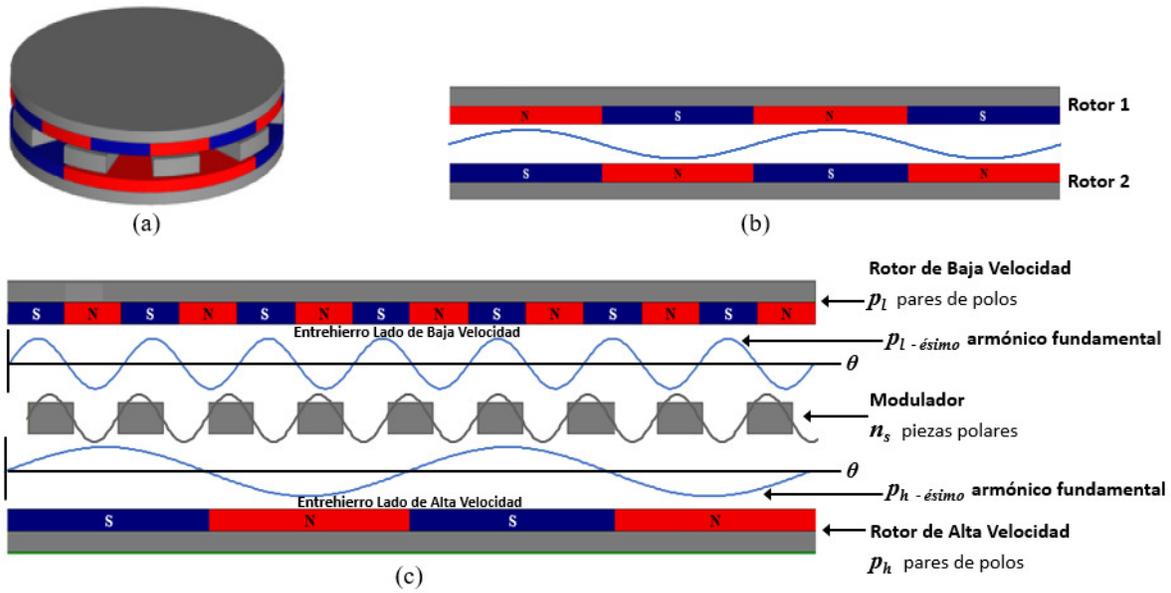


Figura 3.6. Principio de operación del engranaje magnético con topología axial: (a) Modelo 3D. (b) Acoplador magnético. (c) Modelo 2D - mecanismo de modulación de flujo magnético.

Dos rotores con núcleo de material ferromagnético e igual número de imanes permanentes en montaje superficial en cada uno de ellos forman el *acoplador magnético*. Cuando un rotor gira, la atracción y repulsión de los imanes permite la transmisión de par hacia el otro rotor. Esta fue una de las topologías básicas de arreglos magnéticos concéntricos para la transmisión de par. Exhiben una alta densidad de par, pero no cambian la velocidad de salida con respecto a la de entrada (tienen una relación de transmisión de 1:1), a diferencia del engranaje magnético que, además de transmitir par, sí permite la variación de velocidad. Para que esto suceda, el engranaje magnético debe tener un número diferente de polos en sus rotores y, por lo tanto, se requiere un determinado número de polos de modulación entre ellos para que se lleve a cabo la transmisión.

La Figura 3.6c muestra un engranaje magnético en una representación lineal con un modelo en 2D. Los imanes permanentes axialmente magnetizados que producen los campos magnéticos, están indicados por sus polos N y S. Típicamente, el número de pares de polos en el rotor de baja velocidad, p_l , es mayor que el número de pares de polos en el rotor de alta velocidad, p_h . Para el caso mostrado, $p_l = 7$ y $p_h = 2$. Con el propósito de entender la forma en la que interactúan los campos magnéticos en el entrehierro, de manera que se logre una

transmisión de par cuando los rotores giran a velocidades diferentes, es preciso considerar un primer escenario sin la presencia del modulador.

Según la teoría de modulación de campo en el entrehierro para máquinas eléctricas [263], [264], cuando un rotor con p_r pares de polos gira a una velocidad rotacional ω_r , sus imanes permanentes producirán a lo largo del entrehierro un campo magnético representado por una fuerza magnetomotriz (FMM), F_{r0} , que puede asumirse como una onda sinusoidal cuya componente fundamental es de orden p_r , expresándose como:

$$F_{r0} = F_{rm} \cos[p_r(\theta - \omega_r t)] \quad (3.1)$$

donde F_{rm} es la magnitud de F_{r0} y θ es el ángulo de posición mecánico. El subíndice r señala la velocidad rotacional correspondiente del rotor de imanes permanentes, siendo l si el rotor es de baja velocidad, o h para el rotor de alta velocidad. Dado que los imanes permanentes tienen por lo general una geometría curva tipo sector, la magnetización de éstos dará lugar a que la FMM exhiba algún contenido armónico espacial. En ausencia del modulador, al establecerse el giro de un rotor, el otro rotor se mantendrá inmóvil, y viceversa, ya que el número de polos magnéticos en uno es diferente al del otro y no coinciden. En estas condiciones, no existe transmisión de par.

En un segundo escenario, cuando se insertan las n_s piezas polares del modulador y éstas se mantienen estacionarias (en este análisis se considera que el modulador es fijo), su aparición introduce una permeancia que altera la FMM producida por los imanes permanentes de cada rotor. La permeancia alterna en un valor alto en presencia de piezas polares, y en un valor bajo para cada ranura o espacio que separa una de otra. Puede representarse como una onda cuadrada, pero por simplicidad es común que se interprete como una distribución sinusoidal, con un periodo igual al número de piezas polares n_s , como se muestra en la Figura 3.6(c). Por lo tanto, se puede expresar como:

$$P_{pp} = P_{prom} + P_m \cos(n_s \theta) \quad (3.2)$$

siendo P_{prom} y P_m el valor promedio y la magnitud, respectivamente, de P_{pp} y n_s el número de piezas polares ferromagnéticas.

Cuando los campos magnéticos generados por los imanes permanentes en cada rotor atraviesan las piezas polares del modulador, ocurre el efecto de *modulación de campo magnético*, dada la excelente conductividad magnética de las piezas polares ferromagnéticas. En síntesis, este efecto consiste en que los campos magnéticos producidos por los rotores del engranaje magnético, al pasar por las piezas polares se convierten en campos modulados creando armónicos espaciales en los entrehierros. El campo modulado de un rotor interactúa con el campo magnético en el entrehierro del otro rotor para transmitir par.

Considérese una aplicación para un aerogenerador en el que el primo motor mueve al rotor de baja velocidad. Los p_l pares de polos magnéticos generados por los imanes permanentes de este rotor producen, en su entrehierro adyacente de baja velocidad, un campo magnético con un armónico dominante de orden $p_l = 7$ para el caso que se estudia. Este campo es modulado por las n_s piezas polares ferromagnéticas (para el caso actual $n_s = 9$) creando un campo magnético en el entrehierro de alta velocidad con armónico dominante de orden $p_h = 2$, el cual gira en dirección opuesta y a una velocidad diferente a la que gira el rotor que lo ocasiona. Esto sugiere que el componente armónico mayor del campo modulado es asíncrono y su número de pares de polos es $n_s - p_l$, como se demuestra posteriormente. El campo modulado interactúa con el armónico dominante de orden p_h producido solamente por los imanes permanentes del rotor de alta velocidad. Conforme el componente armónico del campo magnético del rotor de alta velocidad coincide con el componente armónico, de igual orden, creado por el campo modulado del rotor de baja velocidad, entonces se realiza el *efecto de engranaje magnético* dando lugar a una transmisión de par entre ambos rotores, similar a la que se realiza en una transmisión mecánica, pero ahora sin contacto físico. De igual manera, el campo magnético excitado por los p_h pares de polos del rotor de alta velocidad, es modulado por las piezas polares convirtiéndose en un campo magnético con p_l pares de polos que interactúa con el campo magnético de p_l pares de polos creado sólo por los imanes permanentes del rotor de baja velocidad [259]. Los campos magnéticos modulados se forman con abundantes componentes armónicos, siendo que sólo un armónico de trabajo, el fundamental o predominante, es el que desarrolla un par estable. Esto se ve reflejado en los pulsos de las formas de onda resultantes de densidad de flujo axial, deformadas por el efecto de la modulación en ambos rotores de imanes permanentes, que se muestran en la Figura 3.7.



Figura 3.7. Efectos de la modulación. Formas de onda de la densidad de flujo axial con respecto a la posición angular mecánica, sin piezas polares (no moduladas) y con piezas polares (moduladas) debidas a ambos rotores de imanes permanentes: (a) En el entrehierro de baja velocidad con armónico fundamental de orden $p_l = 7$. (b) En el entrehierro de alta velocidad con armónico fundamental de orden $p_h = 2$.

Al ser una propiedad del material ferromagnético y de la geometría de las piezas polares del modulador, la permeancia establece una relación lineal entre el flujo magnético y las FMM. Con el objeto de demostrar en términos simples la naturaleza matemática del fenómeno de modulación de flujo, la saturación de las piezas polares se ignora y, por lo tanto, se consideran perfectas, con una permeabilidad infinita. Luego, el efecto de distorsión del campo magnético es igual en ambos entrehierros, sin tomar en cuenta a la componente tangencial en éstos. Esto conduce a que la distribución axial de densidad de flujo magnético en el entrehierro, B , se aproxime mediante el producto de la FMM de los imanes permanentes y la permeancia P_{pp} de las piezas polares ferromagnéticas [104]. De esta forma la distribución de densidad de flujo magnético axial modulado, producido por cualquiera de los rotores de imanes permanentes, se determina como:

$$B_r = F_{r0}P_{pp} \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.1) y (3.2) en (3.3), y haciendo los arreglos correspondientes, se obtiene:

$$\begin{aligned} B_r &= F_{r0}P_{pp} \\ &= F_{rm}P_{prom} \cos[p_r(\theta - \omega_r t)] \\ &\quad + \frac{1}{2}F_{rm}P_m \cos\left[(n_s + p_r)\left(\theta - \frac{p_r}{n_s + p_r}\omega_r t\right)\right] \\ &\quad + \frac{1}{2}F_{rm}P_m \cos\left[(n_s - p_r)\left(\theta - \frac{-p_r}{n_s - p_r}\omega_r t\right)\right] \end{aligned} \quad (3.4)$$

En (3.4) puede observarse que después del proceso de modulación, además de la componente fundamental p_r del campo magnético producido por el rotor correspondiente, que gira a una velocidad rotacional mecánica ω_r , en el entrehierro adyacente existen dos componentes moduladas representadas por $(n_s \pm p_r)$. Esta expresión define la combinación adecuada de (p_l, n_s, p_h) e impone una condición que debe ser satisfecha para que se establezca en el engranaje magnético la relación de transmisión o de engranaje, G_R . Si esta relación representa a la acción de la multiplicadora en un aerogenerador, entonces ha de calcularse entre el rotor de baja velocidad (entrada) y el rotor de alta velocidad (salida), como se señaló en la ecuación (2.3). Las amplitudes de las componentes moduladas, según la expresión mostrada, $(n_s + p_r)$ y $(n_s - p_r)$, son las mismas, pero en la realidad $(n_s - p_r)$ es mayor ya que las FMM y la P_{pp} son más aproximadas a una onda cuadrada y no a una senoidal como se ha asumido, [207]. Por tal motivo, el número de pares de polos en el rotor de alta velocidad puede determinarse como $p_h = n_s - p_l$. Si esta condición se satisface, entonces el rotor de alta velocidad se acopla al campo magnético modulado de $(n_s - p_l)$ orden del rotor de baja velocidad, el cual se ha sincronizado al campo magnético del mismo orden en el entrehierro de alta velocidad, [129]. Con ello, se demuestra que la combinación de (p_l, n_s, p_h) para que se lleve a cabo la modulación de los flujos magnéticos, está gobernada por:

$$n_s = p_h + p_l \quad (3.5)$$

En (3.4) se observa también que las velocidades rotacionales de las componentes moduladas, $(n_s + p_r)$ y $(n_s - p_r)$, son $p_r \omega_r / (n_s + p_r)$ y $-p_r \omega_r / (n_s - p_r)$, respectivamente. Si el rotor representado como p_r es el de baja velocidad, p_l , y dado que $p_h = n_s - p_l$, la velocidad del rotor de alta velocidad se determina como:

$$\omega_h = -\frac{p_l \omega_l}{n_s - p_l} = -\frac{p_l}{p_h} \omega_l \quad (3.6)$$

Esta ecuación es congruente con la ecuación de Willis para engranajes mecánicos, válida también para engranajes magnéticos [102]. De (3.6), se deduce que la relación de transmisión o de engranaje resultante, G_R , es:

$$G_R = \frac{\omega_h}{\omega_l} = -\frac{p_l}{p_h} \quad (3.7)$$

El signo negativo en (3.7) indica que los dos rotores giran en direcciones opuestas.

Debido a que $p_l > p_h$, se presume que el campo magnético del rotor de baja velocidad puede exhibir un mayor par a una velocidad reducida, en comparación con el campo magnético del rotor de alta velocidad. Por lo tanto, queda claro que, en un tren de engranaje multiplicador, una potencia mecánica con par alto y velocidad baja, será transmitida hacia una carga, con una potencia de par bajo y velocidad alta, tal como lo requiere un aerogenerador. Para efectos demostrativos se puede estimar que la energía se conserva durante la transmisión de movimiento en el engranaje magnético, y por lo tanto no se consideran las pérdidas. Si es así, la potencia de salida en el rotor de alta velocidad, dada por $P_{sal} = T_h \omega_h$, es igual a la potencia de entrada en el rotor de baja velocidad, $P_{ent} = T_l \omega_l$, es decir:

$$T_h \omega_h = T_l \omega_l \quad (3.8)$$

Entonces, la relación de transmisión o de engranaje en (3.7) toma la siguiente forma:

$$G_R = \frac{T_l}{T_h} = \frac{\omega_h}{\omega_l} = - \frac{p_l}{p_h} \quad (3.9)$$

De las ecuaciones (3.5) y (3.9) se deduce que la relación de transmisión es una función del número de pares de polos en los rotores de baja y alta velocidad, y del número de piezas polares en el modulador, y que además la relación de velocidades es inversamente proporcional a la relación de pares.

El efecto de modulación de campo puede orientarse hacia la óptica de lo que sucede con el flujo magnético en los entrehierros, mientras que el efecto de engranaje magnético, creado también en estos pequeños espacios de aire, puede centrarse en el punto de vista de transmisión de par mecánico [265]. Para lograr la mayor densidad de par en el desempeño del engranaje magnético, es indispensable satisfacer la relación establecida en (3.5). Esta ecuación precisa que, para un G_R dado, existe un número relativamente alto de combinaciones factibles de (p_l, n_s, p_h) y, por lo tanto, la elección de una combinación adecuada de estos parámetros influye notablemente en la capacidad máxima para la transmisión de par, [104]. Sobre esta circunstancia, detalles importantes deben tomarse en cuenta en el diseño del engranaje magnético, principalmente en cuanto a la uniformidad del par transmitido. Aun en condiciones de no carga, existe una atracción magnética entre los

imanes permanentes montados en los rotores y las piezas polares ferromagnéticas estacionarias del modulador. La interacción entre los campos magnéticos en ambos rotores y la permeancia no uniforme en los entrehierros debido a la geometría de las piezas polares, da lugar a que los imanes vean una reluctancia distinta al cambiar su posición relativa; cuando sus polos magnéticos intentan alinearse con las piezas polares tratando constantemente de ubicar una posición estable de mínima reluctancia (mínima longitud del entrehierro), se produce una fuerza pulsante alterna, que se opone a una rotación suave, intentando mantener la alineación entre los imanes y las piezas polares. Esta fuerza pulsante se identifica como *par de detención (cogging torque)* y es la causa de que un contenido armónico ondulante, conocido como *par de rizado (torque ripple)*, se añada al par de salida del engranaje magnético. Gráficamente se observan rizados sinusoidales (fluctuaciones periódicas) en el par generado. Las consecuencias del par pulsante se presentan regularmente como vibraciones mecánicas, ruido acústico y oscilaciones en la velocidad; no contribuye a la producción de par útil y ocasiona efectos adversos en el rendimiento del engranaje magnético. Sin embargo, el par de detención es una condición inherente a la operación de las máquinas con imanes permanentes. Numerosos métodos han sido propuestos para minimizarlo. Entre los más destacados se incluye la optimización del número de imanes permanentes y piezas polares, o la modificación en sus geometrías [246] – [250]. El análisis y la búsqueda de técnicas para reducir el par de detención, sigue siendo una parte esencial en la agenda de investigadores y académicos que estudian la transmisión de par por medios magnéticos [266] – [277].

El par de detención depende esencialmente de la forma en que los polos magnéticos en los rotores interactúan con las piezas polares en el modulador. Para estimar la severidad que tiene este par en el rendimiento del engranaje magnético, Zhu, [278], formuló un *factor de par de detención (cogging factor)*, C_T , definido como:

$$C_T = \frac{2p_r n_s}{N_c(2p_r, n_s)} \quad (3.10)$$

donde N_c representa el orden fundamental de la forma de onda del par de detención y expresa el mínimo común múltiplo (MCM) entre el número de polos del rotor $2p_r$ (sea de baja velocidad, $2p_l$, o de alta velocidad, $2p_h$) y el número de piezas polares ferromagnéticas n_s .

El factor C_T es un recurso valioso que puede utilizarse como una guía, en el diseño de engranajes magnéticos, para identificar de manera diligente las combinaciones ideales de (n_s, p_l, p_h) en términos del par de detención, y aunque no existe una base formal para relacionarlo con la amplitud de dicho par, se encontró que cuanto menor sea este factor, menor será el par de detención y menores las ondulaciones en el par de salida, [278]. De acuerdo con (3.10) cuanto más grande sea N_C y más pequeño sea p_r o n_s , se garantizará un factor C_T menor, por lo que es preferible tener relaciones de transmisión, G_R , con valores fraccionarios. Luego, para el diseño de un engranaje magnético, el menor C_T estará asociado con G_R fraccionarios. Esta inferencia es consistente con el resultado del trabajo expuesto en [173]. Se puede entender que, para tener un valor mínimo de par de detención y, con ello, un suavizado en el par de rizado, es necesario un factor C_T igual, o muy cercano, a la unidad ($C_T \approx 1$), [174]. Valores enteros de G_R resultarán en grandes cantidades de par de detención y por consiguiente en altas magnitudes de par de rizado.

El orden del armónico fundamental en la densidad de flujo asociada a los rotores de imanes permanentes, juega un rol importante en la identificación de la severidad del par de detención. Mediante estudios de simulación con el método de elemento finito 3D, se ha verificado que, cuanto menor es el orden (menor número de pares de polos), mayor es la magnitud del armónico fundamental que resulta. Esto implica que el par de detención sea más evidente en el rotor de alta velocidad en contraste con el rotor de baja velocidad [247]. Tal situación tendría un impacto no deseado en los sistemas de generación eólica, ya que los efectos del par de detención suelen amplificarse en condiciones de arranque. En los sistemas eólicos las cajas de engranajes se utilizan como multiplicadoras, siendo un medio para elevar la velocidad y reducir el par que provienen del rotor del aerogenerador. En condiciones de arranque el par que se desarrolla es bajo y por lo tanto el arranque es lento. En el engranaje magnético los rotores se moverán de forma pausada, pero no lo suficientemente rápido como para que las oscilaciones del par de detención que se genera sean insignificantes. Se deduce pues que, un par de detención alto en el rotor de alta velocidad del engranaje magnético se traducirá en una falla general durante el periodo de arranque [250]; en el más significativo de los casos, si el par aerodinámico del sistema no supera los efectos magnetostáticos del par de detención, el aerogenerador, simplemente, no arrancará.

3.3 Técnicas de Modelado y Análisis

La implementación de una metodología para el diseño óptimo de un engranaje magnético, requiere la selección de una técnica de modelado que permita representar aspectos específicos de interés, así como de un enfoque de análisis para evaluar y predecir su rendimiento. Existen varias herramientas de modelado para simular el comportamiento electromagnético de máquinas eléctricas. Sus diferencias básicas radican en la precisión, velocidad de cómputo y complejidad del método, además de las características particulares de la máquina que se investiga. Estas herramientas hacen igualmente posible representar la física fundamental del engranaje magnético para su estudio. El objetivo primordial es calcular y analizar la distribución de campo magnético en los entrehierros y del par magnético transmitido, como una función de las fuentes de excitación magnética en una determinada geometría [279]. Las técnicas de modelado más utilizadas en máquinas con imanes permanentes, se pueden clasificar en tres grupos básicos de acuerdo con sus métodos de cálculo, según se ilustra en la Figura 3.8 [279]. Destacan las *técnicas analíticas*, las *técnicas de modelado con parámetros concentrados* y las *técnicas numéricas*.

Las *técnicas analíticas* usualmente describen el campo magnético mediante una formulación de expresiones analíticas como una función de los parámetros físicos más relevantes que definen la geometría de la máquina que se estudia. El modelado analítico básicamente inicia con el planteamiento de un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales que describen el potencial escalar magnético, [280] – [284], y el potencial vectorial magnético, [163], [242], [285] – [288], (ecuaciones de Laplace y de Poisson), en función de las fuentes magnéticas representadas por los imanes permanentes. Con las técnicas analíticas estas ecuaciones se pueden resolver en un tiempo de cómputo muy corto, pero sacrifican precisión con respecto a otras técnicas. Los modelos analíticos son útiles para la solución de las ecuaciones de Maxwell, utilizadas para cálculo de las características estáticas y dinámicas del campo electromagnético. Por precisión, las técnicas analíticas son una buena opción en etapas tempranas de la optimización del diseño; por rapidez de solución de las ecuaciones, estas técnicas ofrecen una apreciable ventaja si se desea implementar un proceso de optimización complejo, puesto que requiere que el modelo sea ejecutado en repetidas ocasiones.

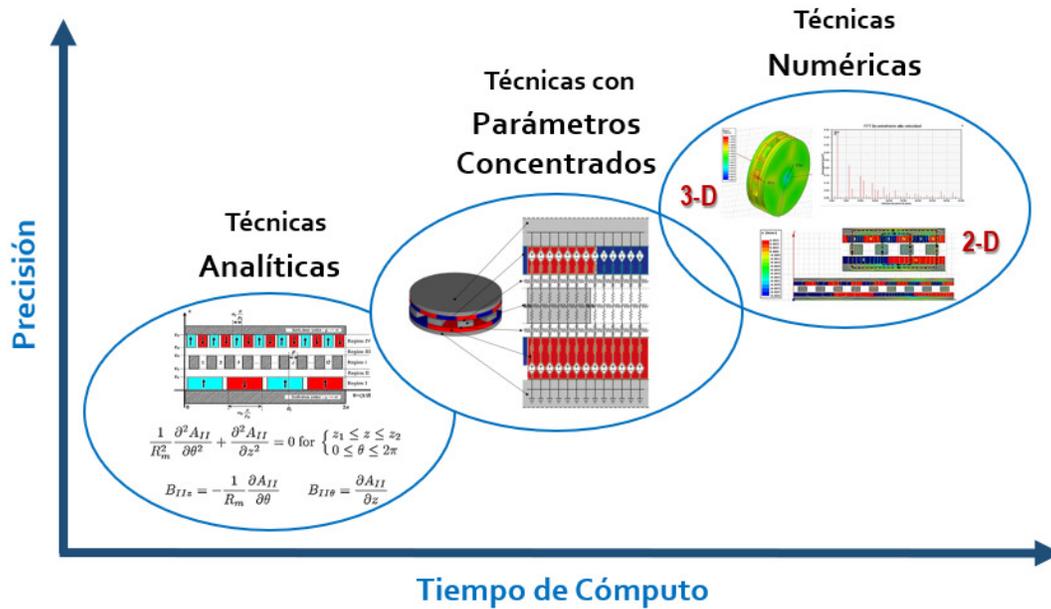


Figura 3.8. Técnicas de modelado en máquinas eléctricas para el cálculo de campo electromagnético [279].

En el enfoque analítico, regularmente se presentan situaciones que requieren la adopción de una serie de suposiciones y simplificaciones para reducir la complejidad del modelo; esto se aplica cuando se tienen geometrías complicadas que dificultan el diseño y la optimización del engranaje magnético. Una de las suposiciones más recurrentes es considerar ideales a los materiales ferromagnéticos, asumiendo una permeabilidad infinita en los núcleos de los rotores y piezas polares del modulador del engranaje magnético. Con un modelo simplificado, basado en suposiciones razonablemente propuestas, las ecuaciones que lo representan serán simples y hasta cierto punto directas, lo que hará que las técnicas analíticas resulten fáciles de implementar, pero útiles solamente para cálculos aproximados. Las limitaciones implícitas en el modelo simplificado implican la dificultad de considerar, por ejemplo, la saturación, factores de no linealidad, efectos de dispersión de flujo y algunas propiedades de los materiales en partes intrincadas según la topología del engranaje magnético que se modela. Para superar tales limitaciones, se opta por construir métodos híbridos, acoplando la solución analítica con modelos de parámetros concentrados o con cálculos que emplean el método de elemento finito, a fin de obtener un modelo más detallado, con una reducción significativa del esfuerzo computacional [289] – [292]. En términos generales, se puede concluir que las técnicas analíticas ofrecen muy buen compromiso entre simplicidad y rapidez.

Las *técnicas de modelado con parámetros concentrados* ofrecen precisión y rapidez de cálculo bastante aceptables. Aun cuando este concepto de modelado ha existido desde hace varias décadas, [293], en la actualidad, estas técnicas suelen ser cada vez más empleadas como herramientas prácticas de análisis y diseño de máquinas eléctricas, principalmente por considerar las características del material ferromagnético (mediante el ajuste de curvas) y asociarlas con el comportamiento de la máquina en un modelo relativamente sencillo. Su aplicación se basa en una simplificación de la geometría de la máquina que se desea modelar, la cual suele representarse mediante una *red de reluctancias* (RN: *Reluctance Network*) discretas, con parámetros concentrados, para formar un *circuito equivalente magnético* (MEC: *Magnetic Equivalent Circuit*). Estas técnicas pueden considerarse como uno de los métodos analíticos más básicos que no utilizan un planteamiento directo con ecuaciones diferenciales parciales para el modelado de una máquina eléctrica. En las técnicas analíticas se elige una solución directa para las ecuaciones de Laplace y de Poisson, mientras que en las técnicas de modelado con parámetros concentrados se construye un circuito equivalente magnético, aplicando la ley de Ampère, con el que es posible calcular las características del campo magnético siguiendo la teoría de circuitos eléctricos. Para construir el circuito equivalente magnético, la geometría de cada componente de la máquina se divide formando una red de elementos de reluctancia (o permeancia, según el modo de modelado) representados por “tubos de flujo magnético” excitados con fuentes de fuerza magnetomotriz (FMM). El análisis de esta red se lleva a cabo utilizando las leyes de Kirchhoff, para circuitos magnéticos, en los nodos o mallas que conforman la red. En el análisis por nodos, la ley de corrientes de Kirchhoff se aplica a cada nodo para crear un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, en las que el flujo de los imanes permanentes representa la entrada y los potenciales magnéticos de nodo representan la salida. En el análisis por mallas, la ley de voltajes de Kirchhoff se aplica a cada malla creando un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales, en las que las fuerzas magnetomotrices de los imanes permanentes (voltajes de lazo) representan las entradas y los flujos magnéticos de malla representan la salida. Luego, el sistema de ecuaciones correspondiente se resuelve para obtener los flujos de cada rama o de cada elemento de reluctancia. En cada uno de estos elementos, la densidad de flujo de determina con la ley de Hopkinson, conforme a la ecuación 3.3, siendo ésta el equivalente magnético de la ley de Ohm de los circuitos eléctricos [294].

No obstante, el concepto de circuito magnético no es tan simple como el de circuito eléctrico, principalmente por la naturaleza de sus elementos. En un circuito eléctrico, la circulación de corriente eléctrica se limita a rutas bien definidas; en un circuito magnético el flujo magnético traza rutas según las características del material. Por lo tanto, previo a la elaboración de un circuito equivalente magnético, es muy conveniente tener un buen conocimiento de la distribución de flujo magnético en la máquina con el objeto de construir una red de reluctancias que considere detalles geométricos, sin pérdida de generalidad, para una adecuada configuración del modelo. Para lograr mayor precisión, la red de reluctancias normalmente se discretiza, tal como se hace en el método de elemento finito con las técnicas numéricas, principalmente si se trata de una geometría compleja. Pero, en el circuito equivalente magnético el número de elementos de reluctancia discretizados es mucho menor.

El modelado con parámetros concentrados empleando el circuito equivalente magnético basado en el análisis de redes de reluctancias, ha sido moderadamente utilizado para el estudio de engranajes magnéticos, con una manifiesta preferencia por la topología coaxial con magnetización radial [295] – [307]. Por lo regular, el modelado se realiza mediante el circuito equivalente magnético, aplicando el método de elemento finito para validar sus cantidades de salida. Además de calcular y validar la densidad de flujo magnético, una de las cantidades que se analizan es el par generado en ambos rotores del engranaje magnético, determinado como el producto del flujo magnético y la FMM producida por cada elemento asociado con los imanes permanentes. Las reluctancias, representando a las partes del material ferromagnético, se calculan como elementos dependientes del flujo definido mediante coeficientes obtenidos del ajuste de la curva B-H del material. Los cálculos de reluctancias y flujos, se realizan, para el caso del engranaje con topología axial, en todos los elementos tanto en la dirección axial como en la circunferencial, para un modelado en 2D, además de la dirección radial si se trata de un modelado en 3D. Dado que la precisión en estas técnicas depende del número de elementos (FMM y reluctancias) considerados para representar las partes físicas en engranaje magnético, un esquema de discretización adecuado permitirá establecer el uso del circuito equivalente magnético con redes de reluctancias (MEC-RN), como un diseño inicial que podrá ser culminado con un proceso de optimización, logrando de esta manera un modelo bastante útil del engranaje magnético.

Las *técnicas numéricas* usualmente se identifican con el método de elemento finito (FEM: *Finite Element Method*), caracterizado por un alto nivel de modelado mediante soluciones aproximadas de las ecuaciones diferenciales parciales en un modelo. Si bien, el modelado analítico, técnica en la que se puede incluir el modelado con MEC-RN que ofrece simplicidad y precisión aceptables, permite una comprensión básica de la máquina que se modela, así como de algunos efectos individuales de su estructura, las técnicas numéricas posibilitan los medios para investigar en una forma integral el comportamiento de la máquina, incluyendo todos los efectos físicos de sus componentes de manera simultánea [279]. Por lo general, los modelos analíticos suelen ser apropiados para las etapas preliminares en el proceso de diseño, mientras que las técnicas numéricas se utilizan para la verificación final del diseño [308].

El FEM, como herramienta numérica, permite calcular el campo magnético en diferentes puntos de la geometría de una máquina reflejando el estado de energía en diferentes partes de su estructura. La geometría se discretiza en elementos pequeños formando una malla, tan pequeños como para considerar que el potencial y el campo dentro de ellos se pueden aproximar mediante polinomios de primero o segundo orden. Por lo regular, se requerirá de un conocimiento previo de la variación del campo magnético para realizar un mallado adecuado. Una geometría que esté bien delimitada, sobre todo en el contorno de materiales magnéticos, necesitará un número finito de elementos en la discretización. Pero en las partes donde no hay hierro y no existen fronteras bien definidas, será necesaria un mallado con un número considerablemente alto de elementos para la discretización. De igual forma para analizar detalles donde hay variaciones importantes del campo magnético en los entrehierros, será requerida una malla con una gran cantidad de elementos, ya que es en ese espacio de aire donde se lleva a cabo la transmisión de par, y una malla apropiada en ese lugar debe ser densa. En este caso, una malla con alta densidad dará lugar resultados más preciso, pero si es demasiado gruesa el proceso de cálculo podría resultar en inestabilidad numérica, además de un elevado tiempo de cómputo que podría ser un factor dominante en el proceso de solución.

Al ser un método de alta precisión y lo suficientemente versátil para una amplia variedad de aplicaciones en ingeniería eléctrica, el FEM suele ser de uso común para el análisis de fenómenos electromagnéticos. Con este método, se pueden modelar un gran número de

geometrías complejas y considerar detalles que usualmente se simplifican en las propiedades los materiales. La precisión del FEM para modelar e investigar estructuras complejas en 2D y 3D, ha permitido el desarrollo de poderosos paquetes de software comerciales para el diseño y análisis de máquinas y dispositivos eléctricos con elementos finitos. ANSYS-Maxwell [309], COMSOL Multiphysics® [310], y JMAG-Designer [311], son algunos de estos paquetes que integran el FEM en su software de simulación identificado como análisis de elemento finito (FEA: *Finite Element Analysis*). Estas plataformas de simulación han sido utilizadas para el estudio de mecanismos de transmisión magnética como la que se lleva a cabo en los engranajes magnéticos.

Aun cuando las técnicas numéricas como el FEM ofrecen la posibilidad de predecir el comportamiento de sistemas electromagnéticos y electromecánicos, con resultados más precisos al considerar la geometría real del modelo, en diferentes escenarios el FEM puede exhibir desventajas para propósitos de diseño y optimización debido al elevado consumo en el tiempo de cómputo y a la baja capacidad que tiene de mostrar una relación directa entre la geometría que modela y los resultados que presenta. En el análisis de generadores y motores eléctricos con elementos finitos, regularmente se considera la geometría simétrica para reducir la complejidad del modelo. Este enfoque no es posible aplicarlo directamente en el análisis de engranajes magnéticos concéntricos puesto que éstos no exhiben una simetría periódica, y por tanto se requeriría la simulación de modelos con elementos finitos completos; el modelado del engranaje magnético con el FEM en 2D sería muy costoso en tiempo de cómputo, y más aún el modelado en 3D, aunque éste último provea un análisis más preciso.

Para conciliar lo anterior, las técnicas de modelado con parámetros concentrados, específicamente con el MEC-RN, pueden ser una excelente alternativa para el análisis y comprensión del comportamiento de engranajes magnéticos, con representaciones en 2D o 3D, principalmente en aquellos esquemas que precisan un análisis detallado con un límite de tiempo. Y como se ha comentado anteriormente, el engranaje magnético se puede modelar empleado el MEC-RN, evaluando el modelo un software comercial basado en el FEM, situación que ha captado la atención de un buen número de investigadores [307].

Existen otros métodos de modelado para analizar el comportamiento de las máquinas eléctricas, igualmente aplicados en engranajes magnéticos. Se pueden mencionar, el *método del circuito equivalente eléctrico basado en la teoría clásica de la máquina eléctrica* y el *método basado en la teoría de la función del bobinado* (WFT: *winding function theory*).

El *método del circuito equivalente eléctrico* se desarrolla con base en analogías mecánico-eléctricas, bajo el argumento de que algunos sistemas electromecánicos de generación de energía, incluyendo aquellos de conversión de energía undimotriz, son esencialmente sistemas masa-resorte-amortiguador sujetos a una excitación externa, y que pueden analizarse mediante analogías eléctricas resistor-inductor-capacitor, utilizando circuitos equivalentes basados en representaciones de impedancia o admitancia. La solución consiste en resolver las ecuaciones diferenciales de segundo orden correspondientes al circuito modelado, asociando el comportamiento dinámico de los elementos eléctricos con los elementos mecánicos análogos. Este método ha sido discutido en detalle por Abolhasani y Pakdelian [312], en cuyo trabajo emplearon los circuitos equivalentes dinámicos análogos en el modelado de un engranaje magnético trans-rotatorio (véase la Figura 2.25a). En el circuito que lo representa, el efecto de engranaje se modela con un transformador ideal, cuya relación de vueltas describe la relación de engranaje o de transmisión, G_R , del engranaje magnético. Los autores de este trabajo concluyen que los circuitos equivalentes propuestos pueden utilizarse de forma similar en otros tipos de engranajes magnéticos. A la fecha, no se encuentran trabajos publicados que muestren la aplicación de esta técnica de modelado a engranajes magnéticos con topología concéntrica radial ni axial.

Lipo [313], presenta una explicación convencional del *método de modelado basado en WFT* describiendo las máquinas eléctricas en términos de circuitos magnéticos acoplados en lugar de campos magnéticos cuya precisión implica la solución de las ecuaciones de Laplace o de Poisson. Históricamente, este método ha sido empleado para el modelado electromagnético de máquinas eléctricas, principalmente en máquinas de inducción y síncronas. Su aplicación se centra en la determinación del comportamiento de las inductancias y del par electromagnético en el entrehierro. Para el modelado de los devanados de la máquina y su entrehierro, este método utiliza funciones numéricas tomando en cuenta la geometría de la

máquina, tales como la saliencia en entrehierros y el patrón de conexiones de los devanados del estator, incluyendo los efectos de sus ranuras. El método basado en WFT exhibe simplicidad en su proceso de cálculo y bajo costo computacional, con resultados consistentes con el FEM, método con el cual suele compararse [314], [315]. Pero uno de los inconvenientes de la WFT se relaciona con el modelado de imanes permanentes, ya que el método fundamentalmente se desarrolló para modelar los devanados de una máquina; además, es más apropiado para máquinas eléctricas con entrehierros pequeños. Se han propuesto mejoras a este método para extender el modelado a máquinas con imanes permanentes y ser aplicado en estructuras con entrehierro más grandes [316], [317]. Sin embargo, un número muy reducido de trabajos de investigación se han presentado considerando el modelado basado en WFT para engranajes magnéticos, que usualmente tienen rotores con imanes permanentes.

El trabajo publicado por Frank [102], [125], es quizá uno de los que con más detalle ha referenciado el método basado en WFT, aplicándose al modelado y análisis de engranajes magnéticos, en conjunto con el FEM. En este trabajo se establece que la base para aplicar la WFT a los engranajes magnéticos, es tratar a los imanes permanentes como bobinas. Un imán permanente se puede modelar como una bobina envuelta alrededor de un material con la misma permeabilidad del imán. La corriente eléctrica en cada bobina proporciona la misma FMM que el imán que se modela. Dos conjuntos de bobinas o fases conectadas en serie, operarán como los imanes de los rotores del engranaje magnético. El trabajo de Frank utilizó el diseño de un engranaje magnético planetario concéntrico, con topología radial, concluyendo que con el modelo basado en WFT se puede ejecutar en tiempos más cortos que con el FEM, con una visión más rápida de los parámetros cambiantes del engranaje magnético al ser posible considerar variaciones geométricas tales como la forma de los imanes.

Todas las anteriores herramientas de modelado, pueden ser aplicadas en el diseño y análisis de engranajes magnéticos. Cada una es útil según las necesidades que se consideren. Mencionar que, de forma global, una técnica es mejor que otra para modelar y estudiar un engranaje magnético, sería inapropiado. A continuación, un resumen.

Los *modelos analíticos* son significativamente más rápidos, pero están basados en una serie de suposiciones y simplificaciones, limitados a una determinada topología y con pocas capacidades para incluir condiciones no lineales como la saturación magnética y las pérdidas en el hierro; la no linealidad en un circuito magnético puede complicar la tarea de optimización, dificultando el cálculo analítico del par con suficiente exactitud en algunas topologías de máquinas eléctricas, imposibilitando la obtención de un buen modelo optimizado. Debido a estas características el modelado analítico no es lo suficiente preciso para analizar factores específicos operacionales de engranajes magnéticos.

Los *modelos con parámetros concentrados* utilizando el MEC requieren de un conocimiento previo de la geometría y entender la estructura magnética antes de implementar el MEC; conocer bien la topología permitirá lograr una estimación el flujo en diferentes partes de la estructura ferromagnética donde los “tubos de flujos”, representados por elementos de reluctancia, están bien definidos. En estructuras donde no hay hierro, este método puede ser inexacto por la dificultad de establecer “tubos de flujos” bien definidos. En procedimientos de optimización, no es favorable incluir la formulación del modelado con el MEC, ya que se presentarán resultados imprecisos por las variaciones geométricas; un procedimiento de optimización externo será necesario. Comparado con otros métodos, el modelado con el MEC suele ser simple y directo en estructuras asimétricas, además de ser bastante útil para predecir una tendencia general del comportamiento del engranaje magnético. Sin embargo, disminuye su precisión en aplicaciones de alto rendimiento. Su tiempo de procesamiento es rápido, pero el tiempo de configuración es grande, es decir, para ciertas estructuras, la duración del desarrollo del modelo con el MEC, es más largo comparado con el FEM.

Las *técnicas numéricas*, específicamente el análisis con el FEM, es quizá la opción más popular para analizar engranajes magnéticos, sobre todo por estar disponible en paquetes de software comerciales, con facilidad de uso y alto nivel de precisión. El FEM, es un método robusto con el que casi todos los fenómenos electromagnéticos pueden ser analizados tanto en 2D como en 3D, incluidos los efectos no lineales, con capacidades para realizar estudios de optimización paramétrica. Aun así, por su alto costo computacional, muchos investigadores se inclinan por el uso de modelos analíticos. Si la precisión de los cálculos es

más importante que el tiempo de la ejecución de los mismos, definitivamente el FEM es el predilecto. Habitualmente, este método es la referencia común contra la que se comparan y validan los resultados de los otros métodos.

El *modelado basado en WFT* aplicado para el análisis de engranajes magnéticos puede ofrecer resultados razonablemente precisos con menos costo computacional para una estructura sencilla, con capacidades para considerar efectos no lineales y modelado en 3D. Sin embargo, pese al optimismo de su uso, algunas suposiciones que se aplican en el método introducen inconvenientes para definir con precisión problemas como la dispersión de flujos que presentan algunos diseños de engranajes magnéticos. Cabe mencionar que en la sección 1.3.3, se comentó que las máquinas con imanes permanentes suelen ser superiores en términos de rendimiento energético, confiabilidad y costos de mantenimiento, comparadas con las que tienen devanados. En la literatura, se observa que la tecnología con imanes permanentes es más popular para el diseño de engranajes magnéticos.

Con base en las capacidades y limitaciones que presentan estas técnicas de modelado, y los tiempos de simulación que serían necesarios para llevar a cabo una optimización paramétrica, una práctica que se vuelve atractiva para estudiar un engranaje magnético, es emplear un modelo basado en un MEC-RN como herramienta de diseño y análisis, simple, rápida y precisa, utilizando el FEM en software comercial como soporte para evaluar y validar los resultados obtenidos con el modelo. Dado que una minuciosa evaluación paramétrica es esencial para destacar las ventajas potenciales de la tecnología que se modela, un adecuado programa de optimización es aplicado para completar el estudio, logrando de esta forma el modelo optimizado del engranaje magnético. Como se ha mencionado anteriormente, sólo un pequeño número de publicaciones dan cuenta de la aplicación del MEC-RN para analizar y optimizar un engranaje magnético [295] – [307], sin evidencias concretas de que se haya aplicado directamente en engranajes magnéticos con topología axial. Se abre entonces un área de oportunidad que da vigencia a este proyecto de tesis.

Capítulo 4

Modelado del Engranaje Magnético

El creciente interés por obtener modelos optimizados de los engranajes magnéticos sigue impulsando el desarrollo de las técnicas de análisis y diseño, con un enfoque centrado en lograr tiempos de simulación cortos con modelos más precisos. Sin embargo, aún no quedan agotados los estudios que pueden servir de guía sobre el uso de metodologías de diseño de los engranajes magnéticos, principalmente cuando se establecen comparaciones del desempeño de éstos con el de otras máquinas eléctricas y dispositivos electromagnéticos más tradicionales. Los métodos más comunes se basan en modelos analíticos, en circuitos equivalentes y en FEM. Los métodos analíticos utilizan modelos altamente simplificados, y tienen cierta dificultad para extenderse a condiciones no lineales. Debido a esto se prefiere realizar el modelado con el MEC y el análisis con FEA. Un trabajo publicado por Yilmaz [318] en los últimos años de la primera década de este siglo, reportó una comparación exhaustiva sobre las capacidades y limitaciones del MEC y del FEA para el modelado de máquinas eléctricas. En este trabajo consideró con detalle efectos no lineales como son la influencia de la saturación magnética y de las pérdidas en el hierro. Los resultados de esta investigación concluyeron que el enfoque de modelado con el MEC como herramienta de diseño es más prometedor que con el FEA ya que con el MEC se lograron obtener diferencias muy pequeñas del orden del 5% entre las simulaciones y los experimentos. Diez años más tarde, una minuciosa investigación publicada por Johnson [306], [307], en la que se llevó a cabo la implementación y evaluación de un modelo no lineal con el MEC en 2D, obtuvo resultados que permitieron corroborar que *el modelo MEC es una herramienta de análisis prometedora y potencialmente ventajosa, siendo mucho más rápido que un paquete FEA comercial y muy preciso para la mayoría de los diseños prácticos*. En un trabajo posterior, esta investigación fue extendida al modelado del MEC en 3D, concluyendo que los resultados del modelo MEC 3D concordaban significativamente con los del FEA 3D, pues su discrepancia absoluta promedio fue de menos de 1% para un determinado estudio paramétrico. Además, este modelado en MEC 3D tiene la ventaja de poder evaluar diseños

mucho más rápido que el modelado en FEA 3D [319], [320]. Es importante mencionar que estas investigaciones se realizaron considerando un engranaje magnético de flujo radial con imanes montados superficialmente.

En las dos primeras décadas del presente siglo se han desarrollado y mejorado los engranajes magnéticos, así como las técnicas de diseño y análisis enfocadas sobre todo a la topología radial. Una mínima atención se ha dirigido al engranaje magnético con topología axial. Los trabajos más recientes que han aplicado el modelado con MEC en engranajes magnéticos, [306], [307], [319], [320] recomiendan que para trabajos futuros se amplie el uso del MEC para incluir la topología con flujo axial con modelado de materiales no lineales. Este es precisamente el tema desarrollado en el presente trabajo de tesis.

A continuación, se describen los detalles que explican la forma en que se llevó a cabo modelado del engranaje magnético con flujo axial utilizando un modelo del MEC basado en RN y una formulación cuya solución se obtuvo al resolver un sistema de ecuaciones de malla. Asimismo, el modelado con el MEC-RN se integró en un programa modular desarrollado en MATLAB para controlar sistemáticamente las simulaciones con diferentes escenarios de discretización de la RN. Los resultados y la evaluación de este modelo se contrastaron con un modelo de FEA desarrollado en un software comercial.

Para esto, se incluyeron dos configuraciones de diseño considerados en esta tesis como trabajos que marcaron pautas en el desarrollo y análisis del engranaje magnético con topología axial. Uno de ellos es el propuesto por Mezani [114], identificado como el primer diseño del engranaje magnético con topología axial cuya configuración consiste de 23 pares de polos en el rotor de baja velocidad y 4 pares de polos en el rotor de alta velocidad. Este diseño se definió como el modelo 23/4. El segundo diseño es el analizado por Lubin [242], el cual tiene una configuración con 7 pares de polos en el rotor de baja velocidad y 2 pares de polos en el rotor de alta velocidad, i.e., modelo 7/2. Este diseño puede considerarse como el primer estudio detallado de la distribución de campo en el engranaje magnético con topología axial basado en un modelo analítico en 2D. El diseño 7/2 es el modelo considerado sobre el que se aplica el proceso de optimización en esta tesis.

4.1 Método del Circuito Equivalente Magnético con Redes de Reluctancia (MEC-RN)

El método del MEC está basado en la analogía de un campo magnético y un circuito eléctrico resistivo. Su objetivo principal es construir el circuito equivalente de una estructura electromagnética directamente a partir de su geometría. La esencia de este método consiste en dividir la geometría de la estructura en partes individuales. Estas partes, identificadas como “tubos de flujo”, suponen rutas por donde fluye el flujo magnético. Cada uno de estos tubos está caracterizado por elementos de reluctancia (o permeancia) magnética que se combinan en una red con fuentes de fuerza magnetomotriz (FMM) y fuentes de flujo magnético para formar un MEC con parámetros concentrados. Para obtener las ecuaciones que describen el circuito magnético se emplean dos tipos de formulación obtenidas al aplicar las técnicas tradicionales de análisis de circuitos eléctricos resistivos. La formulación basada en *mallas* modela una red de reluctancias utilizando la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK) para construir un sistema algebraico no lineal de ecuaciones de malla. En esta formulación, de acuerdo con la ley de Hopkinson, el sistema de ecuaciones se construye usando la reluctancia magnética para relacionar el flujo magnético que fluye a través de ella con la caída del potencial magnético escalar o FMM entre sus nodos. La formulación basada en *nodos* modela una red de permeancias utilizando la ley de corrientes de Kirchhoff (LCK) para construir un sistema algebraico no lineal de ecuaciones nodales. En esta formulación, la permeancia magnética relaciona el potencial magnético de nodo con el flujo a través de ella. Una comparación entre los MEC basados en mallas y los basados en nodos [294], concluye que, aunque los dos modelos de formulación exhiben un desempeño similar en condiciones de operación lineal, el rendimiento computacional de la formulación del MEC basado en mallas es significativamente mejor que el basado en nodos bajo operación no lineal. A pesar de esta conclusión, tradicionalmente el modelo basado en mallas es el que ha recibido una atención relativamente menor. Una vez que se ha construido el sistema de ecuaciones algebraicas no lineal, la solución puede determinarse mediante diferentes algoritmos como son el de Gauss-Seidel o el de Newton-Raphson. En el trabajo de esta tesis se utiliza el modelado del MEC-RN basado en mallas integrando un algoritmo de Newton-Raphson como método de solución.

4.1.1 Teoría General del Modelado con Redes de Reluctancia

Una red de reluctancias es un circuito equivalente magnético (MEC) que describe las trayectorias del flujo magnético a través de las secciones transversales de los elementos que conforman una máquina eléctrica o un dispositivo electromagnético. La teoría fundamental de esta técnica fue establecida y presentada por varios autores, entre los que destaca Ostović [321] – [323]. El componente básico del MEC es un elemento de reluctancia, el cual se representa mediante un tubo de flujo que conecta a dos puntos extremos (nodos) del elemento. La definición general de este elemento se muestra en la Figura 4.1 [324]:

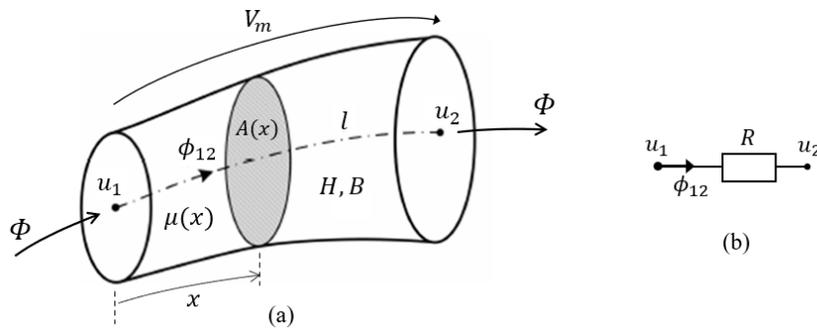


Figura 4.1. Elemento básico del MEC: (a) Definición del tubo de flujo. (b) Reluctancia. [324].

En la definición del tubo de flujo mostrado en la Figura 4.1a, se asume que el flujo magnético Φ generado por los imanes permanentes de la máquina, fluye en una dirección perpendicular a los planos A de dos puntos identificados como u_1 y u_2 , los cuales definen los valores del potencial magnético escalar o voltaje magnético aplicado V_m . El tubo de flujo posee propiedades magnéticas de permeabilidad μ , intensidad H , y densidad B de campo magnético. La diferencia entre dos puntos cualesquiera separados por una distancia x representa a la caída de fuerza electromotriz FEM sobre esa región del tubo de flujo, o en su caso, sobre toda la distancia l del tubo de flujo completo. Con base en los parámetros descritos que definen al tubo de flujo, la reluctancia correspondiente cuyo modelo se ilustra en la Figura 4.1b, se expresa como:

$$R = \frac{u_1 - u_2}{\phi_{12}} = \frac{V_m}{\Phi} \quad (4.1)$$

La ecuación 4.1 indica la relación que existe entre la diferencia de los potenciales magnéticos y el flujo total en el espacio volumétrico entre los dos potenciales.

Desde un punto de vista conceptual, el cálculo de la reluctancia magnética de un tubo de flujo con una longitud l y área de sección transversal uniforme A es similar al cálculo de una resistencia eléctrica. Por lo tanto:

$$R = \frac{V_m}{\Phi} = \frac{\int_{(x)} \mathbf{H} dx}{\int_{(A)} \mathbf{B} dA} = \frac{Hl}{BA} = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A} \quad (4.2)$$

donde μ_0 es la permeabilidad del espacio libre y μ_r representa la permeabilidad magnética del material.

4.1.2 Distribución del Campo Magnético en los Elementos de Reluctancia

El elemento de reluctancia, también llamado *unidad de circuito magnético* tiene sus propias ramas, las cuales representan las componentes de flujo que pasan a través de la trayectoria de flujo. Una trayectoria o región 3D tiene una rama *circunferencial* (o tangencial), una rama *radial* y una rama *axial* en su elemento de reluctancia, como se observa en la Figura 4.2:

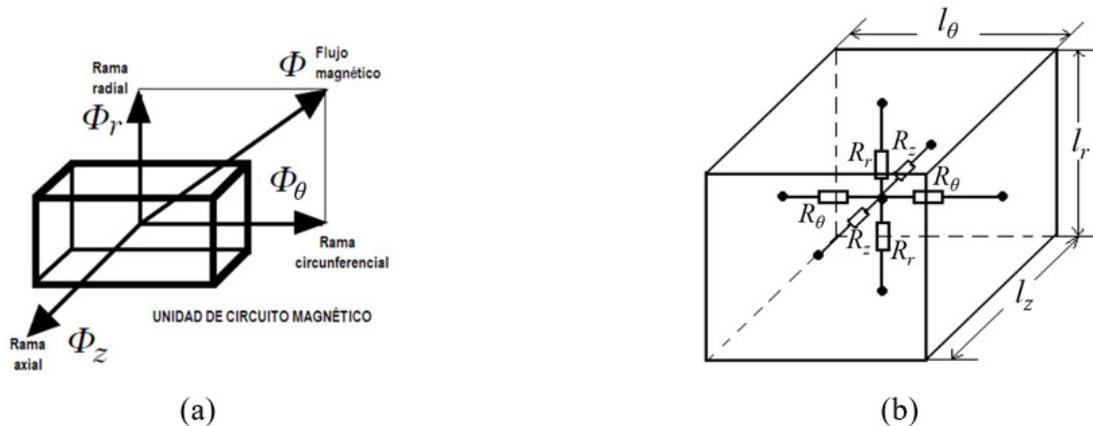


Figura 4.2. Unidad de circuito magnético 3D: (a) Componentes de flujo que fluyen a través de la trayectoria de flujo. (b) Ramas en un elemento de reluctancia 3D. [325].

Perho [325] propuso elementos de reluctancia en 2D que permiten dividir la geometría de la estructura estudiada en pequeñas regiones, esto es similar a un análisis con elemento finito (FEA). Para un engranaje magnético axial, la trayectoria en 2D considera solamente la rama *circunferencial* (θ) y la rama *axial* (z) en su elemento de reluctancia, como se observa en la figura 4.3. Esto es aceptable de acuerdo a un análisis de comportamiento mecánico efectuado

sobre arreglos de engranajes con imanes permanentes magnetizados axialmente. En los resultados se observa claramente que predomina la componente axial de la fuerza global ejercida en uno de los arreglos estudiados [65].

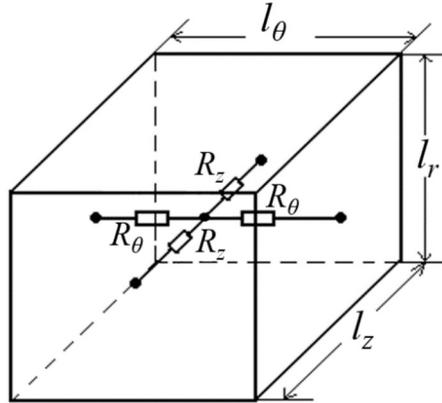


Figura 4.3. Unidad de circuito magnético en 2D: elemento de reluctancia. [325].

4.2 Modelado en 2D del Engranaje Magnético con Topología Axial usando el Método del MEC-RN

El modelado del engranaje magnético busca predecir el comportamiento de la distribución de los flujos magnéticos en los entrehierros, esto como un prerrequisito para obtener el par transmitido, principalmente en el lado de alta velocidad. El mecanismo de transmisión magnética se modela mediante elementos de circuito con parámetros concentrados. Con esta base, las trayectorias de los flujos magnéticos pueden determinarse en las diferentes partes del engranaje magnético mediante un sencillo análisis de circuitos.

Para obtener el modelo basado en el análisis con redes de reluctancias en 2D, primero se identifican las diferentes capas en la dirección axial, de acuerdo con los diferentes materiales que componen la estructura del engranaje, como se aprecia en la Figura 4.4. Obsérvese que se identifican siete capas en la dirección axial, las cuales corresponden a los diferentes materiales que integran la estructura: los dos discos de los rotores, los dos conjuntos de imanes permanentes, el modulador con las piezas ferromagnéticas y los dos espacios de aire en los entrehierros.

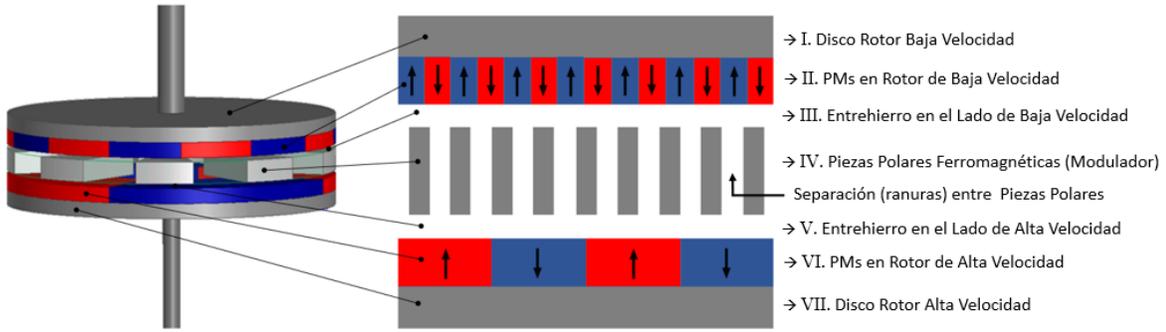


Figura 4.4. Esquema de división axial del engranaje magnético.

Posteriormente, la estructura del engranaje magnético se divide en múltiples elementos para formar una red de reluctancias en 2D, como se muestra en la Figura 4.5. Así, cada elemento de reluctancia (o incluso de permeancia) se encuentra en una trayectoria de flujo magnético denominada *unidad de circuito magnético*.

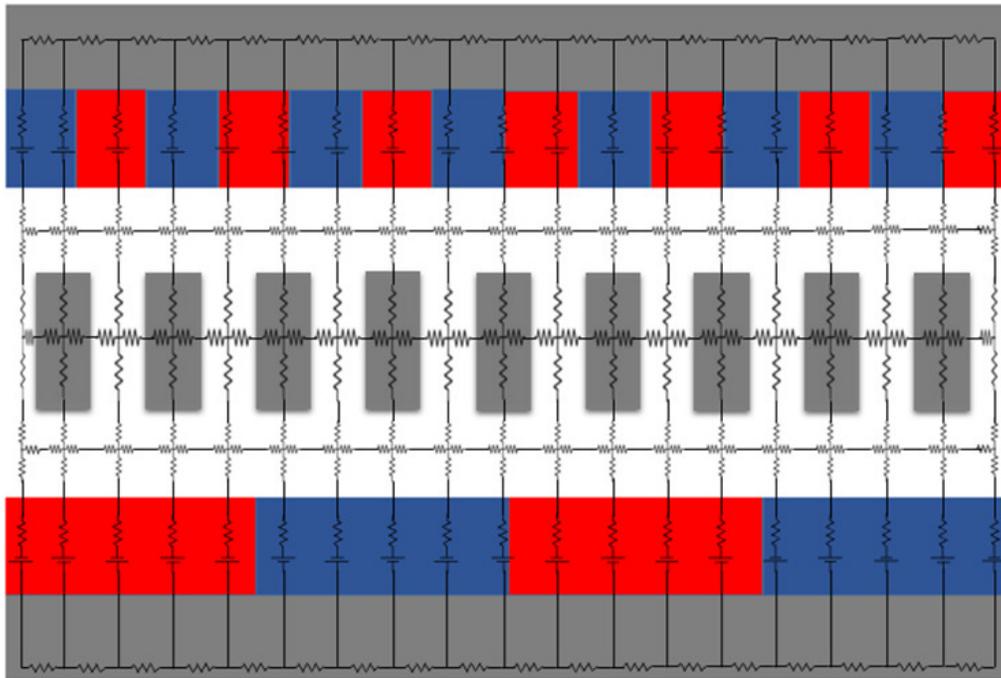


Figura 4.5. Modelo del circuito equivalente magnético con reluctancias en 2D para un engranaje magnético con topología axial.

En la dirección circunferencial o tangencial se aplica un criterio de división adecuado con base en el número de piezas ferromagnéticas por la importancia del papel que juegan en la transmisión de par entre ambos rotores, ya que, en una máquina eléctrica, la base de la

división es la mínima unidad repetitiva que influye en la transmisión de par [325]. Como se observa en la Figura 4.5, cada pieza polar ferromagnética del modulador, y en consecuencia cada ranura entre ellas, se divide en un número entero de bloques de reluctancia. Por lo que la precisión de los resultados es proporcional al número de divisiones de piezas polares. Así pues, el modelo se divide en n_θ segmentos en la dirección circunferencial, tal y como se puede observar en la Figura 4.6.

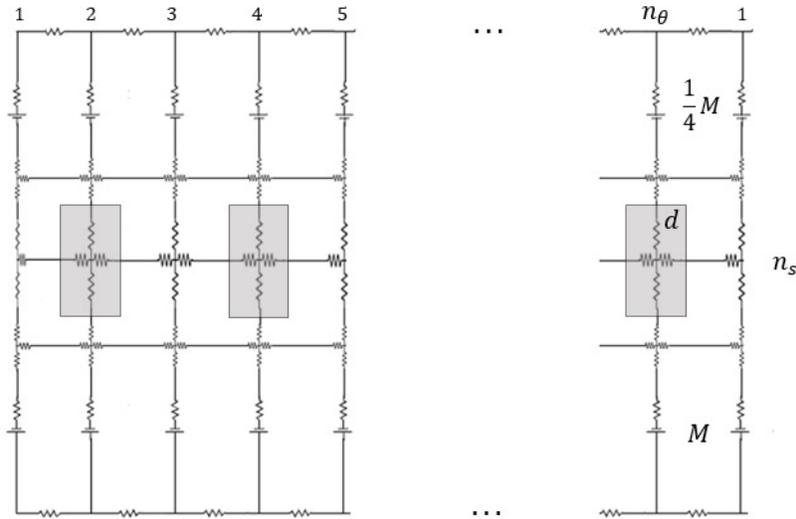


Figura 4.6. Esquema de división circunferencial del engranaje magnético.

Con el propósito de lograr un esquema minucioso de análisis para estudiar la operación del modelo es imprescindible poder generar un mallado con suficiente detalle. Para ello se generó una expresión matemática que permite la formación de un número indefinido de mallas. Considerando que en la dirección axial el número de mallas es constante debido a la disposición de las diferentes capas de los materiales, y respetando el número de piezas polares (n_s) obtenido de las posibles restricciones geométricas, el elemento activo en tal expresión es el número de divisiones (d) que se aplica en dirección circunferencial a cada pieza polar. Con estas consideraciones, la expresión para dar lugar a cualquier cantidad de mallas (M) resultó como:

$$M = 8dn_s \quad (4.3)$$

De igual manera, también se dedujo la siguiente expresión para considerar el número de divisiones en la dirección circunferencial:

$$n_\theta = 2dn_s = \frac{1}{4}M \quad (4.4)$$

4.2.1 Categorización de los Elementos de Reluctancia en el MEC

Un elemento de reluctancia depende sustancialmente de la forma geométrica del componente que representa en el engranaje magnético. Para definir la forma de las trayectorias de flujo o tubos de flujo magnético de referencia, existen diferentes geometrías que comúnmente se utilizan en las estructuras de los dispositivos electromagnéticos. En el caso de circuitos magnéticos, usualmente se emplean geometrías que no cambian sus dimensiones durante la operación del dispositivo magnético. Para el engranaje magnético con topología axial, por la forma en que están configurados los imanes permanentes y las piezas ferromagnéticas, podría ser factible considerar para éstos la forma de un *sector*, mientras que para las reluctancias de los núcleos de los rotores y de los entrehierros se podrían considerar formas *rectangulares*. Sin embargo, en este trabajo se utilizaron reluctancias con geometría tipo anillo o sector, ya que en las primeras pruebas realizadas proporcionaron resultados aceptables. Así la geometría base para cada elemento de reluctancia es un sector, donde su modelado 2D solo incluye la componente axial (z) y la componente circunferencial (θ). Este modelo 2D considera tanto el comportamiento lineal como el no lineal de los elementos de reluctancia a fin de describir su naturaleza magnética de acuerdo al material que representan.

Los elementos de reluctancia lineal se definen solo por sus geometrías, y representan a los imanes permanentes, a los espacios de aire y a las ranuras entre las piezas polares del modulador. En la Figura 4.7 se ilustra la geometría de un elemento de reluctancia lineal con sus correspondientes parámetros. De acuerdo con estos parámetros, la componente axial R_z y la componente circunferencial R_θ de la reluctancia lineal se calculan de la siguiente forma:

$$R_z = \frac{2l_z}{\mu_0\mu_r\alpha[r_o^2 - r_i^2]} \quad (4.5)$$

$$R_\theta = \frac{\alpha}{\mu_0\mu_r L \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)} \quad (4.6)$$

En las ecuaciones (4.5) y (4.6), los parámetros indicados son l_z : longitud axial, α : ancho angular, r_o : radio exterior, r_i : radio interior, A_z : área de la sección transversal normal a la

dirección axial, A_θ : área de la sección transversal normal a la dirección circunferencial, ϕ_z : flujo en la dirección axial y ϕ_θ : flujo en la dirección circunferencial.

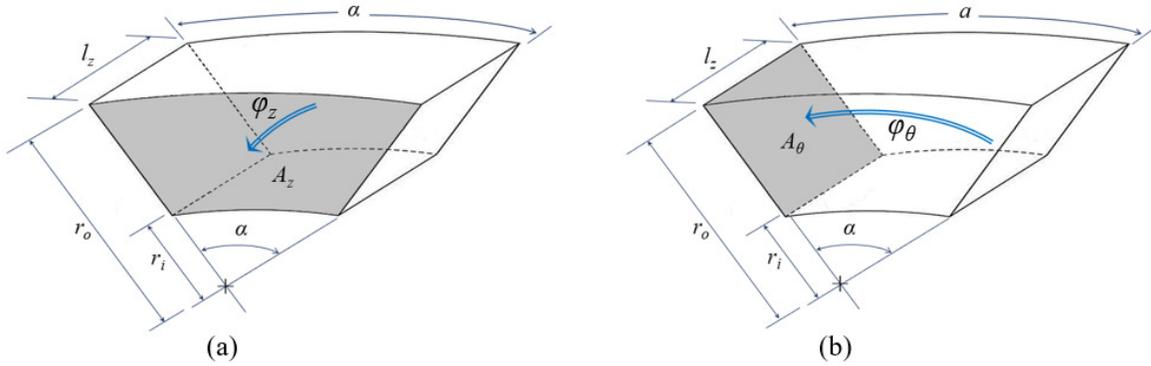


Figura 4.7. Geometría típica de una reluctancia lineal en 2D: (a) Componente axial. (b) Componente circunferencial.

Los elementos de reluctancia no lineales dependen tanto de la geometría como de la linealidad magnética de la curva BH del material magnético. Esta dependencia permite considerar también la saturación del material magnético. Las reluctancias no lineales representan a los núcleos de los rotores y a las piezas polares ferromagnéticas del modulador. Éstas se expresan en términos del flujo magnético (ϕ) y de los parámetros que describen la relación entre la intensidad del campo magnético (H) y la densidad del flujo magnético (B) [300]. Las ecuaciones correspondientes para la componente axial R_{mz} y la componente circunferencial $R_{m\theta}$ de la reluctancia no lineal son las siguientes:

$$R_{mz} = \frac{a_1 l_z}{A_z} + \frac{a_n l_z}{A_z^n} \phi_z^{n-1} \quad (4.7)$$

$$R_{m\theta} = \frac{a_1 l_\theta}{A_\theta} + \frac{a_n l_\theta}{A_\theta^n} \phi_\theta^{n-1} \quad (4.8)$$

En la reluctancia no lineal, los parámetros a_1 , a_n y n son los coeficientes de una función polinomial de orden n . Esta aproximación ha demostrado ser efectiva para representar la relación magnética no lineal entre H y B conforme a la siguiente ecuación:

$$H(B) = a_1 B + a_n B^n \quad (4.9)$$

En la ecuación (4.9), el primer término representa la condición lineal (de hecho, a_1 es un parámetro de reluctancia), y el segundo término refleja el efecto de la saturación (a_n es el

parámetro no lineal). El orden n depende del grado de saturación del material, y está determinado por la no linealidad del material [299]. Para el material considerado en este trabajo, los parámetros descritos tienen los siguientes valores: $a_1 = 1.08 \text{ A} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, $a_n = 0.02 \text{ A} \cdot \text{T}^{-13} \cdot \text{m}^{-1}$ y $n = 13$.

Los imanes permanentes se modelan como fuentes de fuerza magnetomotriz (FMM) con una reluctancia en serie, tal y como se aprecia en la Figura 4.8:

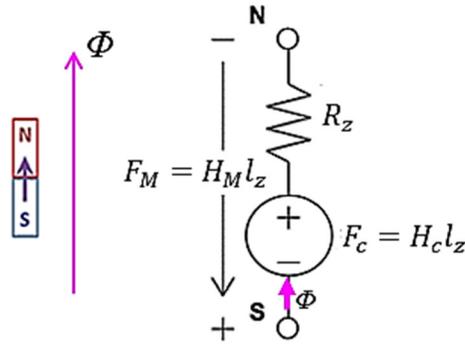


Figura 4.8. Modelo de un imán permanente [306].

La FMM, modelada por una función rectángulo para cada conjunto de imanes permanentes en los rotores está definida como:

$$F(\theta)_k = -H_c l_{zk} \frac{2}{\pi} \tan^{-1}(b_k \text{sen} p_k \theta) \quad (k = l, h) \quad (4.10)$$

donde H_c es la fuerza coercitiva del material del imán (se asume igual para todos los imanes permanentes), l_z es la longitud de la trayectoria magnética en la dirección axial, b es el coeficiente de la función de FMM del imán y p es el número de pares de polos en el rotor de baja velocidad (l) o en el de alta velocidad (h).

4.2.2 Formulación y Solución del Modelo Matemático

Una vez que las reluctancias han sido clasificadas y asignadas a las diferentes capas de la estructura modelada, se conectan en una red para construir el MEC. Las formulaciones basadas en nodos y mallas son dos alternativas para construir un sistema matricial de ecuaciones algebraicas no lineales que modelan matemáticamente el MEC. Las

formulaciones basadas en nodos y mallas tienen diferentes propiedades numéricas. Algunos trabajos han demostrado que el método basado en mallas tiene una mejor convergencia cuando se utiliza con un algoritmo de Newton-Raphson para resolver el sistema algebraico [294].

Para el proceso de ensamblaje del sistema matricial mediante la formulación basada en mallas, el MEC-RN se representa por un sistema de ecuaciones algebraicas no lineales obtenido a partir de la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK) aplicada a circuitos magnéticos. En esta formulación, la reluctancia magnética relaciona la FMM con el flujo magnético que fluye a través del elemento de reluctancia de acuerdo a la ley de Hopkinson. Para algunos estudios, el modelo MEC es una herramienta práctica para explorar el comportamiento de estado estacionario en sistemas electromagnéticos. Este modelo está configurado como un sistema de ecuaciones de malla donde las FMMs son las entradas y los flujos de malla son las salidas. Sobre esta base, el sistema general se define de la siguiente forma:

$$\mathbf{R}\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{F}(\theta) \quad (4.11)$$

donde \mathbf{R} es una matriz simétrica compuesta por los diferentes elementos de reluctancia, $\boldsymbol{\varphi}$ es el vector de flujos de malla y \mathbf{F} es el vector de fuentes de FMM, las cuales que son funciones de la posición θ del rotor.

Las ecuaciones algebraicas no lineales del MEC con parámetros agrupados se resuelven numéricamente usando un algoritmo el Newton-Raphson. Para esto se implementó una solución iterativa en el programa MATLAB. Su objetivo es el de calcular un vector actualizado de flujos de malla. El diagrama de flujo que describe los diferentes pasos del modelo de estado estacionario del MEC-RN se muestra en la Figura 4.9. Para resolver el sistema en (4.11), el procedimiento general de solución comienza estableciendo un conjunto de condiciones iniciales para las posiciones dadas de los rotores. El primer cálculo se realiza para el flujo en cada rama determinando la diferencia entre los flujos de malla adyacentes como:

$$\Phi_{br_i} = \varphi_{m_{act_i}} - \varphi_{m_{adj_i}} \quad (4.12)$$

donde $\varphi_{m_act_i}$ es el flujo de malla en la malla actual y $\varphi_{m_adj_i}$ es el flujo de malla en la malla adyacente. El segundo cálculo a realizar es la densidad de flujo B_{br} en cada rama, tanto en la dirección axial como en la circunferencial conforma a:

$$\mathbf{B}_{br} = \frac{\Phi_{br}}{A_{br}} \quad (4.13)$$

donde Φ_{br} es el flujo a través de la rama y A_{br} es el área de sección transversal promedio del elemento de reluctancia, la cual es normal a la dirección del flujo.

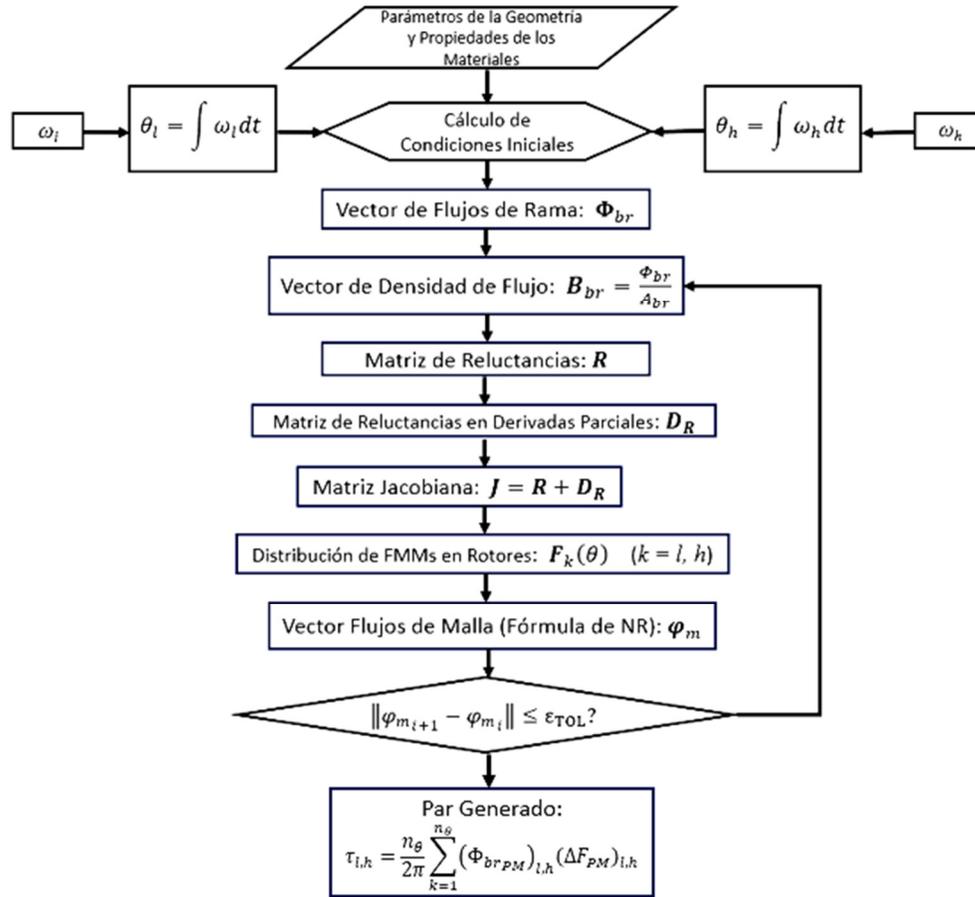


Figura 4.9. Diagrama de flujo del procedimiento general para la solución del modelo MEC-RN.

En seguida, se actualiza la matriz de reluctancias \mathbf{R} considerando los elementos lineales y no lineales de acuerdo a las ecuaciones (4.5) – (4.8). De igual forma, la matriz jacobiana \mathbf{J} expresada en (4.14) se actualiza quedando formada por el conjunto de reluctancias lineales y las reluctancias en derivadas parciales no lineales dependientes del flujo, esto conforme la formulación de Newton-Raphson.

$$\mathbf{J} = \mathbf{R} + \frac{\partial[\mathbf{R}(\varphi_{m_i}, \Phi)]}{\partial\varphi_{m_i}} \quad (4.14)$$

Luego, el vector de flujos de malla se calcula aplicando la fórmula de Newton-Raphson:

$$\varphi_{m_{i+1}} = \varphi_{m_i} - [\mathbf{J}(\varphi_{m_i})]^{-1} (\mathbf{R}\varphi_{m_i} - \mathbf{F}(\theta)) \quad (4.15)$$

La solución del modelo requiere relativamente pocas iteraciones, sin necesidad de utilizar un factor de relajación. La distribución de la FMM de ambos rotores está dada por (4.10). Finalmente, estas FMMs son utilizadas para calcular el par electromagnético generado por cada rotor [299]:

$$\tau = \frac{n_\theta}{2\pi} \sum_{k=1}^{n_\theta} (\Phi_{br_{PM}})(\Delta F_{PM}) \quad (4.16)$$

donde n_θ es el número de divisiones del rotor en la dirección circunferencial, $\Phi_{br_{PM}}$ es el flujo en cada rama de los imanes permanentes y ΔF_{PM} es la diferencia de las FMMs en los imanes previamente definida en (4.10).

En el siguiente capítulo, se presenta la optimización del modelo matemático desarrollado. Este modelo ha sido validado mediante la comparación con otro modelo que se construyó utilizando un software comercial de elemento finito.

Capítulo 5

Diseño Óptimo del Engranaje Magnético

El objetivo del presente proyecto es proponer un modelo de engranaje magnético con un diseño óptimo para evaluar la viabilidad de su aplicación en aerogeneradores, de forma que pueda sustituir al engranaje mecánico en un volumen más reducido. En los capítulos anteriores se ha venido trabajando tal objetivo, con el detalle que ha sido posible para clarificar el proceso que permita lograr un diseño óptimo del engranaje magnético. En el Capítulo 3 se discutieron varios trabajos que presentan al MEC-RN como un método de modelado para obtener un diseño rápido que puede considerarse, sin pérdida de generalidad, como un diseño inicial para llevar a cabo un proceso de optimización. De igual forma, de la revisión de la literatura, se concluyó que solo un pequeño número de publicaciones emplean el MEC-RN para analizar y optimizar los engranajes magnéticos [295] – [307]. Esto aunado a que no se han encontrado más evidencias de su aplicación en engranajes magnéticos con topología axial. Con esta base, un modelo matemático en 2D para un engranaje magnético con esta topología se ha presentado en el capítulo 4. Aun cuando el método MEC-RN permite modelar cualquier máquina o dispositivo electromagnético, con un número significativamente menor de elementos y con una precisión computacionalmente confiable, comparado con el FEA, es necesario optimizarlo para lograr un dispositivo competitivo en la aplicación deseada. Para tener una idea elemental de lo que comprende un proceso de optimización, a continuación, se abordan algunos de sus conceptos.

5.1 Conceptos Básicos de la Teoría de Optimización

De acuerdo con Boldea y Nasar [328], el diseño de una máquina eléctrica o dispositivo electromagnético consiste en definir los parámetros de la geometría más apropiada en base a un conjunto de datos indispensables para su fabricación y consecuente aplicación práctica,

de modo que sea satisfecho un vector de variables de desempeño junto con un conjunto de restricciones. Ambos autores establecen también que el modelado matemático plantea una serie de fórmulas para evaluar el desempeño del dispositivo que se estudia, con variables de restricción que son función de las variables de diseño. El paso de las variables de diseño hacia el conjunto de restricciones y condiciones de desempeño, se denomina *análisis*, mientras que el sentido inverso se define como *síntesis*. Posteriormente, la optimización del diseño, se refiere a las diferentes formas de llevar a cabo una síntesis eficiente mediante análisis repetitivos de modo que se maximice o minimice una o múltiples funciones objetivo (identificadas con el rendimiento esperado), y al mismo tiempo se cumplan las restricciones impuestas. El esquema básico que se aplicó al diseño optimizado en este trabajo se ilustra en la Figura 5.1:

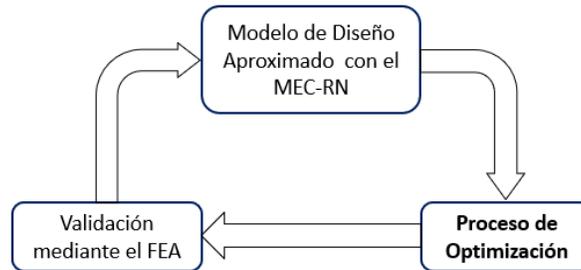


Figura 5.1. Esquema básico del proceso de diseño óptimo para el engranaje magnético.

Aunque ha quedado demostrado que el modelado con el MEC-RN arroja resultados bastante aceptables siguiendo el esquema de la Figura 5.1, los resultados obtenidos se consideran una estimación aproximada dentro del proceso de diseño óptimo. La subsecuente optimización permite que el modelo sea más preciso y capaz de arrojar resultados más realistas en una amplia gama de variables de entrada. El modelo óptimo obtenido se compara y valida con un modelo de simulación basado en software comercial con elemento finito, el cual sigue los criterios de diseño especificados. Cuando tales criterios de diseño no se cumplen, el MEC-RN debe ser capaz de permitir los cambios necesarios para cumplir con el diseño establecido. Finalmente se procede de nueva cuenta con la optimización.

5.2 Diseño del Engranaje Magnético

La optimización del diseño del engranaje magnético puede considerarse una metodología de diseño de última generación, cuyo objetivo es definir el mejor conjunto de parámetros para satisfacer ciertas especificaciones y restricciones de diseño. Este proceso suele ser de naturaleza multiobjetivo. De acuerdo a la aplicación para la cual se diseñe el engranaje magnético, las funciones objetivo pueden ser ya sea maximizar la densidad de par o el par generado y la eficiencia, o bien minimizar el volumen, el costo, la cantidad de imanes permanentes y o par de arranque. Además, también se puede considerar una combinación de ellas. Los parámetros de optimización involucran la topología, los materiales, las dimensiones geométricas y el número de polos magnéticos en los rotores del engranaje. Por lo tanto, se requiere cierta experiencia en ingeniería eléctrica para abordar adecuadamente los problemas de optimización del diseño, y así plantear un procedimiento de optimización adecuado. En las siguientes figuras se presentan los parámetros más representativos de diseño para el engranaje investigado en este trabajo.

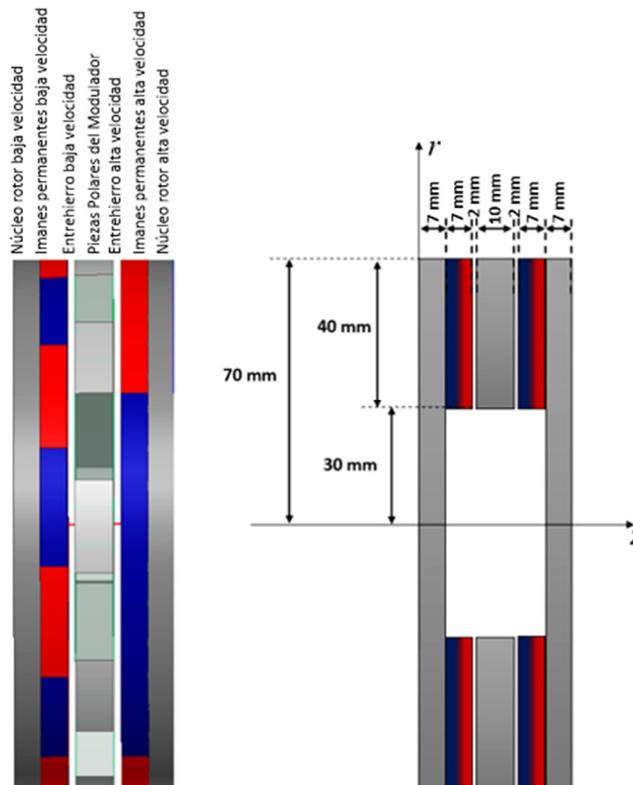


Figura 5.2. Geometría del engranaje magnético con topología axial en el plano $z-r$.

La Figura 5.2 muestra la geometría de la estructura del engranaje magnético con sus principales componentes y dimensiones correspondientes en un plano axial (z) – radial (r).

En la Figura 5.3 se presenta la geometría en 2D de la estructura del engranaje magnético, en un plano circunferencial (θ) – axial (z).

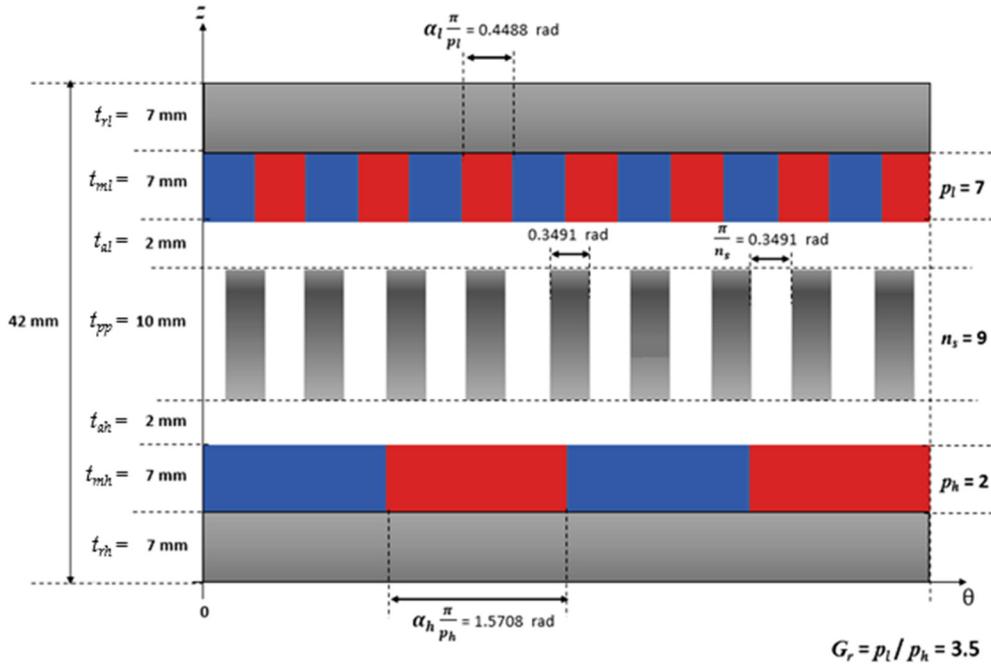


Figura 5.3. Geometría del engranaje magnético con topología axial en el plano $\theta - z$.

Finalmente, la Figura 5.4 muestra las dimensiones de los parámetros representativos de los imanes permanentes de ambos rotores y de las piezas polares ferromagnéticas del modulator.

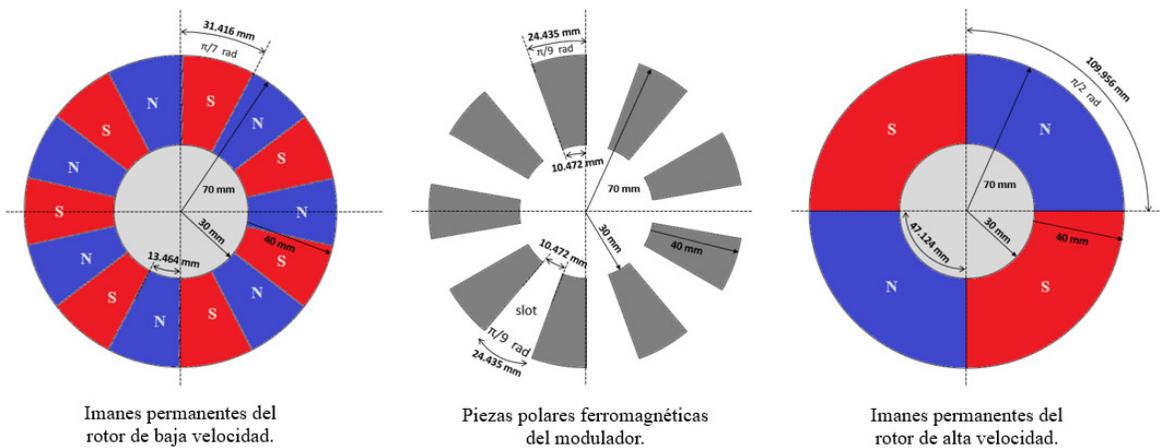


Figura 5.4. Imanes permanentes de rotores y piezas polares ferromagnéticas del modulator.

En la Tabla 5.1 se muestran los parámetros utilizados para el diseño del engranaje magnético bajo estudio, los cuales están basados en [242].

TABLA 5.1
PARÁMETROS DEL MODELO DEL ENGRANAJE MAGNÉTICO CON TOPOLOGÍA AXIAL

Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
pl	Número de pares de polos en rotor de baja velocidad	7	-
ph	Número de pares de polos en rotor de alta velocidad	2	-
n_s	Número de piezas polares ferromagnéticas	9	-
G_r	Relación de transmisión	3.5	-
t_{rl}	Espesor del núcleo del rotor de baja velocidad	7	mm
t_{ml}	Longitud axial (espesor) imanes de baja velocidad	7	mm
t_{al}	Longitud del entrehierro adyacente al rotor de baja velocidad	2	mm
t_{pp}	Longitud de las piezas polares ferromagnéticas del modulador	10	mm
t_{ah}	Longitud del entrehierro adyacente al rotor de alta velocidad	2	mm
t_{mh}	Longitud axial (espesor) imanes de alta velocidad	7	mm
t_{rh}	Espesor del núcleo del rotor de alta velocidad	7	mm
r_i	Radio interno	30	mm
r_o	Radio externo	70	mm
a_l	Relación arco polar a paso polar en imanes de baja velocidad	1	-
a_h	Relación arco polar a paso polar en imanes de alta velocidad	1	-
α_{ml}	Ancho angular de los imanes de baja velocidad	0.4488	rad
α_{mh}	Ancho angular de los imanes de alta velocidad	1.5708	rad
α_s	Apertura de las ranuras entre piezas polares	0.3491	rad
α_p	Ancho angular de las piezas polares ferromagnéticas	0.3491	rad
B_r	Remanencia magnética de los imanes	1.25	T
H_c	Coercitividad normal de los imanes	- 995	kA/m
μ	Permeabilidad magnética de los imanes	1.05	H/m

5.3 Optimización del Modelo

La optimización de máquinas eléctricas y dispositivos electromagnéticos, incluidos los engranajes magnéticos, a menudo comprende múltiples objetivos que deben considerarse simultáneamente. De esto se deduce que, en un problema de optimización multiobjetivo (MO), puede no existir una mejor solución con respecto al conjunto de objetivos definidos. Dado que no existe una solución única que sea mejor que otra, cualquier solución propuesta puede considerarse aceptable. De ahí que sea conveniente tener un conocimiento preciso de la naturaleza del problema para poder elegir la solución más adecuada. Algunos estudios

establecen una forma inteligente de resolver problemas multiobjetivo [326], [327]. En estos trabajos se propone una transformación del problema original a uno de un solo objetivo, ponderando los objetivos con un factor de peso. Por lo tanto, para un problema de optimización multiobjetivo se puede utilizar cualquier algoritmo de optimización de objetivo simple, pero con una solución que depende del factor de ponderación utilizado en el proceso. Si bien el problema de optimización que se ha desarrollado en la investigación de esta tesis es de naturaleza multiobjetivo, aquí solo se reportan los resultados relacionados con la minimización del volumen, para con ello mejorar la densidad de par del engranaje magnético estudiado. Así, el propósito es resaltar el beneficio de analizar el engranaje magnético con topología axial en base a la combinación de modelado MEC-RN y un método de optimización basado en Algoritmos Genéticos (GAs por sus siglas en inglés), cuyas características se presentan en la siguiente sección.

5.3.1 Algoritmos Genéticos

Los GAs han resultado ser algoritmos inteligentes adaptativos capaces de resolver problemas prácticos de ingeniería y ciencias. Inspirados en la teoría de selección natural de Darwin, funcionan emulando teorías biológicas evolutivas para resolver problemas complejos de optimización. Estos algoritmos son métodos de búsqueda y optimización que presentan velocidad y robustez sin la necesidad de elaborar un modelo matemático riguroso del sistema físico. Una propiedad destacada que define a los GAs es que estos algoritmos funcionan en base a una población de puntos (soluciones) en un espacio conocido como el frente óptimo de Pareto. Esto es extremadamente importante ya que algunos objetivos son a menudo contradictorios. La búsqueda en paralelo a partir de una población de puntos evita quedarse estancado en una solución óptima limitada. La Figura 5.5 ilustra un diagrama general de flujo que explica el funcionamiento de la optimización de los GAs. De acuerdo con [329], y como se muestra en esta figura el GA parte de una población que puede ser considerada como todas las soluciones posibles para un problema dado. El comportamiento de esta población, se valora según el rendimiento de los parámetros de una generación, observando cómo se conservan sus propiedades en las generaciones siguientes.

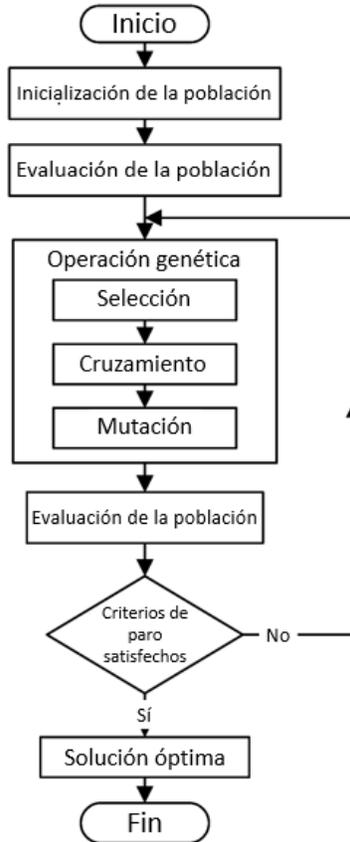


Figura 5.5. Diagrama general de flujo para Algoritmos Genéticos.

Aplicando una analogía con la población humana, se toman soluciones de una población (conocida como padres), las cuales se usan para formar una nueva población con nuevos parámetros (conocida como hijos o descendientes). Esto se representa mediante una función de aptitud (*fitness*) que toma una solución deseada como entrada y proporciona la idoneidad de esta solución como salida. En algunos casos ésta es igual a la función objetivo, mientras que en otros puede ser diferente. La descendencia (transmisión de los nuevos parámetros o hijos por los padres) se puede llevar a cabo mediante tres operaciones genéticas fundamentales: por *selección* (transmisión directa a la próxima generación sin modificaciones), por *cruzamiento* (un cruce de propiedades de ambos padres), y por *mutación* (con cambios aleatorios de uno de los padres). Estas operaciones en realidad alteran la composición genética de las nuevas soluciones relacionadas con la función de aptitud. En este esquema, las soluciones que se utilizan para generar nuevas soluciones (niños o crías) se seleccionan en función de sus aptitudes, lo que significa que cuanto más adecuadas sean, más

oportunidades tienen de reproducirse en el proceso evolutivo. Los GAs operan de acuerdo con dos características importantes: 1) el *tamaño de la población*, la cual determina cuántos valores de parámetros diferentes se probará para una nueva generación, y 2) el *número de generaciones*, que determina el número de cruzamientos y mutaciones [329], [330].

5.3.2 Función Multiobjetivo

Para obtener un modelo optimizado del engranaje magnético, se define una función de costo multiobjetivo $f(x)$ basada en la estrategia de diseño actual utilizando el MEC-RN y las ventajas del proceso de optimización con algoritmos genéticos multiobjetivo (MOGA, por sus siglas en inglés). La función de costo multiobjetivo está dada por las siguientes ecuaciones:

$$\min \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \{f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), f_3(\mathbf{x})\} \quad (5.1)$$

tal que

$$f_1(\mathbf{x}) = \pi r_0^2 l_{axial} \quad (5.2)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = |\tau_{ls} - \tau_{ls \text{ rated}}| \quad (5.3)$$

$$f_3(\mathbf{x}) = |\tau_{hs} - \tau_{hs \text{ rated}}| \quad (5.4)$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u, \quad (5.5)$$

donde

$$l_{axial} = t_{rl} + t_{ml} + t_{rh} + t_{mh} + t_{pp} + 2t_a \quad (5.6)$$

siendo l_{axial} la longitud axial activa del engranaje magnético definida en función del espesor de sus componentes principales cuyos parámetros se muestran en la Tabla 5.2. Las tres funciones de costo f_1 , f_2 y f_3 están relacionadas con el volumen, el par de baja velocidad y el par de alta velocidad del engranaje magnético, respectivamente. Éstas se representan como valores normalizados en el proceso de solución de optimización. En las ecuaciones (5.2) – (5.6) x es el vector de variables de diseño, y τ_{rated} representa el par nominal del engranaje magnético, mientras que los subíndices l y u indican los límites inferior y superior, respectivamente.

TABLA 5.2
VARIABLES DEL DISEÑO ÓPTIMO

Símbolo	VARIABLES DE DISEÑO		Límite Inferior (mm)	Límite Superior (mm)	Valor Óptimo (mm)
r_o	Radio externo	x_1	50	71	59.49
r_i	Radio interno	x_2	20	31	27.56
t_{rl}	Espesor del núcleo del rotor de baja velocidad	x_3	6	12	6.62
t_{ml}	Longitud axial imanes de baja velocidad	x_4	6	12	8.55
t_{pp}	Longitud de las piezas polares ferromagnéticas	x_5	9	15	11.2
t_{mh}	Longitud axial imanes de alta velocidad	x_6	6	12	7.51
t_{rh}	Espesor del núcleo del rotor de alta velocidad	x_7	6	12	6.97
t_a	Longitud de los entrehierros	x_8	1	4	1.85

5.3.3 Resultados de la Optimización

Los parámetros del engranaje magnético con topología axial modelado se muestran en la Tabla 5.1, los cuales son los valores utilizados por Lubin en su diseño original [242]. Para minimizar el volumen del engranaje magnético, que es equivalente a una maximización de la densidad del par, se eligieron ocho variables de diseño. Estas variables se muestran en la Tabla 5.2, donde se pueden observar las restricciones de cota impuestas a cada variable y los valores optimizados después de aplicar el MOGA. La optimización multiobjetivo se ejecutó utilizando los siguientes parámetros: 800 generaciones, una población de 200, un tamaño de torneo de 2, una fracción de cruce de 0.8, una relación de cruce de 1.0, una fracción de migración de 0.2 y una fracción de frente de Pareto de 0.35. La Figura 5.6 muestra el frente de Pareto de las funciones objetivo consideradas en el proceso de optimización. En esta figura, se localizan los puntos óptimos en el espacio objetivo. Nótese la disminución de la variable que representa al volumen del engranaje magnético (f_1) y el incremento de los pares generados (f_2 y f_3). Con base en estos resultados, el volumen del engranaje magnético determinado a partir del proceso de optimización del modelo con el MEC-RN es de $4.9632 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, lo que equivale a una disminución cercana al 23.3% con respecto al modelo de Lubin [242]. Este resultado indica un aumento en la densidad de par con un valor del mismo orden. Una conclusión de esta optimización es que cualquier intento que se realice por mejorar alguna propiedad del dispositivo que se analiza, puede producir efectos positivos en otras propiedades, aunque también pueden presentarse situaciones donde los efectos sean negativos.

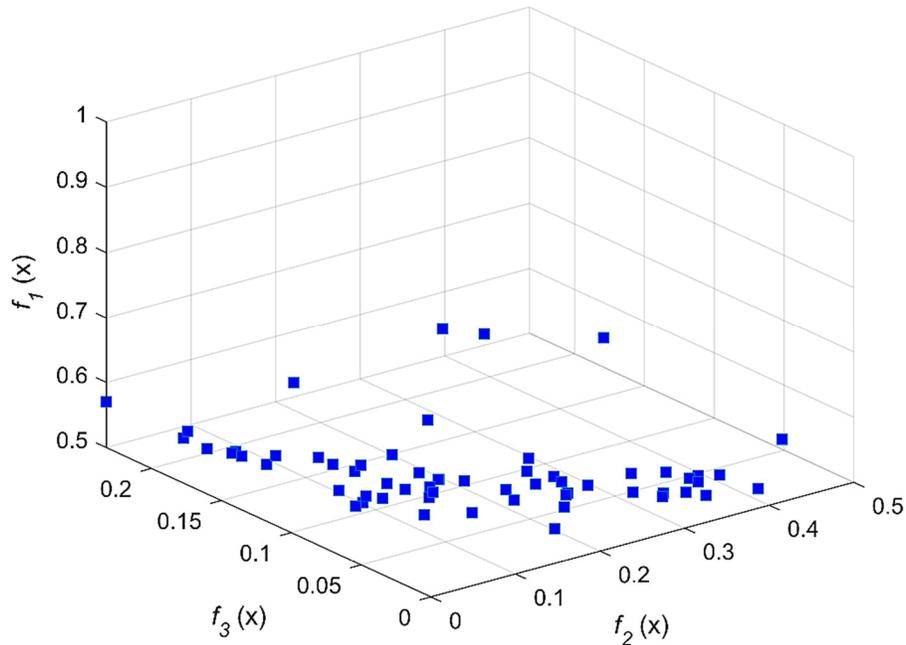


Figura 5.6. Frente de Pareto de las soluciones óptimas factibles.

5.3.4 Evaluación y Análisis del Desempeño del Modelo Optimizado

Para verificar el rendimiento del modelo MEC-RN optimizado, los resultados obtenidos en MATLAB se compararon con los de un modelo magnetostático 3D-FEA creado en el paquete de software de simulación con elementos finitos ANSYS-Maxwell[®] versión 17.0. Ambos modelos se basaron en las dimensiones presentadas en la Tabla 5.1, las cuales fueron actualizadas con los valores de los parámetros de diseño determinados durante el proceso de optimización usando MOGA. Cabe destacar que el análisis de la distribución de la densidad de flujo magnético en los entrehierros es de fundamental importancia para predecir y optimizar el desempeño de los engranajes magnéticos, ya que es en los entrehierros donde tiene lugar la transmisión de par.

Previo a la comparación del modelo optimizado con el modelo de elementos finitos, se realizaron simulaciones con el modelo original del MEC-RN desarrollado en MATLAB. Esto con el fin de verificar el correcto funcionamiento del programa para representar la naturaleza del engranaje magnético estudiado. La Figura 5.7 muestra la distribución de la densidad de flujo calculado en los entrehierros, así como el contenido armónico en cada uno de ellos.

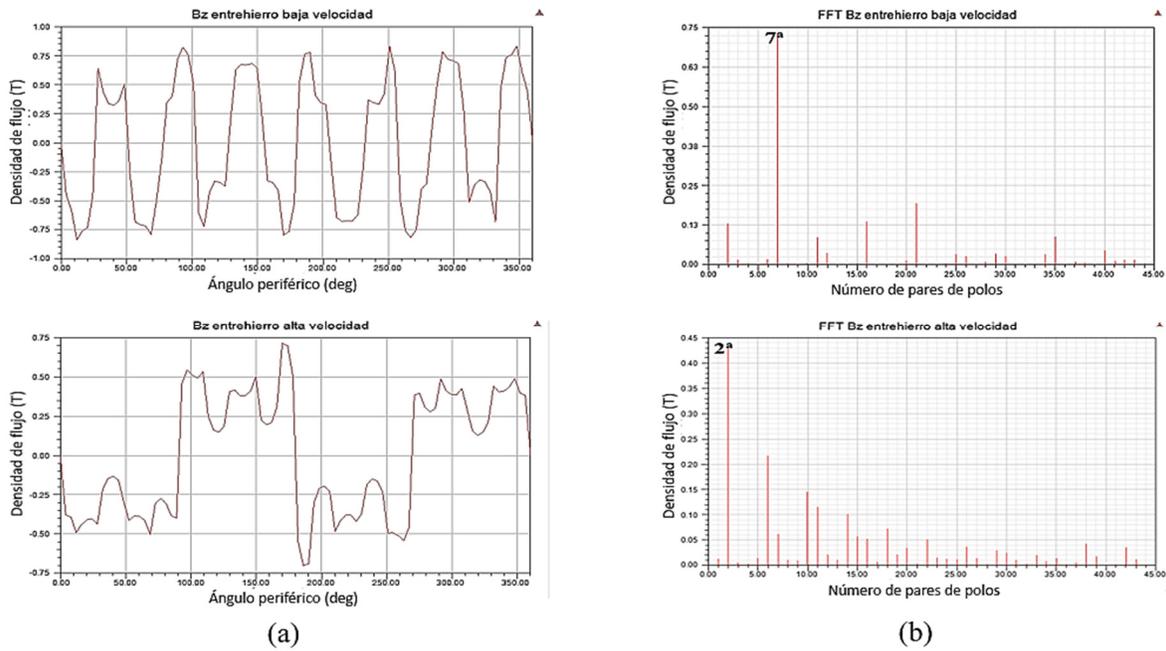


Figura 5.7. Densidad de flujo en los entrehierros del engranaje magnético con topología axial, en configuración 7/2: (a) Formas de onda. (b) Espectro armónico.

Con base en la introducción presentada en la Sección 3.2, y de acuerdo con la Figura 3.7, se comprueba que la respuesta del modelo con el MEC-RN en MATLAB efectivamente representa a la configuración 7/2 del engranaje magnético que se investiga.

Para un engranaje magnético que será utilizado como multiplicador de velocidad, su análisis se enfoca en el rotor de alta velocidad, ya que los efectos más pronunciados ocurren en el lado de la carga, los cuales se deben principalmente al par de rizado o de detención (*cogging*). La densidad de flujo del entrehierro y los valores de los pares generados en ambos rotores se investigan en este trabajo. La simulación 3D-FEA se usa para predecir los mejores resultados en términos de la confiabilidad del mallado que se realiza. La Figura 5.8 muestra el gráfico de malla del modelo magnetostático 3D-FEA utilizado para la comparación. La razonabilidad de la división de cuadrícula aplicada a la estructura del engranaje magnético axial se basa en utilizar un nivel aceptable de discretización de malla con elemento finito del modelo, el cual pueda dar dar buenos resultados numéricos. Para lograr una solución razonablemente precisa, por lo general, se necesitan miles de nodos de elementos finitos, lo que implica un tiempo computacional considerable para resolver las ecuaciones que describen el sistema. La malla de elementos finitos 3D del engranaje magnético estudiado tiene 206,397 elementos.

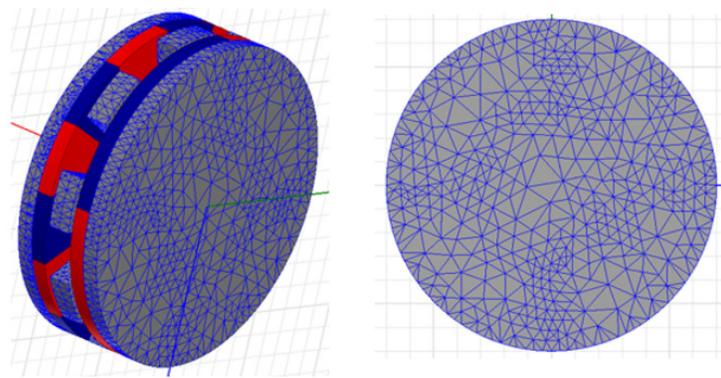


Figura 5.8. Diagrama de mallado del modelo magnetostático 3D con elemento finito, del engranaje magnético con topología axial.

Esta malla tiene los suficientes elementos para representar con calidad las regiones del engranaje, y así garantizar la precisión del cálculo numérico. En el MEC-RN, los nodos que crean una malla sobre las regiones estudiadas están conectados entre sí por reluctancias, las cuales representan las trayectorias de flujo sobre las áreas de sección transversal en los componentes del engranaje magnético. En el modelo MEC-RN, la densidad de la malla se define estableciendo el número de divisiones en la dirección circunferencial. Como se comentó anteriormente, la base de esta división es la unidad repetitiva circunferencial más pequeña representada por cada pieza polar del modulador. De este modo, las piezas polares se dividen por igual en un número entero para aumentar la densidad de la malla. Sin embargo, las mallas demasiado gruesas pueden dar lugar a resultados poco razonables. Para el modelo MEC-RN optimizado propuesto, se obtuvieron resultados aceptables con 54 divisiones en la dirección circunferencial, considerando que cada pieza polar y las ranuras entre ellas se dividen en tres partes iguales. Por lo tanto, el modelo del engranaje magnético con topología axial se dividió en 432 elementos de malla.

Los vectores de distribución de la densidad de flujo y sus direcciones se muestran en la Figura 5.9. La Figura 5.9a ilustra los resultados de un modelo 3D, mientras que la Figura 5.9b es la representación de los vectores de densidad de flujo en diferentes regiones del engranaje magnético óptimo de un modelo 2D. Como se aprecia en estas figuras, la dirección del flujo indica que los imanes permanentes opuestos están frente a polos diferentes.

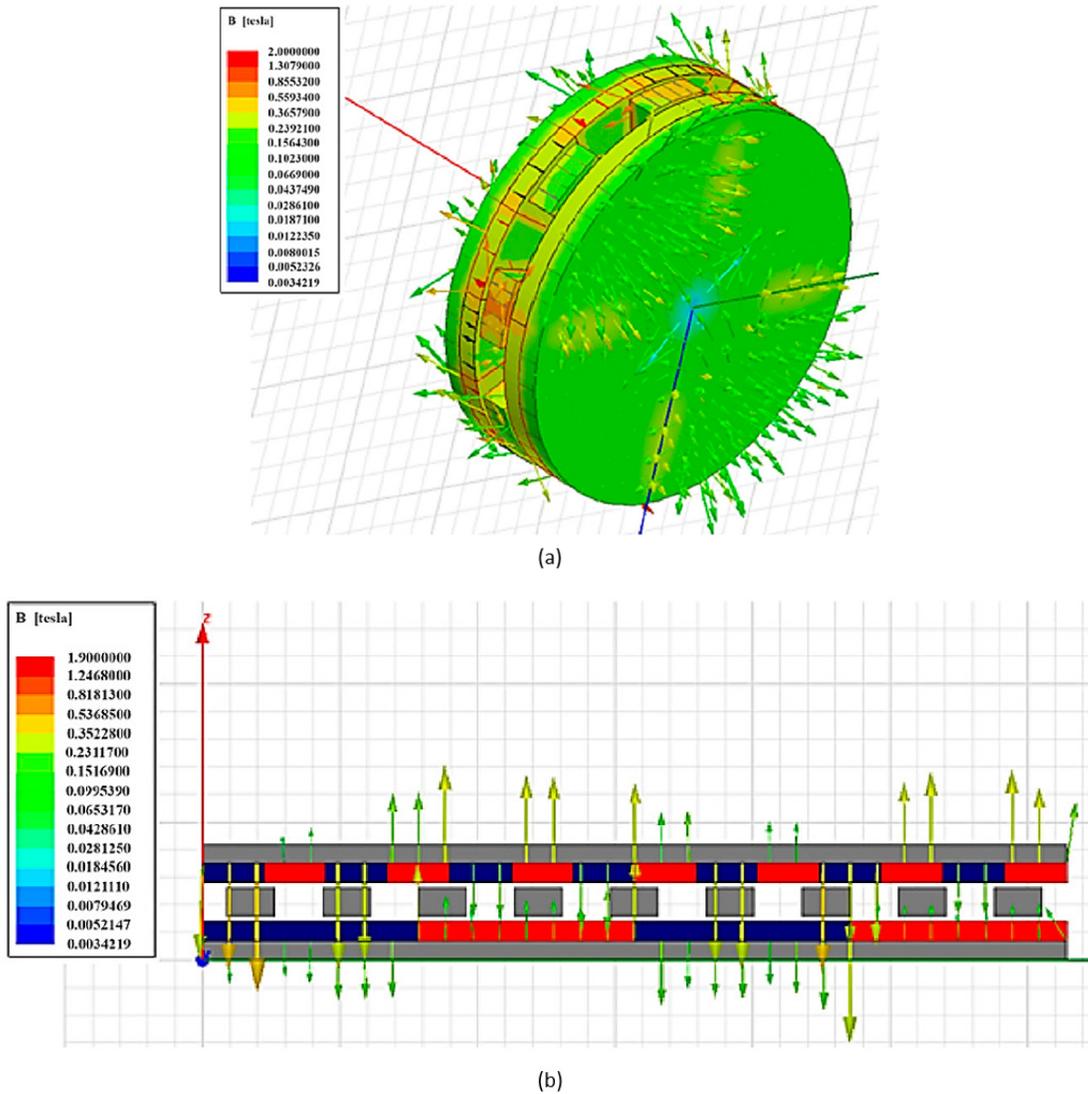


Figura 5.9. Distribución de la densidad de flujo en el engranaje magnético con topología axial: (a) Modelo en 3D. (b) Modelo en 2D.

La Figura 5.10 muestra las rutas de las líneas de densidad de flujo en un modelo 2D del engranaje magnético optimizado. Nótese que la densidad de flujo es mayor en las proximidades de las fuentes de FMM representadas por los imanes permanentes.

La comparación que valida el desempeño del modelado óptimo del engranaje magnético con el MEC-RN en MATLAB y el modelo 3D-FEA construido con ANSYS-Maxwell[®] 17.0 se muestra en la Figura 5.11. En tal figura se puede observar la variación calculada de la componente axial de la densidad de flujo magnético en el centro del entrehierro del rotor de alta velocidad para la configuración $pl = 7$ y $ph = 2$.

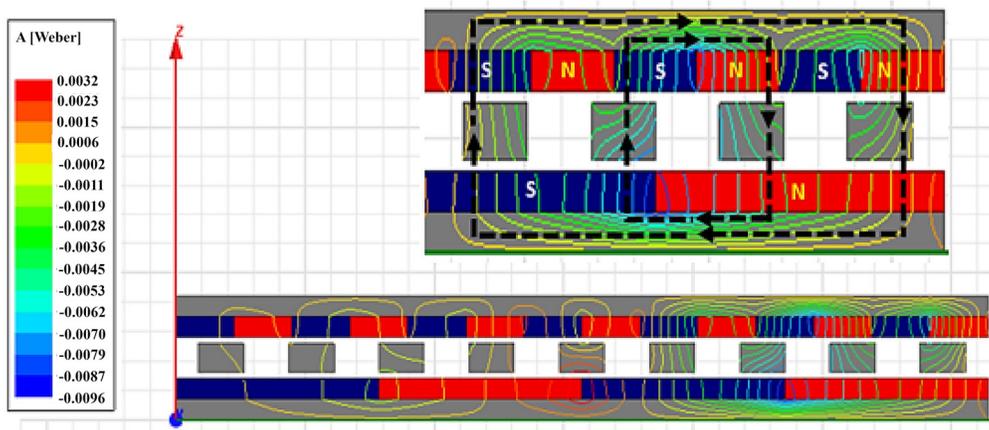


Figura 5.10. Trayectorias de las líneas de flujo magnético en un modelo 2D del engranaje magnético con topología axial.

Es importante resaltar que la modulación de las piezas polares ferromagnéticas sobre la distribución del campo magnético en el entrehierro, determinada con el MEC-RN, presenta una tendencia muy cercana a la obtenida con el modelo 3D-FEA. Estos resultados se pueden considerar que la complicada distribución de la densidad de flujo magnético en el entrehierro se puede predecir con una precisión aceptable utilizando un modelo más simple que el 3D-FEA pero mejorado mediante el método del MEC-RN con optimización MOGA.

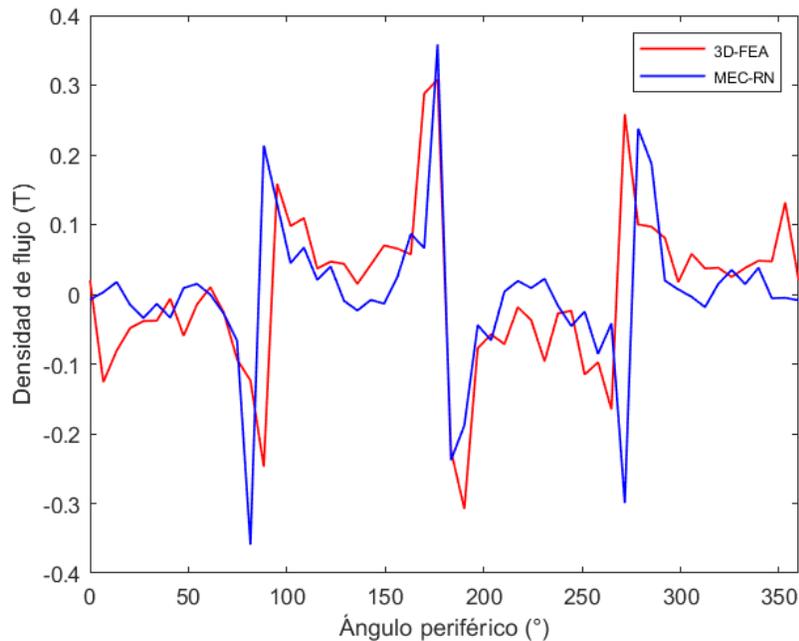


Figura 5.11. Densidad de flujo axial en el entrehierro adyacente al rotor de alta velocidad, en el engranaje magnético con topología axial.

Para satisfacer en su totalidad la función objetivo propuesta, se calcularon los pares generados en ambos rotores, los cuales se muestran en la Figura 5.12.

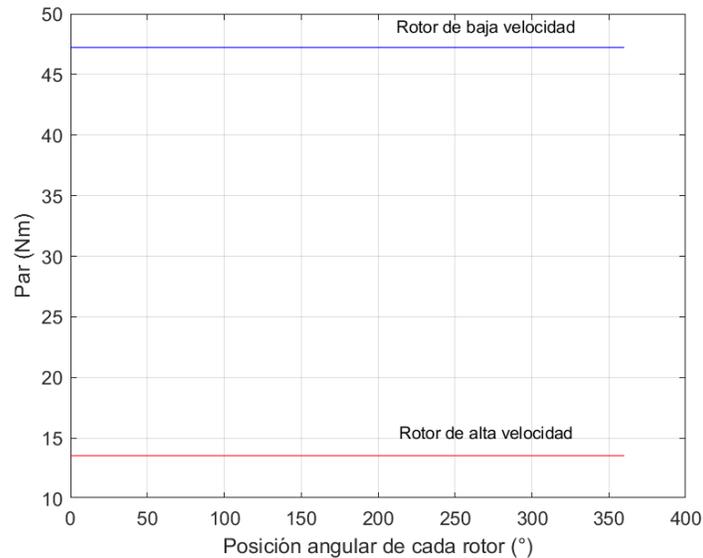


Figura 5.12. Pares calculados con el modelo MEC-RN optimizado del engranaje magnético con topología axial.

Los resultados de la optimización del modelo MEC-RN mostraron que para el rotor de alta velocidad el par es de 13.551 Nm, mientras que para el rotor de baja velocidad el par es de 47.220 Nm. A partir de estos valores, la relación de transmisión G_R calculada con el modelo optimizado MEC-RN es de 3.485. Es notable mencionar que este valor corresponde prácticamente al calculado con la ecuación (3.9) sustituyendo los pares obtenidos, con apenas una diferencia porcentual de 0.44% con respecto el valor nominal dado por p_l/p_h . Tal ecuación se muestra nuevamente a continuación:

$$G_R = \frac{T_l}{T_h} \quad (5.7)$$

Capítulo 6

Conclusiones

6.1 Resumen de las principales contribuciones

Esta tesis presenta una investigación con un enfoque centrado en el modelado y optimización de transmisiones magnéticas, bajo la perspectiva de una aplicación en aerogeneradores. El trabajo realizado confirma la viabilidad de utilizar a los engranajes magnéticos en los sistemas de transmisión de potencia mecánica, evitando así los inconvenientes causados por los arreglos empleados que están basados en engranajes mecánicos. Los resultados de esta investigación se han consolidado en tres publicaciones en una revista indizada. Las principales contribuciones pueden resumirse de la siguiente manera:

- 1) Se realizó una detallada revisión de la literatura sobre las tecnologías de los engranajes magnéticos que han sido investigados para su potencial uso en sistemas de transmisión de potencia mecánica. La revisión comprende el análisis de las causas principales que originan las fallas en los engranajes mecánicos, lo que impacta desfavorablemente en el sistema de transmisión. Como alternativa a esta problemática se consideran los engranajes magnéticos, por lo que en esta revisión se incluyó el estudio de la teoría básica de esta tecnología. Asimismo, se analizaron todas las topologías comprendiendo desde una perspectiva histórica y funcional hasta las diferentes configuraciones que han sido consideradas para incorporarlas a los engranajes magnéticos en los sistemas de transmisión de potencia mecánica. Un producto de esta investigación fue un artículo de revisión (*paper review*) publicado en una revista indizada.
- 2) El uso del método del circuito equivalente magnético con redes de reluctancia, formulado en ecuaciones de malla para modelar un engranaje magnético con topología axial en 2D. Todo esto con el propósito de obtener un diseño óptimo en un contexto de

aplicación para aerogeneradores. La optimización se realizó aplicando un esquema multiobjetivo con algoritmos genéticos. De la literatura se constató que, a la fecha, no existen publicaciones de trabajos que hayan considerado la idea de utilizar el circuito equivalente magnético con redes de reluctancias, basado en mallas y con optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos, para obtener un modelo óptimo de un engranaje magnético con topología axial. El modelo óptimo obtenido se validó con un modelo de elementos finitos utilizando el software comercial ANSYS-Maxwell. Los resultados fueron aceptables y bastante consistentes. Esta consistencia puede encontrar soporte en las gráficas de las Figuras 5.11 y 5.12. El porcentaje de coincidencia entre los resultados del modelo 3D-FEA y el modelo optimizado MEC-RN fue de 61.74%, con un tiempo de cómputo de 7s requerido por el modelo MEC-RN. En contraste, el tiempo de cómputo del modelo 3D-FEA en el paquete de software comercial se contabilizó en el orden de horas. Los pares calculados fueron de 47.220 Nm en el rotor de baja velocidad y de 13.551 Nm en el rotor de alta velocidad, dando como resultado una relación de transmisión de $T_l/T_h = 3.484$. Esto equivale a una diferencia de 0.44% con respecto al valor nominal calculado con base en la relación del número de pares de polos: $p_l/p_h = 3.5$. La evaluación del desempeño del MEC-RN muestra su capacidad para predecir, de una manera rápida y precisa, la valoración de los pares generados y de las densidades de flujo en los entrehierros. Al combinarse con un esquema de optimización con algoritmos genéticos (GA), el MEC-RN en 2D puede considerarse como una herramienta útil para las primeras etapas de diseño de los engranajes magnéticos. De esta investigación se publicó un segundo artículo en una revista indizada.

- 3) Por la relevancia del trabajo a nivel local, este proyecto de tesis deja abierta la posibilidad de seguir una línea de investigación sobre engranajes magnéticos que fortalecería el Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Eléctrica y a la Línea de Investigación de Potencia y Energías Renovables del TecNM Campus La Laguna. Con base en esta premisa, esta Línea de Investigación se convertiría en una de las principales precursoras en el estudio de los engranajes magnéticos a nivel nacional, por ahora con una incipiente presencia en el escenario internacional, tal y como lo muestran las publicaciones logradas en este proyecto de tesis.

6.2 Trabajo Futuro

Uno de los principales productos de la investigación en esta tesis, es la implementación y evaluación sistemática de una metodología de modelado óptimo para estudios de simulación de un engranaje magnético con topología axial. Los resultados demuestran que el modelo MEC es mucho más rápido que un modelo FEA de un paquete comercial, y bastante preciso para diseños prácticos. No obstante, aun cuando las contribuciones de esta tesis aportan al fortalecimiento de la Línea de Investigación de Potencia y Energías Renovables del TecNM Campus La Laguna en el conocimiento de los engranajes magnéticos, queda mucho trabajo por hacer para avanzar hacia una aplicación práctica. A continuación, se enumeran algunas sugerencias para investigaciones y trabajos futuros:

- 1) El modelo MEC optimizado se programó en MATLAB con una representación en 2D. Con este alcance se redujo la complejidad del problema y se privilegió la eficiencia computacional. Sin embargo, es conveniente extender el modelado 2D-MEC a una representación 3D-MEC, por dos razones básicas:
 - a) Un estudio de diseño paramétrico en diferentes escenarios con los modelos 2D-MEC y 3D-MEC, cuyos resultados sean comparados con los del modelado FEA correspondiente, permitiría precisar el grado en que el modelado con el MEC se puede establecer como una poderosa herramienta de análisis con ventajas importantes para el diseño para engranajes magnéticos.
 - b) En simulaciones con el FEA, se han demostrado discrepancias significativas entre los resultados 2D y 3D. Una de estas discrepancias se refiere a que existen argumentos de que las simulaciones de los engranajes magnéticos en 2D sobrevaloran el par de parada (*stall torque*), el cual es el par máximo que puede ser transferido por el modulador. Se cree que esta sobreestimación podría deberse a un fenómeno identificado como efecto final (*end-effect*) que usualmente no es posible analizarlo con el detalle requerido en el modelado 2D. El fenómeno de efecto final tiene un gran impacto en el rendimiento del engranaje magnético, y sólo con un modelado en 3D se puede realizar su análisis con suficiente precisión.

- 2) En el Capítulo 3 de esta tesis se identificó al par de detención (*cogging torque*) como una fuerza pulsante cuyas consecuencias se presentan regularmente como vibraciones mecánicas, ruido acústico y oscilaciones en la velocidad. Este par no contribuye a la producción de par útil y ocasiona efectos adversos en el rendimiento del engranaje magnético. Las causas que lo originan son ocasionadas, en gran medida, por la interacción entre los campos magnéticos en ambos rotores y la permeancia no uniforme en los entrehierros debido a la geometría de las piezas polares. Es por ello que entre los métodos más destacados para minimizarlo se encuentran la optimización del número de imanes permanentes y de las piezas polares ferromagnéticas del modulador, o bien, la modificación en sus geometrías. Existen sugerentes razones, fundamentalmente teóricas, de que una adecuada geometría en las formas de los polos de los imanes permanentes y de las piezas polares ferromagnéticas, da lugar a que la distribución de flujo en los entrehierros y el efecto de modulación mejoren sustancialmente, resultando en una transmisión de par mayor. Además, se cree que los parámetros de la modulación (p_l , n_s , p_h) en el engranaje magnético tienen una poderosa influencia en el *cogging torque*, en el *stall torque* y en la relación de transmisión G_R . Por la importancia de los efectos del *cogging torque*, este es un tema que debería investigarse como trabajo futuro en el engranaje magnético con flujo axial.
- 3) Como en todas las máquinas eléctricas y dispositivos electromecánicos, los engranajes magnéticos están sujetos a diferentes fenómenos físicos con una fuerte interacción que en muchos estudios no se considera. Con el fin de simplificar la solución del problema y de acuerdo con el enfoque con que se realice el análisis, en muchos casos sólo se realiza la simulación electromagnética sin incluir los efectos mecánicos y térmicos. Esto supone que los desplazamientos, las deformaciones y las temperaturas no tienen una influencia significativa en la transmisión magnética. Con el fin de llevar a cabo un estudio minucioso de la física del engranaje magnético, es indispensable obtener un modelo detallado que permita analizar los efectos magnéticos considerando al mismo tiempo las restricciones mecánicas y térmicas, para lograr así una simulación más completa.

- 4) Con la expectativa de construir un prototipo físico del engranaje magnético, resulta oportuno y pertinente incluir en el modelo MEC un algoritmo que permita considerar las características no lineales de la curva $B-H$ del material ferromagnético en una forma más realista. Los parámetros requeridos se obtendrían a partir de la información disponible de los materiales físicos que se emplearían para el prototipo. Se deberá incluir el modelado para la simulación de la desmagnetización de los imanes permanentes y de la histéresis en el material.

- 5) Este trabajo de tesis puede considerarse como una prueba teórica de concepto. Si los resultados obtenidos se logran potenciar con las sugerencias de trabajo futuro anteriores, se podría consolidar una metodología de diseño que sirva como guía para facilitar la construcción de un prototipo. Este es un paso importante que permitirá la validación del modelo óptimo basado en el MEC-RN mediante la comparación de su desempeño con mediciones realizadas en el prototipo físico. Actualmente, ya se planea la fabricación de un prototipo de engranaje magnético de flujo axial para su aplicación experimental en la transmisión de potencia mecánica en aerogeneradores de baja potencia.

Referencias

- [1] S. Teske, (Ed.). *Achieving the Paris Climate Agreement Goals (Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C)*, Springer Open, Cham: Springer Nature Switzerland, 2019. [E-book] Disponible: Springer Link. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-05843-2>
- [2] GWEC (Global Wind Energy Council), *Global Wind Report 2021*, (Brussels: March 2021). <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [3] IEA (International Energy Agency) (2021), *World Energy Outlook 2021*, IEA, Paris, Dec. 2021, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
- [4] IRENA (International Renewable Energy Agency) (2019), *Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects*, (A Global Energy Transformation paper), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. Oct. 2019.
- [5] GWEC (Global Wind Energy Council), *Supply Side Data 2019*, Market Intelligence Platform, (Brussels: May 2020), <https://gwec.net/wind-turbine-sizes-keep-growing-as-industry-consolidation-continues/>
- [6] N. Tazi, E. Châtelet, and Y. Bouzidi, "Using a hybrid cost-FMEA analysis for wind turbine reliability analysis," *Energies*, vol. 10, p. 276, 2017.
- [7] S. Sheng, H. Link, W. LaCava, J. van Dam, B. McNiff, P. Veers, and J. Keller, "Wind Turbine Drivetrain Condition Monitoring during GRC Phase 1 and Phase 2 Testing," Technical Report; National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO, USA, 2011.
- [8] Mohd. Hasan Ali, *Wind Energy Systems - Solutions for Power Quality and Stabilization*. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
- [9] H. Wanger, and J. Mathur, *Introduction to Wind Energy Systems – Basics, Technology and Operation*. Third Edition: Springer International Publishing AG 2018.
- [10] M. Lydia, A. Immanuel Selvakumar, S. Suresh Kumar, and G. Edwin Prem Kumar, "Advanced Algorithms for Wind Turbine Power Curve Modeling," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 4, No. 3, July 2013.

- [11] C. Fernandes, M. Hammami, R. C. Martins, and J. H. O. Seabra, "Power loss prediction: Application to a 2.5 MW wind turbine gearbox," *Proc. Inst. Mech. Eng. J J. Eng. Tribology*, vol. 230, no. 8, pp. 983-995, Aug. 2016.
- [12] M. Grujicic, V. Chenna, R. Galgalikar, J.S. Snipes, S. Ramaswami, and R. Yavari, "Wind-turbine gear-box roller-bearing premature-failure caused by grain-boundary hydrogen embrittlement: A multi-physics computational investigation." *Journal of materials engineering and performance*, vol. 23, pp. 3984-4001, 2014.
- [13] Shuangwen Sheng, "Gearbox Reliability Database: Yesterday, Today, and Tomorrow," *Wind Turbine Tribology Seminar*. Chicago Illinois. October 29-31, 2014. NREL/PR-5000-63106.
- [14] Shuangwen Sheng, "Wind Turbine Gearbox Reliability Database, Operation and Maintenance Research Update," *Drivetrain Reliability Collaborative Meeting*. Golden, Colorado. February 21-22, 2017. NREL/PR-5000-68347.
- [15] Ragheb, A. and Ragheb, M. "Wind turbine gearbox technologies," *Proceedings of the 1st International Nuclear and Renewable Energy Conference (INREC10)*, Amman, Jordan, March 21-24, 2010.
- [16] Shuangwen Sheng, "Wind Turbine Gearbox Reliability Database, Condition Monitoring, and Operation and Maintenance Research Update," *Drivetrain Reliability Collaborative Workshop*. Golden, Colorado. February 16-17, 2016. NREL/PR-5000-66028.
- [17] C. Su, Y. Yang, X. Wang, Z. Hu, "Failures analysis of wind turbines: Case study of a Chinese wind farm," In *Proceedings of the 2016 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Chengdu)*, Chengdu, China, October 19-21 2016, pp. 1-6.
- [18] M. D. Reder, E. Gonzalez, J.J. Melero, "Wind Turbine Failures-Tackling Current Problems in Failure Data Analysis," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 753, no. 7, 2016.
- [19] S. Rehman, M. Alam, and L. M. Alhems. "A review of wind-turbine structural stability, failure and alleviation," *Advances in Civil, Environmental, & Materials Research, ACEM18*, Songdo Convensia, Incheon, Korea, August 27 - 31, 2018.

- [20] S. Ozturk, V. Fthenakis, S. Faulstich, "Failure modes effects and criticality analysis for wind turbines considering climatic regions and comparing geared and direct drive wind turbines," *Energies*, vol. 11, no. 9, p. 2317, 2018.
- [21] Gang Shen, Dong Xiang, Kan Zhu, Li Jiang, Yinhua Shen, Yanlin Li, "Fatigue failure mechanism of planetary gear train for wind turbine gearbox," *Eng. Failure Anal.*, vol. 87, pp. 96-110, May 2018.
- [22] B. Corley, J. Carroll, and A. McDonald. "Thermal modelling of a small wind turbine gearbox for condition monitoring," *The Journal of Engineering*, 2019, vol. 2019 Iss, 18, pp. 5335-5339.
- [23] D.J. Willis, C. Niezrecki, D. Kuchma, E. Hines, S. Arwade, R.J. Barthelmie, M. DiPaola, P.J. Drane, C.J. Hansen, M. Inalpolat, J.H. Mack, A.T. Myers, M. Rotea, "Wind Energy Research: State-of-the-Art and Future Research Directions," *Renewable Energy*, vol. 125, pp. 133-154, 2018.
- [24] T. Yuan, Z. Sun, and S. Ma, "Gearbox Fault Prediction of Wind Turbines Based on a Stacking Model and Change-Point Detection," *Energies*, vol. 12, p. 4224, 2019.
- [25] U. Bhardwaj, A. P. Teixeira, and C. Guedes Soares, "Reliability prediction of an offshore wind turbine gearbox," *Renewable Energy* 141 (2019): 693-706.
- [26] Joshua Earnest, and Sthuthi Rachel, *Wind Power Technology*. Third Edition: PHI Learning Private Limited, Delhi-110092, 2019.
- [27] G.A.M. Van Kuik *et al.*, "Long-term research challenges in wind energy - a research agenda by the European Academic of Wind Energy," *J. Wind Energ. Sci*, vol. 1, no.1, pp. 1-39, Feb. 2016.
- [28] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha and J. A. Ferreira, "Review of generator systems for direct-drive wind turbines," in *2008 Proc. European Wind Energy Conf.*, Brussels, April 2008.
- [29] D. McMillan and G. W. Ault, "Techno-economic comparison of operational aspects for direct drive and gearbox-driven wind turbines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 25, no.1, pp. 191-198, March 2010.

- [30] U. B. Akuru and M. J. Kamper, "Contemporary wind generators," *2014 International Conference on the Eleventh industrial and Commercial Use of Energy*, Cape Town, 2014, pp. 1-8.
- [31] Magnomatics®. "Technology for renewable energy." [magnomatics.com. http://www.magnomatics.com/pages/applications/renewable-energy.htm](http://www.magnomatics.com/pages/applications/renewable-energy.htm) (Acceso en mayo 24, 2020).
- [32] R. L. Norton, *Design of Machinery: An Introduction to the Synthesis and Analysis of Mechanisms and Machines*. 2nd Ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1992.
- [33] O. Vinogradov, O. *Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms*. Boca Raton, USA: CRC Press LCC, 2000.
- [34] J. E. Shigley y J. J. Uicker, *Teoría de Máquinas y Mecanismos*. México: McGraw-Hill/Interamericana, 1998.
- [35] H. Kojooyan and A. Radan, "Wind Turbine Model and Maximum Power Tracking Strategy." In *Wind Turbines*, I. Al-Bahadly. Ed., Rijeka, Croatia: InTech, 2011, pp. 596–597.
- [36] Z. Lévai, "Structure and Analysis of Planetary Gear Trains," *Jnl. Mechanisms*, vol. 3, pp. 131-148/Pergamon Press 1968/Printed in Great Britain.
- [37] W. Tong, Ed. *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*. Ashurst, Southampton, UK: WIT Press, 2010.
- [38] NEXEN. (2018). "Precision Motion Control. Application & Selection Guide." Acceso en junio 15, 2020. [Online]. Disponible: <https://www.nexengroup.com/nxn/files/literatures/21282.pdf>.
- [39] TRANSCYKO. "Planetary Gearbox." <https://transcyko.com/products/planetary-gearbox/> (Acceso en julio 25, 2020).
- [40] M. A. Muraro, F. Koda, U. Reisdorfer Jr., and C. H. da Silva, "The influence of contact stress distribution and specific film thickness on the wear of spur gears during pitting tests," *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, vol. 34, no. 2, pp. 135-144, Apr.-Jun. 2012.
- [41] D. Jelaska, *Gears and Gear Drives*. Sussex, U.K.: Wiley & Sons Ltd., 2012.

- [42] H. Dong, Z.-Y. Liu, L.-L. Duan, and Y.-H. Hu, "Research on the sliding friction associated spur-face gear meshing efficiency based on the loaded tooth contact analysis," *PLoS ONE*, vol.13, no. 6, Jun. 2018 Jun 26.
- [43] J. I. Pedrero, M. Pleguezuelos, and M. B. Sánchez, "Study of the influence of the design parameters on the efficiency of spur gears," in *Proc. International Gear Conference 2014*, Lyon, France, 26-28 August, 2014. pp. 774-783.
- [44] J. D. Smith, *Gear Noise and Vibration*, 2nd ed. New York, NY, USA: Marcel Dekker, Inc., 2003.
- [45] F. Concli and C. Gorla, "Analysis of the Power Losses in Geared Transmissions – Measurements and CFD Calculations Based on Open-Source Codes," in *Proc. International Gear Conference 2014*, Lyon, France, 26-28 August, 2014. pp. 1131-1140.
- [46] F. K. Choy, V. Polyshchuk, J. J. Zakrajsek, R. F. Handschuh, and D. P. Townsend, "Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system," *Tribology International*, vol. 29, no. 1, pp. 77-83, 1996.
- [47] H. Ma, J. Zeng, R. Feng, X. Pang, Q. Wang, and B. Wen, "Review on dynamics of cracked gear systems," *Engineering Failure Analysis*, vol. 55, pp. 224-245, 2015.
- [48] M. S. Abbes, T. Fakhfakh, M. Haddar, and A. Maalej, "Effect of transmission error on the dynamic behaviour of gearbox housing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 34, pp. 211–218, 2007.
- [49] J. Tuma, "Gearbox Noise and Vibration Prediction and Control." *Int. J. of Acoust. and Vib.*, vol. 14, no. 2, pp. 1-11, 2009.
- [50] C. G. Armstrong, "Power Transmitting Device," U.S. Patent 687292, Nov. 26, 1901.
- [51] A. H. Neuland, "Apparatus for Transmitting Power," U.S. Patent 1171351, Feb. 8, 1916.
- [52] H. T. Faus, "Magnetic Gearing," U.S. Patent 2243555, May. 27, 1941.
- [53] H. Hurvitz, "Magnetic Gearing System," U.S. Patent 2548373, Apr. 10, 1951.

- [54] J. M. Cluwen and J. Smith, "Magnetic Circuits and Devices," U.S. Patent 2722617, Nov. 1, 1955.
- [55] S. Rand, "Magnetic Transmission System," U.S. Patent 3523204, Aug. 4, 1970.
- [56] M. Hetzel, "Low friction miniature gear drive for transmitting small forces, and method of making same," U.S. Patent 3792578, Feb. 19, 1974.
- [57] G. A. Reese, "Magnetic Gearing Arrangement," U. S. Patent 3301091. Jan. 31, 1967.
- [58] T. B. Martin, "Magnetic Transmission," U. S. Patent 3378710. Apr. 16, 1968.
- [59] K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, "Non-contact magnetic gear for micro transmission mechanism," in [1991] *Pro. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, Nara, Japan, 1991, pp. 125-130.
- [60] X. Li, K.-T. Chau, M. Cheng, and W. Hua, "Comparison of magnetic-gear permanent-magnet machines," *Prog. in Electromagn. Res.*, vol. 133, pp. 177-198, 2013.
- [61] Y. D. Yao, D. R. Huang, C. M. Lee, S. J. Wang, D. Y. Chiang, and T. F. Ying, "Magnetic coupling studies between radial magnetic gears," in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp. 4236-4238, Sept. 1997.
- [62] Y. D. Yao, D. R. Huang, C. C. Hsieh, D. Y. Chiang, and S. J. Wang, "Simulation study of the magnetic coupling between radial magnetic gears," in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 2, pp. 2203-2206, March 1997.
- [63] E. P. Furlani, "A two-dimensional analysis for the coupling of magnetic gears," in *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 33, no. 3, pp. 2317-2321, May 1997.
- [64] E. P. Furlani, "Analytical analysis of magnetically coupled multipole cylinders," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 33, pp. 28-33, 2000.
- [65] J. F. Charpentier and G. Lemarquand, "Mechanical behavior of axially magnetized permanent-magnet gears," in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 3, pp. 1110-1117, May. 2001.

- [66] M. Okano, K. Tsurumoto, S. Togo, N. Tamada, and S. Fuchino, "Characteristics of the magnetic gear using a bulk high-Tc superconductor," in *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 12, no. 1, pp. 979-983, March 2002.
- [67] Y. Zhiyi and Z. Han. "Torque calculation and analysis of permanent-magnetic gears." *Proc Int. ANSYS Conf.*, Pittsburgh, PA, USA, 2002.
- [68] J. Rizk, M. H. Nagrial, and A. Hellany, "Analysis and design of magnetic torque couplers and magnetic gears," *The 4th Int. Power Electron and Motion Control Conf., 2004. IPEMC 2004*, vol. 3. Xi'an, China, 2004, pp. 1799-1804.
- [69] F. T. Jorgensen, T. O. Andersen, and P. O. Rasmussen, "Two dimensional model of a permanent magnet spur gear," *Fourtieth IAS Annu. Meeting. Conf. Rec. of the 2005 Industry Appl. Conf., 2005*, vol. 1, Kowloon, Hong Kong, 2005, pp. 261-265.
- [70] G. Muruganandam, S. Padma, and P. Selvakumar. "Torque Analysis of Magnetic Spur Gear with Different Configurations," *Int. J. Elect. Eng.*, vol. 5, no. 7, pp. 843-852, 2012.
- [71] K. Min, J. Choi, H. Cho, and H. Shin, "Torque analysis of magnetic spur gear with halbach magnetized permanent magnets using an analytical method," *2015 IEEE Int. Magn. Conf. (INTERMAG)*, Beijing, 2015, pp. 1-1.
- [72] Y.-C. Wu and C.-W. Wang, "Transmitted torque analysis of a magnetic gear mechanism with rectangular magnets," *Appl. Math. Inf. Sci.*, vol. 9, no. 2, pp. 1059-1065, 2015.
- [73] K. Aiso, K. Akatsu, and Y. Aoyama, "A Novel Magnetic Multiple Spur Gear for High-Speed Motor System," *2018 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE)*, Portland, OR, USA, Sept. 23-27, 2018, pp. 3310-3316.
- [74] T.-K. Bang, K.-H. Shin, M.-M. Koo, C. Han, H.-W. Cho, and J.-Y. Choi, "Measurement and Torque Calculation of Magnetic Spur Gear Based on Quasi 3-D Analytical Method," in *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, pp. 1-5, Apr. 2018, Art no. 0600305.
- [75] M. Baermann, "Magnetic Worm Drive," U. S. Patent 3814962. Jun. 4, 1974.

- [76] S. Kikuchi, and K. Tsurumoto, "Design and Characteristics of a New Magnetic Worm Gear Using Permanent Magnet," *IEEE Transactions of Magnetics*, Vol. 29, No. 6, November 1993.
- [77] K. Tsurumoto, "Improvement of the Transmitted Torque Characteristics of a Magnetic Bevel Gear," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 1994, vol. 18, no. 2, pp.563-566.
- [78] K. Tsurumoto, "Analysis of the Reversible Rotation and Power-Transmitting Performance of a Magnetic Bevel Gear," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 1997, vol. 21, no. 4_2, pp.821-824.
- [79] M. F. Leas, "Magnetic Spiral Bevel Gear," U. S. Patent 2016/0380525 A1. Dec. 29, 2016.
- [80] Y. D. Yao, D. R. Huang, C. C. Hsieh, D. Y. Chiang, S. J. Wang, and T.F. Ying "The Radial Magnetic Coupling Studies of Perpendicular Magnetic Gears," *IEEE Transactions of Magnetics*, vol. 32, no. 5, September 1996.
- [81] G. Muruganandam, S. Padma and P. Selvakumar, "Design and Implementation of a Novel Magnetic Bevel Gear," *CEAI*, vol. 15, no. 2, pp. 30-37, 2013.
- [82] Gang-Hyeon Jang, Chang-Woo Kim, Sung-Won Seo, Kyung-Hun Shin, Ick-Jae Yoon, and Jang-Young Choi, "Torque Characteristic Analysis and Measurement of Magnetic Rack–Pinion Gear Based on Analytical Method," *IEEE Transactions of Magnetics*, vol. 55, no. 7, July 2019.
- [83] K. Tsurumoto and Tanaka, Y. "Prototype Production of New Magnetic Planetary and Differential Gears and Performance Characteristics Test," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2002, vol. 26, no. 4, pp.703-706.
- [84] K. Tsurumoto, M. Haneda, K. Yamanaka, Y. Oikawa, and T. Chiba, "Performance Characteristics of Magnetic Planetary and Differential Gears for Accelerators in Which the Whole Depth of Outring Gear Has Been Corrected," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2006, vol. 30, no. 2, pp.264-267.
- [85] K. Yamanaka, and K. Tsurumoto, "Improvement of Performance Characteristics of Magnetic Planetary and Differential Gearing with Twin Sun Gears," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2007, vol. 31, no. 2, pp.139-142.

- [86] M. Haneda and K. Tsurumoto, "Trial Production and Research on Magnetic Planetary and Differential Gearing for Accelerator Using NdFeB Magnet," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2007, vol. 31, no. 2, pp.135-138.
- [87] T. Togashi, Y. Ota, M. Miyazawa, O. Saito, and K. Tsurumoto, "A Study of Output Speed Stability Control Using the Magnetic Planetary Gears with the Functional 2 Inputs," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2012, vol. 36, no. 3, pp.263-267.
- [88] Cheng-Chi Huang, Mi-Ching Tsai, David G. Dorrell, and Bor-Jeng Lin, "Development of a Magnetic Planetary Gearbox," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 3, pp. 403-412, March 2008.
- [89] O Gutfleisch, "Controlling the properties of high energy density permanent magnetic materials by different processing routes," *J. Phys. D: Appl. Phys.* vol. 33, no. 17, pp. R157–R172, September 2000.
- [90] S. Constantinides, "The Demand for Rare Earth Materials in Permanent Magnets," Presentation to the *51st Annual Conference of Metallurgists*, Niagara Falls, Ontario, Canada, - Arnold Magnetics (Rochester, New York, USA), Sept. 30 – Oct 3, 2012.
- [91] Mu Chen, Kwok-Tong Chau, Christopher H. T. Lee, and Chunhua Liu, "Design and Analysis of a New Axial-Field Magnetic Variable Gear Using Pole-Changing Permanent Magnets," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 153, pp. 23-32, 2015.
- [92] John J. Croat, *Rapidly Solidified Neodymium-Iron-Boron Permanent Magnets*. Woodhead Publishing, Elsevier Ltd. 2018.
- [93] C-Ch Huang, "Power Magnetic Planetary Gear Set," U. S. Patent 8810099B2, Aug. 19, 2014.
- [94] Mi-Ching Tsai and Cheng-Chi Huang, "Development of a Variable-Inertia Device with a Magnetic Planetary Gearbox," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 16, no. 6, December 2011.
- [95] N. Niguchi and K. Hirata, "Transmission Torque Analysis of a Novel Magnetic Planetary Gear Employing 3-D FEM," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 2, February 2012.

- [96] F. Kong, X. Zhu, L. Quan, Y. Ge, and L. Qiao, "Optimizing Design of Magnetic Planetary Gearbox for reduction of cogging torque," *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 15-18 Oct. 2013.
- [97] N. Niguchi, K. Hirata, and Masahiko Sakai, "High Performance Hybrid-Type Magnetic Planetary Gear," *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, August 4-7, Takamatsu, Japan.
- [98] Renzhong Zhang, Xiaoyong Zhu¹, and Long Chen, "Design of a New Magnetic-Planetary-gearred Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Motor for Electric Vehicles," *Proceedings of 2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Oct. 22-25, 2014, Hangzhou, China.
- [99] T. M. Frandsen, "Motor Integrated Permanent Magnet Gear," Ph.D. dissertation, Dept. Energy, Technol., Aalborg Univ., Aalborg Øst, Denmark, 2016.
- [100] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2844–2846, July 2001.
- [101] S. Gerber, "Evaluation and Design Aspects of Magnetic Gears and Magnetically Geared Electrical Machines," Ph.D. dissertation, Department of Electrical and Electronic Engineering, Stellenbosch Univ., Matieland, South Africa, 2015.
- [102] N. W. Frank, "Analysis of the Concentric Planetary Magnetic Gear," Ph.D. dissertation, Office of Graduate Studies, Texas A&M Univ., College Station, Tx, USA, 2011.
- [103] O. Molokanov, P. Kurbatov, P. Dergachev, and A. Alami, "Dynamic Model of Coaxial Magnetic Planetary Gear," *Proceedings of 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Oct. 25-28, 2015, Pattaya City, Thailand.
- [104] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, Analysis and Realisation of a High-Performance Magnetic Gear," *IEE Proc. Elec. Power Appl.*, vol. 151, no. 2, pp. 135-143, March 2004.
- [105] M. C. Gardner, B. E. Jack, M. Johnson, and H. A. Toliyat. "Comparison of Surface Mounted Permanent Magnet Coaxial Radial Flux Magnetic Gears Independently Optimized for Volume, Cost, and Mass," *In: IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2237-2245, May. 2018.

- [106] Jian, L., K. T. Chau, Y. Gong, J. Z. Jiang, C. Yu, and W. Li, "Comparison of coaxial magnetic gears with different topologies," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 10, 4526-4529, 2009.
- [107] Li, X., 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*, 1-4, Beijing, China, 2011.
- [108] K. Atallah, J. Wang, and D. Howe, "A high-performance linear magnetic gear," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, 10N516-1-3, 2005.
- [109] R. C. Holehouse, K. Atallah, and J. Wang, "Design and Realization of a Linear Magnetic Gear," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 4171-4174, Oct. 2011.
- [110] W. Li, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "Application of Linear Magnetic Gears for Pseudo-Direct-Drive Oceanic Wave Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, 2624-2627, Oct. 2011.
- [111] N. Feng, H. Yu, L. Huang, W. Zhong, and Z. Shi, "Performance Analysis of a Magnetic-Geared Linear Permanent Magnet Generator for Wave Energy Conversion," 2015 IEEE Magnetics Conference (INTERMAG), 11-15, May. 2015, Beijing, China.
- [112] W. Li, K. T. Chau, C. H. T. Lee, T. W. Ching, M. Chen, and J. Z. Jiang, "A New Linear Magnetic Gear with Adjustable Gear Ratios and its Application for Direct-Drive Wave Energy Extraction. *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 199–208, Dec. 2016.
- [113] C. Liu, H. Zhu, R. Dong, S. Zhou, and L. Huang, "Sensitivity Analysis and Optimal Design of a Linear Magnetic Gear for Direct-Drive Wave Energy Conversion," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 73983–73992, Jun. 2019.
- [114] Mezani, S., K. Atallah, and D. Howe, "A high-performance axial-field magnetic gear," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, 08R303-1-3, 2006.
- [115] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a High-Performance Magnetic Gear," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 3, pp. 764-770, 2005.

- [116] K. K. Uppalapati, J. Z. Bird, M. Calvin, J. Wright, J. Pitchard, and W. Williams, "A Magnetic Gearbox with an Active Region Torque Density of 239Nm/L," in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1422-1428, 2014.
- [117] K. Halbach, "Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 169, 1-10, 1980.
- [118] J.-S. Choi and J. Yoo, "Design of a Halbach magnet array based on optimization techniques," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 10, 2361-2366, 2008.
- [119] L. Jian, and K.T. Chau, "A coaxial magnetic gear with Halbach permanent-magnet arrays," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, no. 2, pp. 319-328, 2010.
- [120] T. Fujita, Y. Ando, K. Nagaya, M. Oka, T. Todaka, M. Enokizono, and K. Sugiura, "Surface magnet gears with a new magnet arrangement and optimal shape of stationary pole pieces," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 5, no. 6, pp. 243-249, 2013.
- [121] D. Som, K. Li, J. Kadel, J. Wright, S. Modaresahmadi, J. Z. Bird, and W. William, "Analysis and testing of a coaxial magnetic gearbox with flux concentration Halbach rotors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 11, pp. 1-6, 2017.
- [122] X. Liu, K.T. Chau, J.Z. Jiang, and C. Yu, "Design and analysis of interior-magnet outer-rotor concentric magnetic gears," *J. Appl. Phys.*, vol. 105, no. 7, pp. 07F101-1-07F101-3, 2009.
- [123] J.-X. Shen, H.-Y. Li, H. Hao, and M.-J. Jin, "A coaxial magnetic gear with consequent-pole rotors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 1, pp. 267-275, Mar. 2017.
- [124] L. Jing, J. Gong, Z. Huang, T. Ben, and Y. Huang, "A new structure for the magnetic gear," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 75550-75555, May. 2019.
- [125] N. W. Frank and H. A. Toliyat, "Analysis of the concentric planetary magnetic gear with strengthened stator and interior permanent magnet inner rotor," *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1652-1660, Jul.-Aug. 2011.
- [126] N. W. Frank, S. Pakdelian, and H. A. Toliyat, "Passive suppression of transient oscillations in the concentric planetary magnetic gear," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 933-939, Sept 2011.

- [127] A.S. Abdel-Khalik, S. Ahmed, and A. Massoud. "A bearingless coaxial magnetic gearbox," in: *Alexandria Engineering Journal*, 53.3, pp. 573–582, 2014.
- [128] Y. Liu, S. L. Ho, and W. N. Fu, "A novel magnetic gear with intersecting axes," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1–4, Nov 2014.
- [129] K. Aiso and K. Akatsu, "A novel reluctance magnetic gear for high-speed motor," in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1–7, Sept 2016,
- [130] L. Yong, X. Jingwei, P. Kerong, and L. Yongping, "Principle and simulation analysis of a novel structure magnetic gear," in *2008 International Conference on Electrical Machines and Systems*, Wuhan, pp. 3845-3849, Oct. 2008.
- [131] W. Bomela, J. Z. Bird, and V. M. Acharya, "The performance of a transverse flux magnetic gear," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 1, pp. 1-4, Jan. 2014.
- [132] M. Desvaux, M. Chauwin, B. Multon, S. Sire, and H.B. Ahmed, "Experimental validation of a transverse flux magnetic gear," *J. Magn. Mater.*, 536, 168139, 2021.
- [133] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, and J. A. Ferreira, "Ring-shaped transverse flux PM generator for large direct-drive wind turbines," in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, pp. 61-66, 2009.
- [134] I. Hasan, T. Husain, M. W. Uddin, Y. Sozer, I. Husain, and E. Muljadi, "Analytical modeling of a novel transverse flux machine for direct drive wind turbine applications," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 2161-2168, 2015.
- [135] G. Peng, J. Wei, Y. Shi, Z. Shao, and L. Jian, "A novel transverse flux permanent magnet disk wind power generator with H-shaped stator cores," *Energies*, 11 (4): 1-19, 2018.
- [136] V. Ballestín-Bernad, J.S. Artal-Sevil, and J.A. Domínguez-Navarro, "A Review of Transverse Flux Machines Topologies and Design," *Energies*, 14, 7173, 2021.
- [137] S. Pakdelian, N. W. Frank, and H. A. Toliyat, " Analysis and Design of the Trans-Rotary Magnetic Gear," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3340-3344, Raleigh, NC, USA. 15-20 Sept. 2012.

- [138] S. Pakdelian, Y. Deshpande, and H. A. Toliyat, "An Electric Machine Integrated with Trans-Rotary Magnetic Gear," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3356-3362, Raleigh, NC, USA. 15-20 Sept. 2012.
- [139] S. Pakdelian and H. A. Toliyat, "Design Aspects of the Trans-Rotary Magnetic Gear," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1720-1725, Montreal, QC, Canada, 25-28 Oct. 2012.
- [140] S. Pakdelian, N. W. Frank, and H. A. Toliyat, "Principles of the Trans-Rotary Magnetic Gear," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 2, pp. 883-889, Feb. 2013.
- [141] S. Pakdelian and H. A. Toliyat, "Trans-Rotary Magnetic Gear for Wave Energy Application," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-4, San Diego, CA, USA. 22-26 July 2012.
- [142] S. Pakdelian and H. A. Toliyat, "Dynamic Modeling of the Trans-Rotary Magnetic Gear for the Point-Absorbing Wave Energy Conversion Systems," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3163-3170, Pittsburgh, PA, USA. 14-18 Sept. 2014.
- [143] J. Rens, R. Clark, S. Calverley, K. Atallah, and D. Howe, "Design, analysis and realization of a novel magnetic harmonic gear," *2008 18th International Conference on Electrical Machines*, pp. 1-4, Antalya, Turkey, 6-9 Sept. 2008.
- [144] J. Rens, K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "A Novel Magnetic Harmonic Gear," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 1, pp. 206-212, Jan./Feb. 2010.
- [145] F. T. Jorgensen, T. O. Andersen, and P. O. Rasmussen, "The cycloid permanent magnetic gear," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 6, pp. 1659-1665, Nov./Dec., 2008.
- [146] F-Y., Primero y R. Chicurel Uziel, "Modelo cinemático de reductor cicloidal magnético," *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, vol. 6, no. 1, pp. 25-29, 2017.
- [147] R. Chicurel Uziel, "Transmisiones de Engranés Magnéticos," en *Gaceta del Instituto de Ingeniería UNAM*, núm. 126, pp. 5-6, Jul.-Ago., 2017.

- [148] M. C. Gardner, M. Johnson, and H. A. Toliyat, "Comparison of Surface Permanent Magnet Coaxial and Cycloidal Radial Flux Magnetic Gears," *IEEE Energy Conv. Con. & Expo. (ECCE)*, Portland, OR, Sept. 23-27, 2018.
- [149] J. F. Gieras, *Permanent magnet motor technology: design and applications*, 3rd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.
- [150] L. Jian, G. Xu, Y. Gong, J. Song, J. Liang, and M. Chang, "Electromagnetic Design and Analysis of a Novel Magnetic-Gear-Integrated Wind Power Generator Using Time-Stepping Finite Element Method," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 113, pp. 351-367, 2011.
- [151] L. N. Jian, K. T. Chau, Dong Zhang, J. Z. Jiang, Zheng Wang, "A Magnetic-Geared Outer-Rotor Permanent-Magnet Brushless Machine for Wind Power Generation," In *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 45, No. 3, May/June 2009.
- [152] K. Atallah, J. Wang, S. D. Calverley, and S. Duggan, "Design and operation of a magnetic Continuously Variable Transmission," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 4, Jul./Aug., 2012.
- [153] D. Z. Abdelhamid and A. M. Knight, "Performance of a high torque density induction motor with an integrated magnetic gear," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 538-544, 2016.
- [154] Z. Q. Zhu, H. Y. Li, R. Deodhar, A. Pride, and T. Sasaki, "Recent developments and comparative study of magnetically geared machines," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, no. 1, pp. 13-22, March 2018.
- [155] K. Atallah, J. Rens, S. Mezani, and D. Howe, "A Novel 'Pseudo' Direct-Drive Brushless Permanent Magnet Machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 11, Nov. 2008.
- [156] M. Bouheraoua, J. Wang and K. Atallah, "Rotor position estimation of a Pseudo Direct Drive PM machine using extended Kalman filter," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 292-299, 2015.
- [157] Magnomatics®. "Pseudo Direct Drive," [magnomatics.com](https://www.magnomatics.com/pseudo-direct-drive).
<https://www.magnomatics.com/pseudo-direct-drive>.

- [158] Magnomatics®. "Wind Turbine Generator," magnomatics.com.
<https://www.magnomatics.com/post/wind-turbine-generator>
- [159] G. Q. Bao, K. F. Mao, "A Wind Energy Conversion System with Field Modulated Magnetic Gear," *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-4, 2011.
- [160] A. Penzkofer and K. Atallah, "Analytical Modeling and Optimization of Pseudo-Direct Drive Permanent Magnet Machines for Large Wind Turbines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 12, pp. 1-14, Dec. 2015, Art no. 870081.
- [161] C. G. C. Neves, A. F. Flores Filho and D. G. Dorrel, "Design of a Pseudo Direct Drive for Wind Power Applications," *2016 International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (ICAUMS)*, pp. 1-5. 2016.
- [162] P. M. Tlali, S. Gerber, and R.-J. Wang, "Optimal Design of an Outer-Stator Magnetically Geared Permanent Magnet Machine," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 2, pp. 1-10, Feb. 2016, Art no. 8100610.
- [163] A. Penzkofer and K. Atallah, "Scaling of Pseudo Direct Drives for Wind Turbine Application," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 52, no. 7, pp. 1-5, July 2016, Art no. 8700205.
- [164] M. Desmedt, J. Dong, F. Wani, P. Bauer and H. Polinder, "Electromechanical Dynamics Analysis of Pole-Piece Rotors in Pseudo Direct-Drive Wind Turbine Generators," *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1889-1895, 2020.
- [165] Y. Wang, S. L. Ho, W. N. Fu and J. X. Shen, "A Novel Brushless Doubly Fed Generator for Wind Power Generation," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 4172-4175, Nov. 2012.
- [166] P. Vyas and M.-W. Waszak, "Magnetically Geared Generator," U.S. Patent 2010/0052323A1, Mar. 2010.
- [167] Y. Jiang, J. Zhang and T. Li, "A Segmented Brushless Doubly Fed Generator for Wind Power Applications," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 3, pp. 1-4, March 2018, Art no. 8700104.

- [168] L. Jian, J. Liang, Y. Shi, and Guo Xu, "A Novel Double-Winding Permanent Magnet Flux Modulated Machine for Stand-Alone Wind Power Generation," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 142, 275-289, 2013.
- [169] X. Li, K. T. Chau, and M. Cheng, "Analysis design and experimental verification of a field-modulated permanent-magnet machine for direct-drive wind turbines," *IET Elect. Power Appl.*, vol. 9, no. 2, pp. 150-159, Feb. 2015.
- [170] L. Fang, D. Li, T. Zou, and R. Qu, "Flux Modulation Magnet Coupler for Wind Generation System," *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1992-1998, 2020.
- [171] M. Desvaux, R. Le Goff Latimier, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S. Sire, "Design and optimization of magnetic gears with arrangement and mechanical constraints for wind turbine applications", *Proc. 11th Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies (EVER)*, pp. 1-8, Monte Carlo, Monaco, 2016.
- [172] J. Wang, L. Qian, S. Xu, and R. Mo, "Analysis of Electromagnetic Performance of Modulated Coaxial Magnetic Gears Used in Semi-Direct Drive Wind Turbines," *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineer*, vol. 118, no. 2 pp. 251-264, 2021.
- [173] N. W. Frank and H. A. Toliyat, "Gearing ratios of a magnetic gear for wind turbines," in *Proceeding of 2009 IEEE international electric machines and drives conference (IEMDC)*, pp. 1224-1230, Miami, USA, Jun. 2009.
- [174] S. Abdel-Khalik, A. Elserougi, S. Ahmed, A. Massoud, "A wind turbine architecture employing a new three port magnetic gear box," *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1917-1924, 2012.
- [175] K. S. Belkhir and N. Khenfer, "Magnetic gear generator for wind energy," *Przegald Elektrotechniczny*, vol. 5, pp. 72-75, 2013.
- [176] E. Gouda, "A New Design of Magnetic Gear for Wind Turbine," *Mansoura Engineering Journal, (MEJ)*, Vol. 39, Issue 1, March 2014.
- [177] A. Penzkofer and K. Atallah, "Optimisation of magnetic gears for large wind turbines," in *Proceeding of 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp. 962-967, 2015.

- [178] M. Desvaux, R. Le Goff Latimier, B. Multon, S. Sire, and H. Ben Ahmed, "Analysis of the dynamic behaviour of magnetic gear with nonlinear modelling for large wind turbines," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1332-1338, 2016.
- [179] S. N. Udalov, A. A. Achitaev, and A. G. Pristup, "Investigations of a magnetic gear for application in wind turbines," *2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, pp. 166-171, 2016.
- [180] M. Desvaux, B. Multon, S. Sire, and H. Ben Ahmed, "Analytical iron loss model for the optimization of magnetic gear," *2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*, pp. 1-8, 2017.
- [181] M. Desvaux, B. Traullé, R. Le Goff Latimier, S. Sire, B. Multon, and H. Ben Ahmed, "Computation Time Analysis of the Magnetic Gear Analytical Model," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 53, no. 5, pp. 1-9, May 2017, Art no. 7000409.
- [182] K. Li, J. Wright, S. Modaresahmadi, D. Som, W. Williams, and J. Z. Bird, "Designing the first stage of a series connected multistage coaxial magnetic gearbox for a wind turbine demonstrator," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 1247-1254, 2017.
- [183] M. Desvaux, B. Multon, H. B. Ahmed, S. Sire, A. Fasquelle, and D. Laloy, "Gear ratio optimization of a full magnetic indirect drive chain for wind turbine applications," *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pp. 1-9, 2017.
- [184] M. Desvaux, B. Multon, H. B. Ahmed, and S. Sire, "Magneto-mechanical sizing of magnetic gear laminated pole pieces for Wind Turbine Applications," *The International Conference on Wind Energy Harvesting*, Coimbra, Portugal, 20-21 April, 2017, Paper 309.
- [185] M. Desvaux, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S. Sire, "Supporting the laminated ferromagnetic pole pieces in a magnetic gear: A structure behaviour analysis from a multibody model" in *Mechanisms and Machine Science*, Cham, Switzerland:Springer, vol. 54, pp. 85-94, 2017.
- [186] M. Desvaux, H.vBildstein, B. Multon, H. Ben Ahmed, S. Sire, A. Fasquelle, and D. Laloy, "Magnetic losses and thermal analysis in a magnetic gear for wind

- turbine," *2018 Thirteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pp. 1-7, 2018.
- [187] M. Desvaux, B. Multon, H. Ben Ahmed, and S Sire, "Magneto-mechanical analysis of magnetic gear pole pieces ring from analytical models for wind turbine applications," *Wind Engineering*, vol. 42, no. 4, pp. 276-285, 2018.
- [188] R. Zeinali and O. Keysan, "A rare-earth free magnetically geared generator for direct-drive wind turbines", *Energies*, vol. 12, no. 3, 2019.
- [189] B. Kim, "Design Method of a Direct-Drive Permanent Magnet Vernier Generator for a Wind Turbine System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 5, pp. 4665-4675, Sept.-Oct. 2019.
- [190] H. Fang, Y. Wang, and X. Cai, "Design of Magnetic Gear Integrated Generator with Mixed Magnetization and Eccentric Pole Method for Wave Energy Conversion," *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1-6, 2019.
- [191] K. Li, S. Modaresahmadi, W. Williams, J. Wright, D. Som, and J. Z. Bird, "Designing and Experimentally Testing a Magnetic Gearbox for a Wind Turbine Demonstrator," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no. 4, pp. 3522-3533, July-Aug. 2019.
- [192] K. Li, S. Modaresahmadi, W. Williams, J. Bird, J. Wright, and D. Barnett, "Electromagnetic Analysis and Experimental Testing of a Flux Focusing Wind Turbine Magnetic Gearbox," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 3, pp. 1512-1521, Sept. 2019.
- [193] Z. Gaojia and L. Longnv, "Design Optimization of a Direct-Drive PM Wind Generator With Flux-Modulation Structure," *2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*, pp. 1-2, Tianjin, China, October 16-18, 2020.
- [194] N. Feng, H. Yu, M. Hu, C. Liu, L. Huang, and Z. Shi, "A Study on a Linear Magnetic-Geared Interior Permanent Magnet Generator for Direct-Drive Wave Energy Conversion," *Energies* 9, no. 7: 487, 2016.
- [195] C. Liu, H. Zhu, and R. Dong, "Linear magnetic gear with HTS bulks for wave energy conversion," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 13, pp. 2430-2434, 2019.

- [196] R. Qu, D. Li, and J. Wang, "Relationship between magnetic gears and vernier machines," *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1-6, Beijing, China, 20-23 Aug. 2011.
- [197] F. Wu and A. M. El-Refaie, "Permanent magnet vernier machine; a review," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 2, pp. 127-137, 2019.
- [198] J. Li, K. T. Chau, J. Z. Jiang, C. Liu and W. Li, "A New Efficient Permanent-Magnet Vernier Machine for Wind Power Generation," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 6, pp. 1475-1478, June 2010.
- [199] X. Luo and S. Niu, "Maximum Power Point Tracking Sensorless Control of an Axial-Flux Permanent Magnet Vernier Wind Power Generator" *Energies* 9, no. 8: 581, 2016.
- [200] B. Kim, "Design of a Direct Drive Permanent Magnet Vernier Generator for a Wind Turbine System," *2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 4275-4282, Portland, OR, USA, 23-27 Sept. 2018.
- [201] Z. Song and C. Liu, "Induced Voltage Optimization of a Direct-Drive Multi-Phase Permanent Magnet Vernier Generator for Tidal Energy Conversion," *2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp. 1-5, Macao, China, 1-4 Dec. 2019.
- [202] P. M. Tlali, R. Wang, S. Gerber, C. D. Botha, and M. J. Kamper, "Design and Performance Comparison of Vernier and Conventional PM Synchronous Wind Generators," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 3, pp. 2570-2579, May-June 2020.
- [203] P. Enrici, I. Meny, and D. Matt, "Conceptual Study of Vernier Generator and Rectifier Association for Low Power Wind Energy Systems," *Energies*, vol. 14, no. 3, p. 666, Jan. 2021.
- [204] D. K. K. Padinharu *et al.*, "Permanent Magnet Vernier Machines for Direct-Drive Offshore Wind Power: Benefits and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 20652-20668, 2022.
- [205] D. R. Dudley, "Design of a Vernier Permanent Magnet Wind Generator," M.S. thesis, Faculty of Engineering and the Built Environment, Department of Electrical Engineering, University of Cape Town, 2020.

- [206] N. Niguchi, K. Hirata, A. Zaini and, S. Nagai, "Proposal of an axial-type magnetic-g geared motor," *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, pp. 738-743, Marseille, France, 02-05 September 2012.
- [207] K. Nakamura, K. Akimoto, T. Takemae and O. Ichinokura, "Basic Characteristics of In-Wheel Magnetic-Geared Motors", *J. Magn. Soc. Jpn*, vol. 39, no. 1, pp. 29-32, 2015.
- [208] M. B. Kouhshahi, J. Z. Bird, V. Acharya, K. Li, M. Calvin and W. Williams, "An axial flux-focusing magnetically geared motor," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 307-313, Cincinnati, OH, USA, 01-05 October 2017.
- [209] M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "Design and analysis of an axial flux magnetically geared generator," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 6511-6518. Montreal, QC, Canada, 20-24 September 2015.
- [210] M. F. H. Khatab, Z. Q. Zhu, H. Y. Li and Y. Liu, "Optimal design of a novel axial flux magnetically geared PM machine," *2017 Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, pp. 1-8, Monte Carlo, Monaco, 11-13 April 2017.
- [211] M. B. Kouhshahi *et al.*, "An Axial Flux Focusing Magnetically Geared Generator for Low Input Speed Applications," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 1, pp. 138-147, Jan.-Feb. 2020.
- [212] X. Zhang, Z. Song, J. Huang, G. Wang and T. Wang, "Analytical Investigation of the Magnetic-Field Distribution in an Axial-Flux Magnetic-Geared Machine," *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 661-666, Xi'an, China, 19-21 June 2019.
- [213] X. Zhang, Z. Song, J. Huang, G. Wang and T. Wang, "Research on a Novel Magnetic-Geared Machine with High Power Density," *2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 161-166, Xi'an, China, 19-21 June 2019.
- [214] R Wang, L Brönn, S Gerber and P M. Tlali, "An Axial Flux Magnetically Geared Permanent Magnet Wind Generator[J]", *Ieej Transactions on Electrical & Electronic Engineering*, vol. 10, no. S1, pp. S123-S132, 2015.
- [215] O. Dobzhanskyi *et al.*, "Axial-Flux PM Disk Generator with Magnetic Gear for Oceanic Wave Energy Harvesting," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 44813-44822, 2019.

- [216] M. B. Kouhshahi, V. M. Acharya, M. Calvin, J. Z. Bird and W. Williams, "Designing and experimentally testing a flux-focusing axial flux magnetic gear for an ocean generator application", *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 8, pp. 1212-1218, Aug. 2019.
- [217] Y. Chen, W. N. Fu, S. L. Ho, and H. Liu, "A Quantitative Comparison Analysis of Radial-Flux, Transverse-Flux, and Axial-Flux Magnetic Gears," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014.
- [218] M. C. Gardner, M. Johnson, and H. A. Toliyat, "Comparison of Surface Permanent Magnet Axial and Radial Flux Coaxial Magnetic Gears," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 4, pp. 2250-2259, Dec. 2018.
- [219] J. S. Smith, R. Pillsbury, and B. J. Sullivan, "Flux Focusing Arrangement for Permanent Magnets, Methods of Fabricating such Arrangements, and Machines including such Arrangements," U. S. Patent US 9.269,483 B2, Feb. 23, 2016.
- [220] K. Uppalapati and J. Bird, "A flux focusing ferrite magnetic gear," *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012)*, pp. 1-6, Bristol, 27-29 March 2012.
- [221] K. K. Uppalapati, W. B. Bomela, J. Z. Bird, M. D. Calvin, and J. D. Wright, "Experimental Evaluation of Low-Speed Flux-Focusing Magnetic Gearboxes," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 3637-3643, Nov.-Dec. 2014.
- [222] V. M. Acharya, J. Z. Bird and M. Calvin, "A Flux Focusing Axial Magnetic Gear," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 7, pp. 4092-4095, July 2013.
- [223] V. M. Acharya, M. Calvin and J. Z. Bird, "A low torque ripple flux focusing axial magnetic gear," *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, pp. 1-6, Manchester, UK, 08-10 April 2014.
- [224] S. Peng, W. N. Fu and S. L. Ho, "A Novel Triple-Permanent-Magnet-Excited Hybrid-Flux Magnetic Gear and Its Design Method Using 3-D Finite Element Method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 8104904.

- [225] Zhu, F. Yang, Y. Du, F. Xiao and Z. Ling, "An Axial-Field Flux-Modulated Magnetic Gear," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, June 2016, Art no. 0604405.
- [226] X. Yin, P. -D. Pfister and Y. Fang, "A Novel Magnetic Gear: Toward a Higher Torque Density," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 8002804.
- [227] M. -C. Tsai and L. -H. Ku, "3-D Printing-Based Design of Axial Flux Magnetic Gear for High Torque Density," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2015, Art no. 8002704.
- [228] M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "Analysis of axial field magnetic gears with Halbach arrays," *2015 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 108-114, Coeur d'Alene, ID, USA, 10-13 May. 2015.
- [229] F. Hu, Y. Zhou, H. Cui and X. Liu, "Spectrum analysis and optimization of the axial magnetic gear with Halbach permanent magnet arrays", *Energies*, vol. 12, no. 10, pp. 2003, May 2019.
- [230] M. F. H. Khatab, Z. Q. Zhu, H. Y. Li and Y. Liu, "Comparative study of novel axial flux magnetically geared and conventional axial flux permanent magnet machines," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 2, no. 4, pp. 392-398, Dec. 2018.
- [231] K. Hirata, M. Yamamoto and M. Muramatsu, "Proposal of an axial gap magnetic gear," *IEEJ Trans. on Ind. App.*, vol. 130, no. 6, pp. 802-807, 2010.
- [232] H. Zaytoon, A. S. Abdel-Khalik, A. M. Massoud and S. Ahmed, "An axial magnetic gearbox with an electric power output port," *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, pp. 2621-2627, Fort Worth, TX, USA, 16-20 March 2014.
- [233] S. Niu, Y. Liu, S. L. Ho and W. N. Fu, "Development of a Novel Brushless Power Split Transmission System for Wind Power Generation Application," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov. 2014, Art no. 8203004,
- [234] M. Andriollo, F. Graziottin and A. Tortella, "Contact-less electromagnetic recharging system for heavy-duty bus flywheel storage," *2015 International Conference on*

- Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, pp. 232-237, Palermo, Italy, 22-25 November 2015.
- [235] S. A. Afsari and H. Heydari, "Design and Analysis of Magnetic Gear," *The 6th Conference on Rotating Equipment in Oil & Power Industries*, Tehran, Iran, 02-03 Dec., 2014.
- [236] S.A. Afsari, H. Heydari, and E. Bashar, "Viable Arcuate Double-sided Magnetic Gear for Competitive Torque Density Transmission Capability". *Scientia Iranica*, vol. 23, no. 3, pp. 1251-1260, 2016,
- [237] M. Andriollo, F. Graziottin and A. Tortella, "Design of an Axial-Type Magnetic Gear for the Contact-Less Recharging of a Heavy-Duty Bus Flywheel Storage System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 4, pp. 3476-3484, July-Aug. 2017.
- [238] Z. Q. Zhu, M. F. Khatab, H. Y. Li and Y. Liu, "A Novel Axial Flux Magnetically Geared Machine for Power Split Application," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 6, pp. 5954-5966, Nov.-Dec. 2018.
- [239] A. A. Faysal, S. M. Haris and M. H. M. Saad, "An Axial Magnetic Gear Design with Changeable Ratios," *2018 8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE)*, pp. 195-200, Penang, Malaysia, 23-25 November 2018.
- [240] S. Syam, S. Soeparman, D. Widyanuriawan, S. Wahyudi and S. Kurniati, "A New Design of Magnetic Gear Axial using a Rectangular NdFeB Magnetic Layer," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 494 (012053), 2019.
- [241] S. Syam, S. Kurniati and R. Ramang, "Design and Characteristics of Axial Magnetic Gear Using Rectangular Magnet," *J. Eur. Syst. Autom*, vol. 53, no. 2, pp. 167-175, April 2020.
- [242] T. Lubin, S. Mezani and A. Rezzoug, "Development of a 2-D Analytical Model for the Electromagnetic Computation of Axial-Field Magnetic Gears," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 49, no. 11, pp. 5507-5521, Nov. 2013.
- [243] B. Dolisy, S. Mezani, T. Lubin and J. L  v  que, "A New Analytical Torque Formula for Axial Field Permanent Magnets Coupling," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 892-899, Sept. 2015,

- [244] M. Johnson, A. Shapoury, P. Boghrat, M. Post and H. A. Toliyat, "Analysis and development of an axial flux magnetic gear," *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 5893-5900, Pittsburgh, PA, USA, 14-18 September 2014.
- [245] Y. Chen and W. Fu, "A novel hybrid-flux magnetic gear and its performance analysis using the 3-D finite element method", *Energies*, vol. 8, no. 5, pp. 3313-3327, 2015.
- [246] S. A. Afsari, H. Heydari and B. Dianati, "Cogging torque minimization in double sided axial flux magnetic gear," *The 6th Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC2015)*, pp. 71-76, Tehran, Iran, 03-04 February 2015.
- [247] S. A. Afsari, H. Heydari and B. Dianati, "Cogging Torque Mitigation in Axial Flux Magnetic Gear System Based on Skew Effects Using an Improved Quasi 3-D Analytical Method," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 9, pp. 1-11, Sept. 2015.
- [248] H. Zaytoon, A. S. Abdel-Khalik, S. Ahmed and A. Massoud, "Cogging torque reduction of axial magnetic gearbox using pole pairing technique," *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pp. 652-657, Seville, Spain, 17-19 March 2015.
- [249] J. Sepaseh, N. Rostami and M. R. Feyzi, "An Axial Magnetic Gear With Improved Torque Density and Reduced Cogging Torque," *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 17, no. 4, 2021.
- [250] S. Gerber and R. Wang, "Cogging Torque Definitions for Magnetic Gears and Magnetically Geared Electrical Machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 54, no. 4, pp. 1-9, April 2018, Art no. 8103209.
- [251] B. Praslicka, M. Johnson, M. C. Gardner, E. Dangtran and H. A. Toliyat, "Effects of Axial Flux Magnetic Gear Misalignment," *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 293-300, Detroit, MI, USA, 11-15 October 2020.
- [252] A. Darabi, M. Abolghasemi, R. Mirzahosseini and M. Sarvi-Maraghi, "Transient Analysis of an Axial Flux Magnetic Gear," *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pp. 1-5, Tabriz, Iran, 04-06 August 2020.
- [253] J. Kołodziej, M. Kowol, P. Mynarek, R. Gabor and M. Łukaniszyn, "Forces in Axial Flux Magnetic Gears with Integer and Fractional Gear Ratios," *Energies*, vol. 14, no. 4, 855, 2021.

- [254] Q. Wang, X. Zhao and S. Niu, "Flux-Modulated Permanent Magnet Machines: Challenges and Opportunities," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 1, 13, 2021.
- [255] H. Chen, Y. Zuo, K. T. Chau, W. Zhao and C. H. T. Lee, "Modern electric machines and drives for wind power generation: A review of opportunities and challenges," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 15, pp. 1864-1887, 2021.
- [256] F. Giulii Capponi, G. De Donato and F. Caricchi, "Recent Advances in Axial-Flux Permanent-Magnet Machine Technology," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 6, pp. 2190-2205, Nov.-Dec. 2012.
- [257] F. Nishanth, J. V. Verdegheem and E. L. Severson, "Recent Advances in Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Electric Machines," *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 3745-3752, Vancouver, BC, Canada, 10-14 October 2021.
- [258] S. A. Afsari, "Optimal design and analysis of a novel reluctance axial flux magnetic gear". *Scientia Iranica*, vol. 29, no. 3, pp. 1573-1580, 2022.
- [259] J. Sepaseh, N. Rostami, M. Reza Feyzi and M. B. Bannae Sharifian, "Optimal design of an axial magnetic gear by using particle swarm optimisation method," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 16, no. 6, pp. 723-735, March 2022.
- [260] G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhönen and A. Cavagnino, "Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 10, pp. 7672-7684, Oct. 2018,
- [261] K. Yang, F. Zhao, Q. Wang and H. Lin, "Optimization Design of a Dual-Rotor Axial-Flux Permanent Magnet Vernier Machine based on Genetic Algorithm," *2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1-5, Harbin, China, 11-14 August 2019.
- [262] Q. Wang, F. Zhao and K. Yang, "Analysis and Optimization of the Axial Electromagnetic Force for an Axial-Flux Permanent Magnet Vernier Machine," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2021, Art no. 8100605.

- [263] W. N. Fu and Y. Liu, "A unified theory of flux-modulated electric machines," *2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE)*, pp. 1-13, Hong Kong, China, 14 December 2016.
- [264] M. Cheng, P. Han and W. Hua, "General Airgap Field Modulation Theory for Electrical Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 8, pp. 6063-6074, Aug. 2017.
- [265] Z. Q. Zhu and Y. Liu, "Analysis of Air-Gap Field Modulation and Magnetic Gearing Effect in Fractional-Slot Concentrated-Winding Permanent-Magnet Synchronous Machines," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 5, pp. 3688-3698, May 2018.
- [266] G. Jungmayr, J. Loeffler, B. Winter, F. Jeske and W. Amrhein, "Magnetic gear: Radial force, cogging torque, skewing and optimization," *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 898-905, Montreal, QC, Canada, 20-24 September 2015.
- [267] S. A. Afsari and B. Dianati, "Cogging Torque Minimization in Coaxial Magnetic Gear," *32nd International Power System Conference*, 1 (1), 1, Tehran, Iran, 23-25 October 2017.
- [268] J. Ou, Y. Liu, R. Qu and M. Doppelbauer, "Experimental and Theoretical Research on Cogging Torque of PM Synchronous Motors Considering Manufacturing Tolerances," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 5, pp. 3772-3783, May 2018.
- [269] J. Si, S. Zhao, L. Zhang, R. Cao and W. Cao, "The characteristics analysis and cogging torque optimization of a surface-interior permanent magnet synchronous motor," in *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 4, pp. 41-47, Dec. 2018.
- [270] C. C. Awah, Chijioke, O. I. Okoro, and E. Chikuni. "Cogging torque and torque ripple analysis of permanent magnet flux-switching machine having two stators," *Archives of Electrical Engineering*, vol. 68, no. 1, pp. 115-133, Feb. 2019.
- [271] H. Wahab, A. Rahardjo, B. Sudiarto, and Rudy Setiabudy, "The implement of permanent magnet material variations on the reduction of cogging torque in PMSG," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 620, no. 1, IOP Publishing, Nov. 2019.

- [272] B. Ravisankar, N. Senthilnathan, and P. Sethupathi, "Overview on Various Techniques for Reduction of cogging torque and torque ripples of Permanent Magnet motors of different rotor configurations," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 1055, No. 1, IOP Publishing, Feb. 2021.
- [273] B. Ravisankar, N. Senthilnathan, and P. Sethupathi, "Analysis and Prediction of Cogging Torque and ripples in output Torque of Permanent Magnet Synchronous Motor and Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor," *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*, vol. 12, no. 3, pp. 4586-4595, Apr. 2021.
- [274] Y. Cui, F. Zhang, L. Huang, and Z. Chen, "Analysis and Verification of a Cogging Torque Reduction Method for Variable Flux Memory Permanent Magnet Machine," *Electronics*, vol. 10, no. 16, p. 1913, Aug. 2021.
- [275] T. Nur, Y. Suherman, and H. Wahab, "The Effect of Magnet Structure on the Cogging Torque Reduction in a Permanent Magnet Generator," *Journal of Southwest Jiaotong University*, vol. 56, no. 1, Feb. 2021.
- [276] S. Mengesha, S. Rajput, S. Lineykin, and M. Averbukh, "The effects of cogging torque reduction in axial flux machines," *Micromachines*, vol. 12, no. 3, p. 323, March 2021.
- [277] M. Caruso, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, and F. Viola, " A Cogging Torque Minimization Procedure for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on a Progressive Modification of the Rotor Lamination Geometry," *Energies*, vol. 15, no 14, p. 4956, July 2022.
- [278] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 15, no. 4, pp. 407-412, Dec. 2000.
- [279] Hameyer, K., Böhmer, S., Coenen, I., *et al.*, "The art of modelling electrical machines," *ICS Newslett., Int. Compumag Soc.*, vol. 19, issue 2, pp. 3–19, 2012.
- [280] D. Zarko, D. Ban and T. A. Lipo, "Analytical calculation of magnetic field distribution in the slotted air gap of a surface permanent-magnet motor using complex relative air-gap permeance," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 7, pp. 1828-1837, July 2006.

- [281] Z. J. Liu and J. T. Li, "Analytical Solution of Air-Gap Field in Permanent-Magnet Motors Taking Into Account the Effect of Pole Transition Over Slots," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 10, pp. 3872-3883, Oct. 2007.
- [282] Z. J. Liu and J. T. Li, "Accurate Prediction of Magnetic Field and Magnetic Forces in Permanent Magnet Motors Using an Analytical Solution," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, pp. 717-726, Sept. 2008.
- [283] Jian. L. and Chau, K. T., "Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in Coaxial Magnetic Gears," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 92, 1-16, 2009.
- [284] T. Lubin, S. Mezani and A. Rezzoug, "Exact Analytical Method for Magnetic Field Computation in the Air Gap of Cylindrical Electrical Machines Considering Slotting Effects," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 4, pp. 1092-1099, April 2010.
- [285] T. Lubin, S. Mezani and A. Rezzoug, "Analytical Computation of the Magnetic Field Distribution in a Magnetic Gear," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 7, pp. 2611-2621, July 2010.
- [286] H. -Y. Li, H. Hao, M. -J. Jin and J. -X. Shen, "Analytical Calculation of Magnetic Field Distribution in Magnetic Gears with Consequent-Pole Rotors by Subdomain Method," *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1-6, Hangzhou, China, 17-20 October 2016.
- [287] B. Dianati, H. Heydari and S. A. Afsari, "Analytical Computation of Air-Gap Magnetic Field in a Viable Superconductive Magnetic Gear," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 6, pp. 1-12, Sept. 2016, Art no. 5205612.
- [288] X. Zhang, X. Liu, Z. Song and Z. Chen, "Fast calculation of magnetic field distribution in magnetic gear for high torque application," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1742-1748, Lausanne, Switzerland, 04-07 September 2016.
- [289] K. Lee, M. J. DeBortoli, M. J. Lee and S. J. Salon, "Coupling finite elements and analytical solution in the airgap of electric machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 27, no. 5, pp. 3955-3957, Sept. 1991.

- [290] Y. Zhilichev, "Analysis of permanent magnet machines using crossing macro-elements," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 36, no. 5, pp. 3122-3124, Sept 2000.
- [291] E. Ilhan, B. L. J. Gysen, J. J. H. Paulides and E. A. Lomonova, "Analytical Hybrid Model for Flux Switching Permanent Magnet Machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 46, no. 6, pp. 1762-1765, June 2010.
- [292] M. Desvaux, S. Sire, S. Hlioui, H. Ben Ahmed and B. Multon, "Development of a Hybrid Analytical Model for a Fast Computation of Magnetic Losses and Optimization of Coaxial Magnetic Gears," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 1, pp. 25-35, March 2019.
- [293] F. Fleming and C. S. Edrington, "A comparison of machine modeling methods for real-time applications," *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 5346-5351, Montreal, QC, Canada, 25-28 October 2012.
- [294] H. W. Derbas, J. M. Williams, A. C. Koenig and S. D. Pekarek, "A Comparison of Nodal- and Mesh-Based Magnetic Equivalent Circuit Models," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, no. 2, pp. 388-396, June 2009.
- [295] Nakamura, K. Tashiro, T. and Ichinokura, O., "Calculation of the Dynamic Characteristics of a Magnetic Gear Based on Reluctance Network Analysis." *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 32, no. 2-1, pp. 78-81, 2008.
- [296] M. Fukuoka, K. Nakamura and O. Ichinokura, "Dynamic Analysis of Planetary-Type Magnetic Gear Based on Reluctance Network Analysis," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 2414-2417, Oct. 2011.
- [297] M. Fukuoka, K. Nakamura and O. Ichinokura, "Dynamic simulation of planetary type magnetic gear based on reluctance network analysis," *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-7, Birmingham, UK, 30 August 2011 – 01.
- [298] R. C. Holehouse, K. Atallah and J. Wang, "A linear magnetic gear," *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, pp. 563-569, Marseille, France, 02-05 September 2012.
- [299] M. Fukuoka, K. Nakamura and O. Ichinokura, "A method for optimizing the design of SPM type magnetic gear based on reluctance network analysis," *2012 XXth*

- International Conference on Electrical Machines*, pp. 30-35, Marseille, France, 02-05 September 2012.
- [300] M. Fukuoka, K. Nakamura and O. Ichinokura, "RNA-Based Optimum Design method for SPM type magnetic Gears," *Journal of the Magnetics Society of Japan*, vol. 37, no. 3-2, pp. 264-267, 2013.
- [301] Yi-Chang Wu and Bo-Syuan Jian, "Magnetic field analysis of a coaxial magnetic gear mechanism by two-dimensional equivalent magnetic circuit network method and finite-element method," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 39, issue 19, pp. 5746-5758, 2015.
- [302] D. Thyroff, S. Meier and I. Hahn, "Modeling integrated magnetic gears using a magnetic equivalent circuit," *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, pp. 002904-002908, Yokohama, Japan, 09-12 November 2015.
- [303] R. Benlamine, T. Hamiti, F. Vangraefschèpe, F. Dubas and D. Lhotellier, "Modeling of a coaxial magnetic gear equipped with surface mounted PMs using nonlinear adaptive magnetic equivalent circuits," *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1888-1894, Lausanne, Switzerland, 04-07 September 2016.
- [304] Feshki Farahani, H., "Magnetic equivalent circuit modelling of coaxial magnetic gears considering non-linear magnetising curve," *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 14, iss. 4, pp. 454–461, June 2020.
- [305] Beirami, A., Feshki Farahani, H., Mohammad Rahimi, R., Amini, S., "Dynamic analysis of Halbach coaxial magnetic gears based on magnetic equivalent circuit modelling," *IET Circuits Devices Syst.*, vol. 15, iss. 3, pp. 260–271, May 2021.
- [306] M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "A Parameterized Linear Magnetic Equivalent Circuit for Analysis and Design of Radial Flux Magnetic Gears—Part I: Implementation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 2, pp. 784-791, June 2018.
- [307] M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "A Parameterized Linear Magnetic Equivalent Circuit for Analysis and Design of Radial Flux Magnetic Gears—Part II: Evaluation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 2, pp. 792-800, June 2018.

- [308] B. Majidi and J. Milimonfared, "Modeling, Design, and Sensitivity Analysis of a Continuous Magnetic Gear Using Finite-Element Method," *Electric Power Components and Systems*, vol. 44, no. 9, pp.1029-1039, 2016.
- [309] Ansys, Inc., Nov. 2022, "Maxwell | Electromechanical Device Analysis Software," [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
- [310] COMSOL Multiphysics®, Nov. 2022, "Simulate real-world designs, devices, and processes with multiphysics software from COMSOL," [Online]. Available: <https://www.comsol.com/>
- [311] JMAG, Nov. 2022, "Simulation Technology for Electromechanical Design: JMAG (jmag-international.com)," [Online]. Available: <https://www.jmag-international.com/>
- [312] A. Abolhasani and S. Pakdelian, "Equivalent Circuit for the Trans-Rotary Magnetic Gear," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 10, pp. 8266-8272, Oct. 2019.
- [313] T.A. Lipo, "Winding distribution in an ideal machine," in *Analysis of Synchronous Machine*, 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2012, pp. 1-76.
- [314] T. Lubin, T. Hamiti, H. Razik and A. Rezzoug, "Comparison Between Finite-Element Analysis and Winding Function Theory for Inductances and Torque Calculation of a Synchronous Reluctance Machine," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 8, pp. 3406-3410, Aug. 2007.
- [315] F. Boubakar, A. Aissa, K. Abdellah and Z. Abdellim, "A three-dimensional finite element method analysis and winding function theory for torque ripple reducing in reluctance machine," *2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, pp. 418-423, Algiers, Algeria, 15-17 November 2016.
- [316] S. Saied, K. Abbaszadeh and A. Tenconi, "Improvement to winding function theory for PM machine analysis," *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1-6, Malaga, Spain, 11-13 May 2011.
- [317] F. Rezaee-Alam, B. Rezaeealam and V. Naeini, "An Improved Winding Function Theory for Accurate Modeling of Small and Large Air-Gap Electric Machines," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 57, no. 5, pp. 1-13, May 2021.

- [318] M. Yilmaz and P. T. Krein, "Capabilities of finite element analysis and magnetic equivalent circuits for electrical machine analysis and design," 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 4027-4033, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008.
- [319] M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "A Parameterized Linear 3D Magnetic Equivalent Circuit for Analysis and Design of Radial Flux Magnetic Gears—Part I: Implementation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2894-2902, Dec. 2021.
- [320] M. Johnson, M. C. Gardner and H. A. Toliyat, "A Parameterized Linear 3D Magnetic Equivalent Circuit for Analysis and Design of Radial Flux Magnetic Gears—Part II: Evaluation," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2903-2911, Dec. 2021.
- [321] V. Ostović, "Magnetic Equivalent Circuit Presentation of Electric Machines," *Electric Machines & Power Systems*, vol. 12, no. 6, pp. 407–432, 1987.
- [322] V. Ostović, "A Simplified Approach to Magnetic Equivalent-Circuit Modeling of Induction Machines," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 24, no. 2, pp. 308-316, March/April. 1988.
- [323] V. Ostović, *Dynamics of Saturated Electric Machines*. New York: Springer-Verlag, 1989.
- [324] M. Amrhein and P. T. Krein, "Magnetic Equivalent Circuit Simulations of Electrical Machines for Design Purposes," *2007 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, Arlington, VA, USA, 2007, pp. 254-260, doi: 10.1109/ESTS.2007.372095.
- [325] J. Perho, *Reluctance Network for Analysing Induction Machines*, Acta Polytechnica Scandinavica, Electr. Eng. Series, vol. 110, pp. 1–147, Dec. 12th, 2002. PhD dissertation, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics.
- [326] A. H. F. Dias, and J. A. de Vasconcelos, "Multiobjective Genetic Algorithms Applied to Solve Optimization Problems," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1133-1136, March 2002.
- [327] A. Osyczka, "Multicriteria optimization for engineering design." In *Design Optimization*, J. S. Gero, Ed., Orlando, Florida, USA: Academic Press, Inc., 1985, pp. 193–227.

-
- [328] I. Boldea, and S. A. Nasar, *The Induction Machines Design Handbook*, 2nd. Ed. Boca Ratón, Fl.: CRC Press Taylor & Francis Group, 2010, pp. 541-553.
- [329] G. Lei, J. Zhu, and Y. Guo, *Multidisciplinary Design Optimization Methods for Electrical Machines and Drive Systems*, Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2016; pp. 107–159.
- [330] K. Deb, *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*, Chichester, UK: Wiley & Sons, Ltd., 2001

Cursum consummavi.
Fidem servavi.