DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autor
Manuel Alejandro Góngora Reyes

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control y Automatización

Bogotá D.C. Agosto, 2021

DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Autor
Manuel Alejandro Góngora Reyes
magongorar@correo.udistrital.edu.co

Modalidad
Investigación

Presentado para optar al título de: Ingeniero en Control y Automatización

Director
Henry Montaña Quintero

UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
Facultad Tecnológica
Ingeniería en Control y Automatización
Bogotá D.C. Agosto, 2021

Índice

Índice i
Índice de Figuras ii
Índice de Tablas v
Resumen vi
1. Introducción 1
2. Planteamiento del problema 2
3. Justificación 3
4. Objetivos 5
4.1. Objetivo General 5
4.2. Objetivos específicos 5
5. Marco de referencia 6
5.1. Antecedentes 6
5.2. Marco teórico 16
5.3. Marco Legal 21
6. Metodología 23
6.1 Diseño de topología base 26
6.2 Análisis de topología base con FEM sin carga 33
6.3 Análisis de topología base con FEM con carga 41
6.4 Validación de topología seleccionada v.s. otras topologías 45
6.5 Variación de configuración de dientes 49
6.6 Validación de cada variación con FEM 53
6.7 Selección de la configuración propuesta 56
7. Resultados 58
8. Conclusiones y Recomendaciones 64
9. Referencias 65
10. Anexos 70

Índice de Figuras

Figura 1, Generación de electricidad a nivel mundial por fuente, fuente IEA. 4
Figura 2, Estimación final del consumo energético a nivel mundial en 2017. 6
Figura 3, conversión mareomotriz, a) con generadores rotativos b) con generadores lineales [10]. 7
Figura 4, Documentos en el área de Generadores Lineales por año desde 1938 hasta mayo de 2019, Fuente autor. 7
Figura 5, corte transversal de un GLFML, [15] 8
Figura 6, métodos para reducir la fuerza normal en los GLFML, a) sesgado de los imanes permanentes [19], b) doble arreglo de imanes permanentes, interior y exterior [20]..... 9
Figura 7, ejemplo de GLFMT, [23]..... 9
Figura 8, modelo propuesto por [23]. 9
Figura 9, generador lineal de núcleo de aire,[24] 10
Figura 10. Tipos de magnetización comunes en el traslador: a) Magnetización Halbach b) Magnetización Axial c) Magnetización radial [47]. 12
Figura 11, GLT de un elemento flotante propuesto por R. Ekstrom y B. Ekargard,[15] 14
Figura 12, diagrama de generador AWS,[58]. 15
Figura 13. Sistema electromotriz de GL,[12] 15
Figura 14, **IMPLEMENTACIÓN** de GLNA desarrollada por [32] 16
Figura 15 Regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza de Lorentz [63] .. 17
Figura 16, presentación grafica de la equivalencia entre generador lineal y axial[10]. 19
Figura 17, Discretización de una estructura en elementos triangulares [67]. 20
Figura 18, elemento finito triangular junto con sus corrimientos nodales [67]. 21
Figura 19. Porcentaje tipo de magnetización implementada en las topologías analizadas. Fuente: Elaboración propia. 23
Figura 20. Porcentaje tipo de estructura implementada en las topologías analizadas. Fuente: Elaboración propia. 23
Figura 21. Porcentaje material de estructura implementada en las topologías analizadas. Fuente: Elaboración propia. 24
Figura 22. Diagrama de flujo de la solución desarrollada. 25
Figura 23. Representación del campo magnético del imán RX088: a) vista de corte en 2D b) vista de corte 3D isometrica , Fuente: elaboración propia. 27
Figura 24. Tabla de calibres AWG y características. [73]. 29
Figura 25. Topología base propuesta. Fuente: elaboración propia. 32
Figura 26. Asignación de ecuación a las secciones de Hierro en Comsol. 33
Figura 27. Curva BH para el material ferromagnético. 34
Figura 28. Asignación de ecuación a las bobinas en Comsol. 34
Figura 29. Asignación de ecuación a los imanes en Comsol. 35
Figura 30. Asignación de ecuación a los imanes en sentido opuesto en Comsol. 36
Figura 31. Asignación de potencial magnético y conductor magnético ideal. 37
Figura 32. Señal de desplazamiento del traslador. 37
Figura 33. Asignación de malla móvil y señal de desplazamiento. 38
Figura 34. Malla de elementos finitos para topología base. 38
Figura 35. Densidad de flujo magnético en generador tubular lineal de topología base. 39

Figura 36. Líneas de campo magnético en la estructura en el tiempo 0.001 s de simulación. 40
Figura 37. Voltaje inducido en las bobinas de la topología base sin carga. 41
Figura 38. Reporte de resistencia en las bobinas en la topología base. 41
Figura 39. Definición de tipo de excitación en las bobinas de la topología base. 42
Figura 40. Asignación de circuito de carga para las bobinas de la topología base. 42
Figura 41. Densidad de flujo magnético en generador linear tubular de topología base con carga. 43
Figura 42. Voltaje inducido en las bobinas de la topologia base con carga. 43
Figura 43. Corriente inducida en el generador de la topología base con carga. 44
Figura 44. Potencia inducida en el generador de la topología base con carga. 44
Figura 45. Topología de generador sin dientes para comparación. 45
Figura 46. Topología de generador Halbach para comparación. 46
Figura 47. Configuración de los imanes adicionales en la topología Halbach. 46
Figura 48. a) densidad de flujo magnético en topología sin dientes. b) Densidad de flujo magnético en topología Halbach. 47
Figura 49. a) Voltaje inducido en la topología base. b) Voltaje inducido en la topología sin dientes. c) Voltaje inducido en la topología Halbach. 48
Figura 50. a) Potencia en la topología base. b) Potencia en la topología sin dientes. c) Potencia en la topología Halbach. 49
Figura 51. Geometría tipo T en dientes de estator y de traslador. 50
Figura 52. Geometría convexa en dientes del traslador y tipo T en estator. 50
Figura 53. Geometría convexa en dientes del traslador y del estator. 51
Figura 54. Geometría convexa en dientes del traslador y cóncava en el estator. 51
Figura 55. a) Geometría de diente de tipo trapecio en traslador y en estator. b) Geometría de diente de tipo trapecio con extremos extendidos en traslador y estator. 52
Figura 56. a) Geometría de diente de tipo trapecio recortado I en traslador y en estator. b) Geometría de diente de tipo trapecio recortado II en traslador y estator. 53
Figura 57.Densidad de flujo magnético en: a) Dientes T. b) Diente convexo en traslador - T en estator. c) Diente convexo en estator y traslador. d) diente convexo en traslador y cóncavo en estator. e) diente trapezoidal en estator y traslador. f) Diente trapezoidal en traslador y estator. g) Dientes trapecio recortado I. h) Dientes trapecio recortado II. 54
Figura 58. Voltaje inducido en: a) Dientes T. b) Diente convexo en traslador - T en estator. c) Diente convexo en estator y traslador. d) diente convexo en traslador y cóncavo en estator. e) diente trapezoidal en estator y traslador. f) Diente trapezoidal en traslador y estator. g) Dientes trapecio recortado I. h) Dientes trapecio recortado II. 55
Figura 59. Potencia generada en: a) Dientes T. b) Diente convexo en traslador - T en estator. c) Diente convexo en estator y traslador. d) diente convexo en traslador y cóncavo en estator. e) diente trapezoidal en estator y traslador. f) Diente trapezoidal en traslador y estator. g) Dientes trapecio recortado I. h) Dientes trapecio recortado II. 57
Figura 60. Densidad de flujo magnético en: a) topología base. b) topología mejorada con geometría de dientes trapezoidal recortada. 58
Figura 61. Voltaje inducido en: a) topología base. b) topología mejorada con geometría de dientes trapezoidal recortada. 59
Figura 62.Potencia generada en: a) topología base. b) topología mejorada con geometría de dientes trapezoidal recortada. 60

Figura 63. Generador tubular lineal diseñado. 61
Figura 64. Propuesta de aplicación general. 62
Figura 65. Segunda propuesta de aplicación del generador. 63

Índice de Tablas

Tabla 1, comparación de topologías. 10
Tabla 2. Comparación de topologías lineares tubulares con respecto a la magnetización. 12
Tabla 3.Comparación de topologías lineares tubulares con respecto a los dientes. 13
Tabla 4. Comparación de topologías lineares tubulares con respecto al núcleo. 13
Tabla 5. Parámetros de diseño iniciales..... 26
Tabla 6. Combinaciones de polos y slots (ranuras).[71] 27
Tabla 7, parámetros de la topología base diseñada. 31

Resumen

En la actualidad se tiene un gran interés desde la investigación y la industria por adoptar tecnologías de energía alternativa, los generadores lineales tubulares son una tecnología que aún tiene potencial tanto en su diseño como en sus aplicaciones, el presente documento presenta el diseño y simulación de un generador tubular lineal con el método de elementos finitos, el trabajo parte del diseño una topología base con una generación de 10 W de potencia sobre la cual se realiza una mejora en su estructura, específicamente en la geometría de los dientes de la máquina, se presentan múltiples diseños con su respectivo análisis. Finalmente se alcanzan los 16 W en la solución propuesta, la cual supera en más de un 50% la topología básica sobre la que se parte, se realiza una comparación con respecto al punto de partida y se generan algunas propuestas de aplicación.

Palabras claves: Generador Tubular Lineal, elementos finitos, energías alternativas.

1. Introducción

El estudio y desarrollo de alternativas para la generación de energía se torna cada día más importante, los recursos que emplean las energías no renovables se consumen cada vez más rápido y las necesidades de la sociedad demandan una mayor capacidad de producción energética, a día de hoy existen más factores que dificultan no solo la extracción si no también el transporte de combustibles fósiles, este aparece como uno de muchos efectos producidos por la pandemia del coronavirus COV-19, esto ha obligado a muchas personas, no solo de la comunidad científica, a reflexionar sobre lo rápido que pueden cambiar las situaciones socio-económicas y uno de los aspectos que se ven afectados son el servicio de combustible para transporte y en algunos casos el uso de energía de uso doméstico. A día de hoy existen múltiples tecnologías de generación de energía, cada una de ellas es importante dado que contribuyen no solo a ofrecer un servicio, también contribuyen en la optimización del uso de recursos y la lucha contra el cambio climático, es por ello que cada una de ellas es de manera general igual de importante. Entre las múltiples tecnologías de generación de energía alternativa, se encuentran los generadores lineales, una tecnología que genera cada vez más interés en la comunidad científica y cuyas aplicaciones no han sido variantes, ya que su uso más común es en el área mareomotriz y en los pistones libres, es por ello que vale la pena descubrir esta tecnología y el potencial que aun parece estar oculto en ella.

En aras de generar un aporte desde la apropiación del conocimiento se propone el diseño de un generador tubular lineal usando el método de elementos finitos, el cual hace parte del proyecto de investigación institucionalizado “topologías de generador eólico”. El diseño de esta topología permitirá a otros investigadores interesados proponer diferentes campos de aplicación en los que se pueda implementar el generador diseñado además de proponer un espacio de pruebas para observar el comportamiento del dispositivo ante variación de parámetros, además de entregar una base de mejora en la geometría de la estructura del generador. En las siguientes secciones se presentara a mayor detalle el planteamiento del problema y su justificación en las secciones II y III, los objetivos planteados para el presente proyecto en la sección IV, el marco de referencia que contempla los antecedentes, el marco teórico y el marco legal en la sección V, la metodología llevada a cabo en la sección VI, Los resultados obtenidos en la sección VII y finalmente las conclusiones en la sección VIII.

2. Planteamiento del problema

A causa de las limitaciones de las energías no renovables, el cambio climático y la gran demanda de energía que cada día aumenta más, las energías alternativas juegan un papel importante para preservar la sociedad, la economía, la educación y asegurar el avance tecnológico a nivel mundial, debido la importancia de las mismas, la comunidad científica se ha visto bastante activa en el área durante los últimos años [1], con una gran cantidad de desarrollos en energías alternativas, autores como Tyagi, et. al. y Nehrir et. al. [2], [3] muestran que la mayoría de las implementaciones realizadas son de tipo solar y eólico, basados principalmente en paneles solares y turbinas eólicas de eje horizontal, Tobias Salas et. al [4] y de eje vertical, Melorose et. al. [5], dejando por debajo las demás técnicas de obtención de energía tal como los generadores tubulares lineales que utilizan las ondas y las vibraciones para generar energía, a pesar de contar con diferentes ventajas como menor costo, bajo mantenimiento y menos complejos en cuanto a la instalación, sin embargo las implementaciones propuestas usan principalmente las olas marítimas para generar la energía, aun cuando las ondas y las vibraciones se encuentran en todas partes, es decir que resulta de expandir la gama de aplicaciones de generadores tubulares lineales partiendo de desarrollar prototipos que permitan apropiar el concepto científico.

3. Justificación

La energía eléctrica tiene un impacto significativo en cualquier aspecto dentro de una sociedad y gran cantidad de investigadores y gobiernos lo han evidenciado y han puesto en marcha soluciones al respecto, de acuerdo con la agencia internacional de energía (IEA), la generación de energía eléctrica sigue siendo en su mayoría dependiente de fuentes no renovables como muestra la Figura 1, las desventajas de estas han sido estudiadas por su grave impacto en el medio ambiente y la sociedad [5], [6] resaltando además las ventajas de las energías limpias o de fuentes renovables, como lo son la energía fotovoltaica, eólica, biomasa, entre otras que a pesar de generar un beneficio tanto para el individuo como para la sociedad no se ha visto implementada en la magnitud esperada, una posible explicación es falta de incentivos y divulgación de los mismos para promocionar el uso de estas, sin embargo hay que tener en cuenta que las tecnologías comúnmente usadas en la generación de energías alternativas puede presentar desventajas, por ejemplo la tecnología empleada para la energía fotovoltaica está basada en el silicio cristalino lo que influye en el alto costo de los mismos, si bien los costos han reducido gracias a los incentivos del gobierno como lo es el caso de Colombia por medio de la ley 1715 de 2014, en la cual se realiza una exención de gravamen arancelario aplicable en maquinaria, equipos, materiales e insumos en proyectos de fuentes no convencionales de energía y que no sean producidos por la industria nacional, aun así están situados aun como una tecnología costosa comparada con otras fuentes de energía como lo estudian Badii, Guillen y Lugo en [7], actualmente los investigadores están en busca de nuevos materiales para la elaboración de los mismos sin embargo no ha habido un resultado significativo por lo que se puede ver en el mercado. Por otra parte la tecnología tradicional de generadores eólicos presenta más desventajas que la anterior tecnología mencionada pues su instalación produce impactos ecológicos y paisajísticos en el área en que se asienta, por lo que requiere espacios aislados, además para su instalación se debe estudiar el paso y presencia de aves, además se presenta mayor ruido y se requiere de maquinaria pesada para realizar la instalación lo que la ubica como una de las más costosas si se incluye el estudio previo, ubicación e instalación de la tecnología [7] aun así representan una solución para altas (mayor a 1000kW) y medianas potencias (entre 10 y 1000kW).

En el contexto presentado se evidencia la necesidad de implementar fuentes de energía renovables y a su vez proponer nuevas tecnologías que sean menos costosas, de mayor simplicidad a la hora de su instalación y que cumplan con el mismo objetivo, generar energía. Para el presente caso se propone el diseño de un generador tubular lineal de imanes permanentes el cual sea una apropiación intelectual para la Universidad Distrital en el marco del proyecto de investigación “topologías de generador eólico – aprobado por el CIDC 2-5607-19” y se establezca como una base para la construcción a futuro de un arreglo de generadores del mismo tipo y a su vez para el diseño de mejoras sobre el mismo, siendo esta una tecnología más sencilla de instalar y de producir que otras comúnmente usadas.

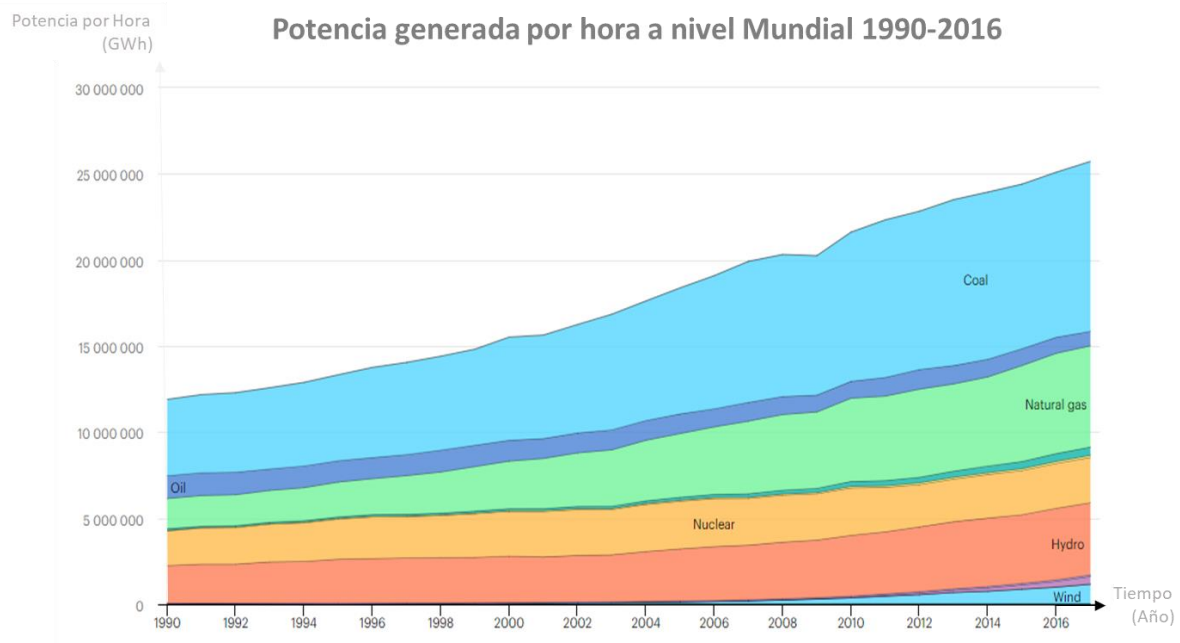


Figura 1, Generación de electricidad a nivel mundial por fuente, fuente IEA.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Desarrollar un generador tubular lineal de imanes permanentes de baja potencia empleando simulación de elementos finitos

4.2. Objetivos específicos

- Identificar y seleccionar con base en la literatura científica una topología tubular lineal
- Proponer una configuración de generador tubular lineal basado en la literatura científica.
- Diseñar y simular la topología de generador seleccionada con una herramienta de análisis de elementos finitos
- Probar el prototipo a nivel de simulación, tomando como indicador la potencia generada.

5. Marco de referencia

5.1. Antecedentes

En los últimos años los índices de investigación y desarrollo entorno al área de las energías renovables ha aumentado significativamente [1] a causa de las limitaciones de las fuentes de energía tradicionales como el petróleo, el carbón, el gas natural y otras energías no renovables. Diferentes países han implementado políticas que incentivan el uso y desarrollo de energías renovables como lo presentan Cortes et. al. y Zapata y Valencia en [8], [9], la generación a partir de energía solar y eólica son comercialmente las implementaciones más comunes, dejando por debajo otras alternativas como la generación de energía de ondas a partir de generadores lineales tubulares. A nivel mundial la comunidad de energías renovables a nivel global (REN21), genera el reporte de consumo de energías que se observa en la Figura 2, de esta se observa que las energías solar, eólica, biomasa, geotérmica y mareomotriz representan una proporción bastante pequeña a nivel mundial, estas juntas representan solo el 2.0% de consumo a nivel mundial.

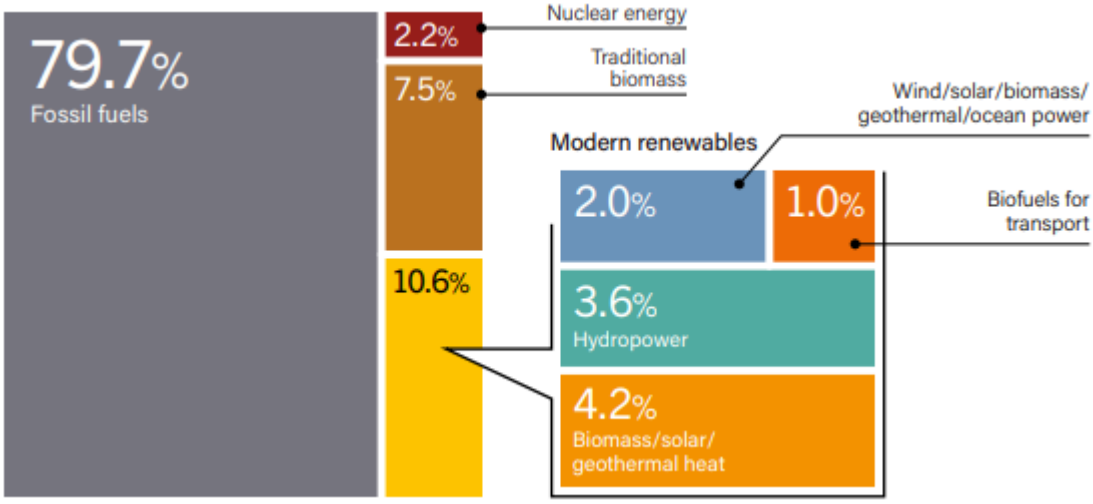


Figura 2, Estimación final del consumo energético a nivel mundial en 2017.

Es entonces evidente que hace falta un mayor esfuerzo por incrementar el porcentaje de uso de este tipo de tecnologías como lo son los paneles solares que se basan principalmente en el silicio aunque esto los hace más costos y complejos en producción que otras tecnologías, también se encuentran los generadores rotativos empleados en generadores eólicos que si bien generán un beneficio también presentan dificultades, su instalación es compleja, sufren desgastes a lo largo del tiempo y deben ser ubicados en áreas previamente estudiadas, por otra parte se tienen los generadores lineales de la energía mareomotriz que presenta mayores ventajas que las maquinas rotativas a la hora de generar energía, en la Figura 3 se observa en un diagrama elaborado por W. Xu, I. Rabiul, y M. Pucci [10] en el que se evidencia la ventaja de implementar generadores lineales con respecto a los rotativos.

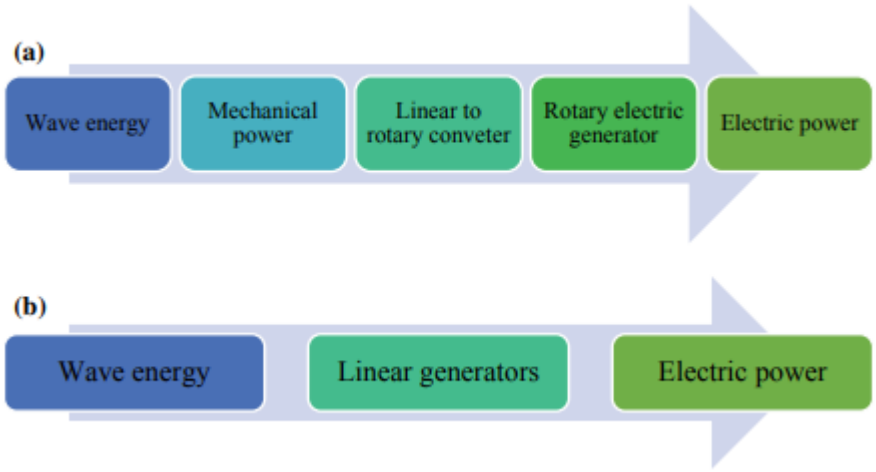


Figura 3, conversión mareomotriz, a) con generadores rotativos b) con generadores lineales [10].

Aunque la energía mareomotriz presente varias ventajas se tiene la dificultad de no tener cuerpos de agua con grandes flujos en la mayoría de ciudades, sin embargo el generador lineal puede destacarse siendo implementado de diferentes maneras en diversos campos [11], [12], [28], [29]. Dada la ventaja que mencionan los autores sobre este tipo de generadores se realizo una investigacion sobre el interes de la comunidad cientifica en esta tecnologia, como resultado se obtuvo la Figura 4 en la que se presentan los documentos que se han publicado sobre generadores tubulares lineales.

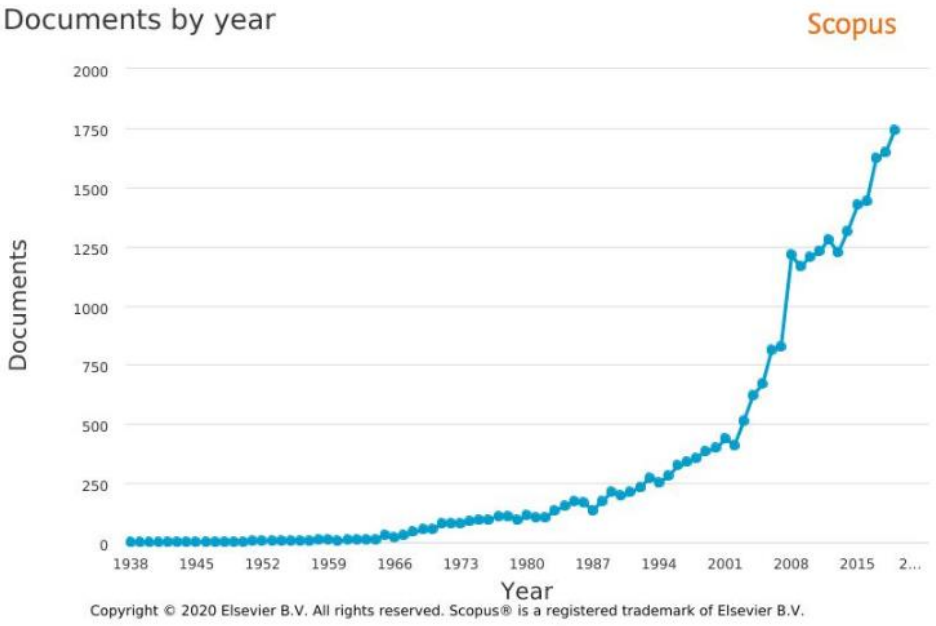


Figura 4, Documentos en el área de Generadores Lineales por año desde 1938 hasta mayo de 2019, Fuente autor.

Sin embargo el desarrollo de GLTs se encuentra en una edad temprana desde el punto de vista de la investigación, los investigadores aun presentan nuevas topologías como Faiz y Nematsaberi [13] y alternativas para mejorar esta tecnología como Wang et. al. [14].

Los generadores lineales tubulares (GLT) generan movimientos lineales directamente sin la necesidad de conversión de rotación a traslación como es común en los generadores rotativos

tradicionales, lo cual simplifica la estructura del sistema y la eficiencia del trabajo, sin embargo en estos sistemas el voltaje y la corriente de salida varían constantemente tanto en frecuencia como en amplitud provocando a su vez una modificación de las fases de manera alternada, por otra parte la alta fuerza de atracción magnética debido al alto volumen de materiales magnéticos que afectan el sistema, el tamaño y los costos podrían también ser elevados [13].
En la literatura científica se encuentran principalmente tres tipologías para el desarrollo de generadores lineales, Generador Lineal de flujo magnético longitudinal, Generador lineal de flujo magnético transversa y Generador lineal tubular con núcleo de aire los cuales se describen a continuación.

Generador lineal de flujo magnético longitudinal (GLFML)
También conocido como generador lineal síncrono, se caracteriza por un traslador de imanes permanentes, el cual es la parte móvil de la máquina para la cinemática de traslación; y un estator, como la parte estática de la máquina, cuyas bobinas se encuentra enrolladas en un núcleo dentado de material ferromagnético, en la Figura 5 se presenta el corte transversal de un GLFML, como se observa el entrehierro facilita el camino del flujo magnético.

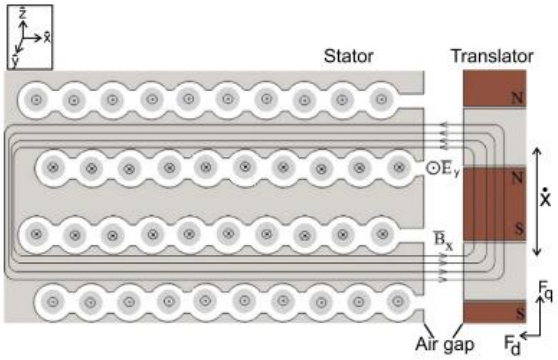


Figura 5, corte transversal de un GLFML, [15]

Varios desarrolladores como Si et. al., Huang et. al. y Chen et. al. [16]–[18] han dedicado parte de sus investigación a solventar o disminuir el error causado por las fuerzas de agarre (cogging force), las fuerzas de agarre o fuerzas normales son causadas por la interacción entre los imanes permanentes y el núcleo de hierro, esta fuerza es normal al traslator lo que provoca que exista una fuerza de atracción o repulsión entre estator y traslator, genera pérdidas de energía y se considera una fuerza parasita [19]. En la Figura 6 se muestran algunos de los métodos que han implementado otros autores y que han logrado disminuir la fuerza normal de los generadores de esta topología.

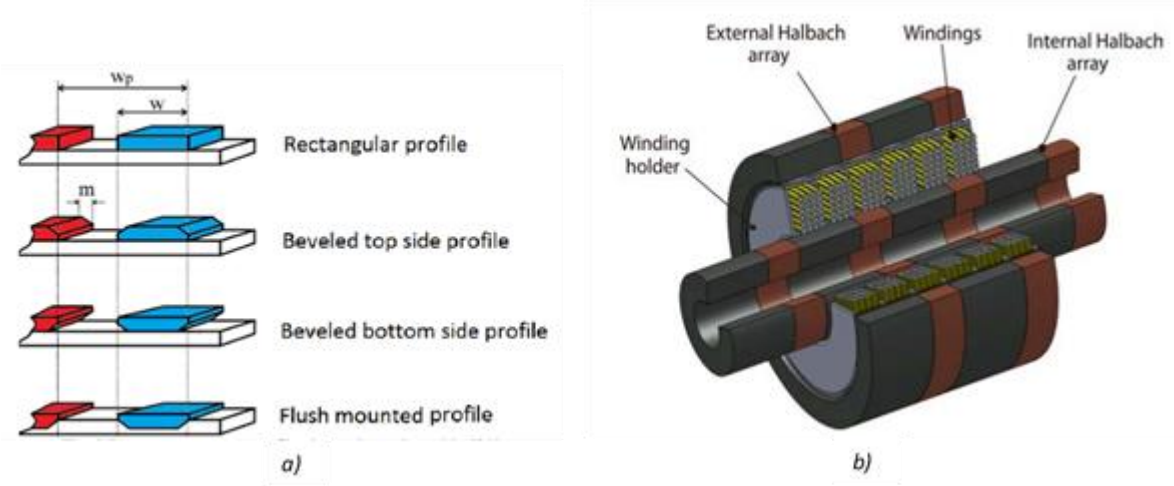


Figura 6, métodos para reducir la fuerza normal en los GLFML, a) sesgado de los imanes permanentes [19], b) doble arreglo de imanes permanentes, interior y exterior [20]

Generador lineal de flujo magnético transversal (GLFMT)

Esta topología se caracteriza por ser una estructura más compleja que las demás, el camino del flujo en este caso se realiza sobre el plano perpendicular del traslator, en la Figura 7 se presenta un ejemplo de GLFMT, como se observa el diseño de núcleos en forma de C puede implicar mayores costos sin embargo varios desarrolladores como Rao et. al., Huang et. al. y Shuheng y Hainfeng [21]–[23] han elegido esta topología debido a que en ella se obtiene mayor fuerza transversal, requiere menos imanes permanentes para obtener la misma fuerza que otras tecnologías.

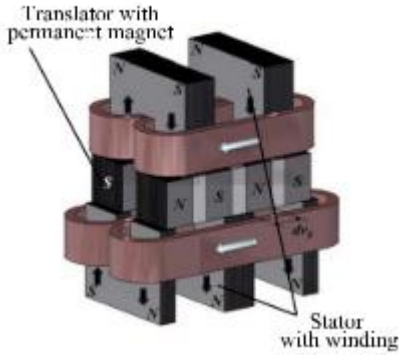


Figura 7, ejemplo de GLFMT, [23]

Los autores Shuheng y Hainfeng en [23] propone ciertas modificaciones en el entre hierro de un GLFMT lo que ayudo significativamente a mejorar la distribución de campo magnético en el núcleo y por tanto mejora la calidad de la energía generada.

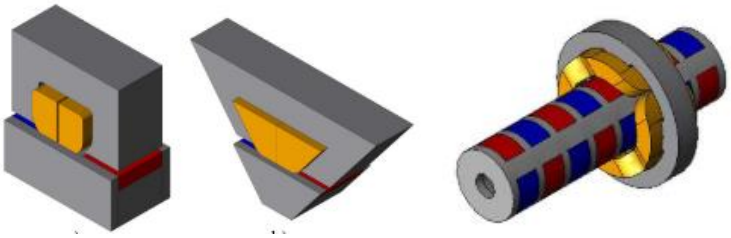


Figura 8, modelo propuesto por [23].

Generador lineal de núcleo de aire (GLNA)

A diferencia de las anteriores topologías que utilizaban el entrehierro para cerrar el circuito magnético, esta topología utiliza un núcleo de aire, los imanes permanentes se disponen de tal manera que el flujo tenga una dirección axial, los autores Vermaak y Kamper en [24], [25] desarrollaron su investigación en este tipo de generadores, el desarrollo se observa en la Figura 9, como se puede observar en la figura 6, b) y 6 c), se muestran las bobinas con núcleo de aire e este caso fijadas por un material no magnético.

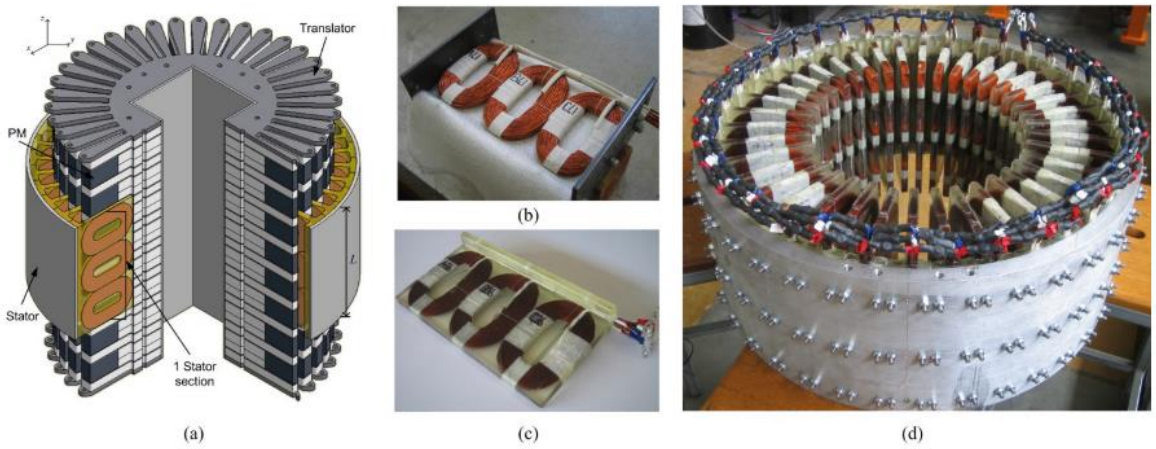


Figura 9, generador lineal de núcleo de aire,[24]

Con esta topología se elimina el problema de las fuerzas normales debido a que no hay materiales ferromagnéticos que provoquen tal fenómeno, su construcción es más económica, sin embargo el flujo magnético es menor y por tanto la potencia generada también lo es, en la mayoría de casos es 15 o 50 veces menor al de las topologías anteriores, los autores Zhu et. al. de [26] dedica su investigación a la optimización de este tipo de generadores mejorando la amplitud y la calidad de energía suministrada por el generador.

De la información presentada y a manera general se obtiene la Tabla 1, comparación de topologías.

Tabla 1, comparación de topologías.

Topología	Ventaja	Desventaja
GLFML	Buena eficiencia, alta densidad de potencia en la armadura del estator, permite la implementación sencilla de modificaciones.	Presenta fuerza normal de atracción, se debe controlar la temperatura
GLFMT	Mayor fuerza transversal por área de entrehierro, hay pocos desarrollos al respecto, requiere menos imanes permanentes	Diseño complejo, presenta fuerza normal de atracción, mayor costo.
GLNA	No presenta fuerzas normales de atracción, menor costo	Tiene una muy baja densidad de potencia en el estator.

Los sistemas de GLFML se encuentran implementados en su mayoría para el aprovechamiento de las ondas generadas sobre la superficie del mar [16], [17], [27]–[29], luego se encuentra las aplicaciones enfocadas a sistemas de transporte [14], [30], [31], aplicaciones en otras áreas son muy pocas [11], [22], [32]. Hasta el momento se han planteado diferentes métodos para el diseño de GLTs siempre en aras de mejorar alguna característica, sin embargo no es posible clasificarlos por los métodos que emplean debido a la diferencia que existe entre los mismos.

Los autores en cada una de sus investigaciones realizan un enfoque en la mejora de alguna característica de los generadores, algunos como Chen et. al. [33] optan por un diseño sencillo de una sola fase pero se enfocan en las posibles mejoras para una aplicación determinada, como lo es en su caso el aprovechamiento de los pistones en las máquinas, este autor resalta la importancia del núcleo de hierro y la forma de los dientes del estator. Los efectos del núcleo de hierro son de interés para otros autores como Guo et. al. [34] el cual enfatiza en disminuir el efecto "slots", el cual es un efecto que se presenta en los bordes de las ranuras en donde, la forma bordea el flujo magnético en las áreas de las orillas o filos de la ranura; y contribuye a esto empleando una magnetización radial, que permite evitar la integración de dientes en el traslador tal y como también determinaron los autores Zapata et. al. y Jing et. al. de [35], [36], otros autores como Korbekandi et. al. [37] y Sun et. al. [38] presentan un interés en el laminado del núcleo ya que el material magnético laminado evita las perdidas por efecto Joule y si es laminado fino, minimiza las perdidas por corrientes de Foucault.

Algunos autores como Musolino, Rizzo, y Raugi [39] enfocan su atención en la reducción del efecto fin asumiendo en términos de simulación un traslador de tamaño indefinido y agrega además la importancia del coeficiente de Carter en el estudio analítico del sistema. Otros como Zhang, Yu, y Shi [40] solventan el problema del efecto fin con una traslador más largo que su estator y generar sus propias propuestas novedosas de mejora como la integración de un segundo traslador en la máquina, el cual ubica al exterior de las bobinas, teniendo un traslador externo, en medio las bobinas y un traslador interno.

Otro aspecto que se puede observar es el interés por eliminar la fuerza de cogging y la fuerza magnética entre el estator y el traslador en estado de corriente igual a cero, ya que esto suele ser un impedimento para escoger las topologías con núcleos de hierro, la fuerza de cogging o para otros autores como Ronañach en [41], se presenta en máquinas rotativas o lineales especialmente cuando la parte móvil se desplaza a una baja velocidad, esta fuerza cogging tiende a generar un frenado en la maquina como consecuencia del entrehierro variable, es por esto que investigadores como Liu et. al. [42] han optado por la optimización de parámetros geométricos en los dientes de la estructura de hierro para disminuir la fuerza de ripple, la cual provoca una variación en la inductancia de los devanados y a su vez el cambio de la constante de fuerza de la maquina debido al propio desplazamiento de esta [41]; y la fuerza generada en los dientes, otros por su parte autores como [32], [43]–[45] escogen una topología con núcleo de aire de esa manera disminuyen costos en la producción del prototipo y eliminan la posibilidad de la existencia de la fuerza cogging y las fuerzas de atracción, sin embargo el costo de la implementación del núcleo de aire se observa en la magnitud del voltaje inducido, puesto que este se reduce en algunos casos más del 50 % con relación a un generador similar con núcleo de hierro, los autores Nor, Romlie y Kannan de [46]

realiza una breve comparación entre núcleos de hierro y aire y determina que para su propósito el núcleo de hierro sigue siendo la mejor opción a pesar de los riesgos que este pueda implicar.

Se observa que la comunidad científica tiene gran interés en mejorar los problemas comunes que presentan estas tecnologías. En la revisión realizada hasta el momento se han obtenido algunos elementos de valor sobre las variaciones en las topologías en cuanto a la configuración de magnetización en el traslador, en la Figura 10 se presentan las configuraciones comunes, en donde la magnetización Axial consiste en la ubicación de imanes con dirección magnética en este caso en dirección el eje z para el punto de referencia, la magnetización radial con dirección hacia el eje r respecto al punto de referencia y la magnetización Halbach como una configuración que combina las dos anteriores.

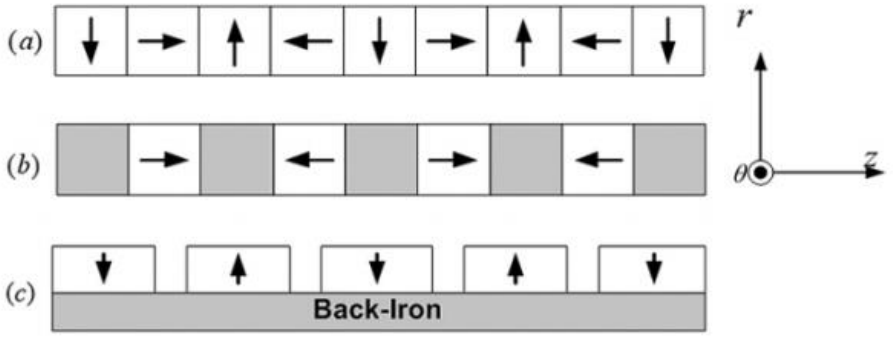


Figura 10. Tipos de magnetización comunes en el traslador: a) Magnetización Halbach b) Magnetización Axial c) Magnetización radial [47].

En la Tabla 2 se presenta la comparación en cuanto a la configuración de magnetización en el traslador, se encontró que una gran mayoría optan por un diseño de generadores con magnetización axial, por su bajo costo y su capacidad de generación de energía, aunque la magnetización Halbach presenta las mejores características en cuanto a densidad de fuerza, su implementación puede ser compleja y su costo de producción mucho más elevado que para una topología axial.

Tabla 2. Comparación de topologías lineares tubulares con respecto a la magnetización.

	Densidad de Fuerza	**Integración mecánica**	**Costo**
Radial	Buena	Alta	Promedio
Axial	Muy buena	Promedio	Bajo
Halbach	Excelente	Baja	Alto

En cuanto al núcleo y su estructura se evidencian dos pilares de atención, uno de ellos es la presencia o no de dientes en las topologías con núcleo de hierro, según autores como [42],[36], [48] los dientes pueden tener un efecto en la mayoría de los casos mucho más favorable que en topologías sin dientes o con integraciones simples de dientes, por otra parte autores como Tapia Hernandez et. al., Friederich et. al. y Sugiyantoro et. al. [49]–[51] optan por una topología sin

dientes, algunos de ellos por el tipo de núcleo que escogieron también en la fase de diseño. En la Tabla 3 se consignan las características más relevantes encontradas en la revisión.

Tabla 3.Comparación de topologías lineares tubulares con respecto a los dientes.

	Sin Dientes	**Con dientes**
Fuerza de atracción en I=0	Baja	Alta
Cogging force	-	Si
Eficiencia	Buena	Muy buena

Ya que el campo magnético se concentra en esa trayectoria magnética y bordes generan camino magnético para el flujo que usualmente se utiliza un material con alta permeabilidad magnética material ferromagnético. Si es aire se reduce el aprovechamiento de flujo ya que la permeabilidad magnética es $\mu o=4\pi x10-7$ Tm/A para el aire y el voltaje inducido es menor ya que no se concentra el flujo como en material magnético.

Por último se evidencia un debate por el tipo de núcleo a escoger, hay quienes defienden el núcleo de hierro a pesar de que se deben asumir las perdidas en el hierro, la fuerza de cogging y el costo de la estructura, tal como son [16], [38], [52], [53], de otro lado hay autores como [11], [43], [51] que prefieren el núcleo de aire, previniendo perdidas en el hierro y otros efectos de corrientes y fde fuerzas no deseadas, sin embargo la ausencia de material ferromagnético que componga el circuito magnético causa un voltaje inducido mucho menor y desaprovechando de alguna manera la capacidad que brinda este tipo de generadores para la mayoría de casos que puede tener. En la Tabla 4 se presentan algunos de los aspectos identificados en las experiencias de los diferentes autores con respecto al tipo de núcleo a implementar.

Tabla 4. Comparación de topologías lineares tubulares con respecto al núcleo.

	Voltaje inducido	**Perdidas en el hierro**	**Cogging force**	**Costo**
Núcleo de Aire	Bajo	-	-	Bajo
Núcleo de Hierro	Muy Alto	Si	Si	Promedio

Para cerrar esta sección se presentaran de manera breve los antecedentes de esta tecnología en sus campos más comunes de aplicación.

Generadores lineales de uso marítimo

Los GLT han tenido gran aceptación como convertidores de energía de las olas, el aprovechamiento de la energía producida por las olas es mucho más barato teniendo en cuenta la alta densidad de potencia respecto al traslador que se encuentra en las olas como lo estudian Yaakob, Rashid, y Mukti [54], a diferencia de la energía solar y eólica esta es constante y es más predecible que las anteriores. Los GLT de Olas se pueden diferenciar por la forma en que se disponen para aprovechar la energía de las olas, la más común es la que emplea un flotador como elemento flotante y un elemento fijo en la superficie, otras metodologías son derivaciones de la anterior en la que ambos cuerpos flotan o ambos cuerpos se encuentran sumergidos.

Generadores con solo un cuerpo sumergido

Es la forma más común y simple de hacerlo ya que aprovecha fácilmente el movimiento de las olas, en la Figura 11 se observa el modelo general del sistema, el cual consiste principalmente en una boya o flotador sujeto al traslador del generador y un estator sumergido en el fondo[17], [55], [56]. Otros como Leijon et. al. en [55], [57] proponen una red completa de este tipo de generadores.

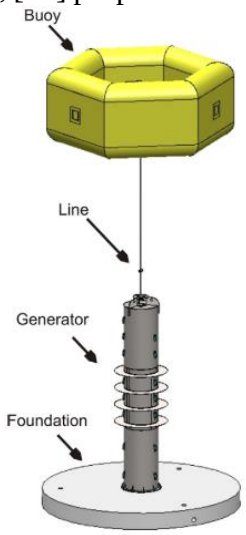


Figura 11, GLT de un elemento flotante propuesto por R. Ekstrom y B. Ekargard,[15]

Generadores de dos cuerpos sumergidos

Estos se conocen también como generadores de Columpio de Ola de Arquímedes (AWS, por sus siglas en ingles), está totalmente sumergido y se expande o contrae de acuerdo a los cambios de presión en el agua, Sun et.. al. y Polinder, Damen y Gardner [58], [59] proponen dispositivos que cumplen con esta topología de diseño, en la Figura 12 se presenta el esquema general de este tipo de generador, a diferencia de otras técnicas esta no depende de que el mar este agitado, no obstruye las vías fluviales de los barcos y es prácticamente invisible lo cual resulta atractivo para cualquier generador de energía.

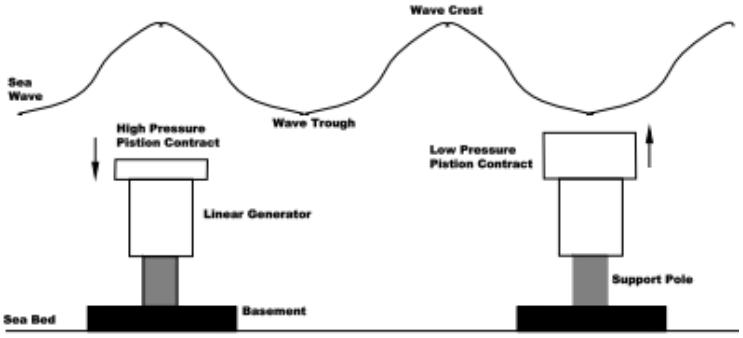


Figura 12, diagrama de generador AWS,[58].

Generadores lineales en los vehículos

Los GL son implementados en sistemas de pistones, como un complemento para la generación de energía de los vehículos, usualmente para los vehículos eléctricos, en la Figura 13 se presenta la implementación de Jia et. al. [12], el cual presenta una eficiencia del 80%, otros autores como Chendong et. al., Yamanaka et. al. y Nor, Arof y Wijono [30], [31], [60] también decidieron realizar este tipo de implementación, mejorando la eficiencia y disminuyendo el problema de fuerzas normales en los generadores.

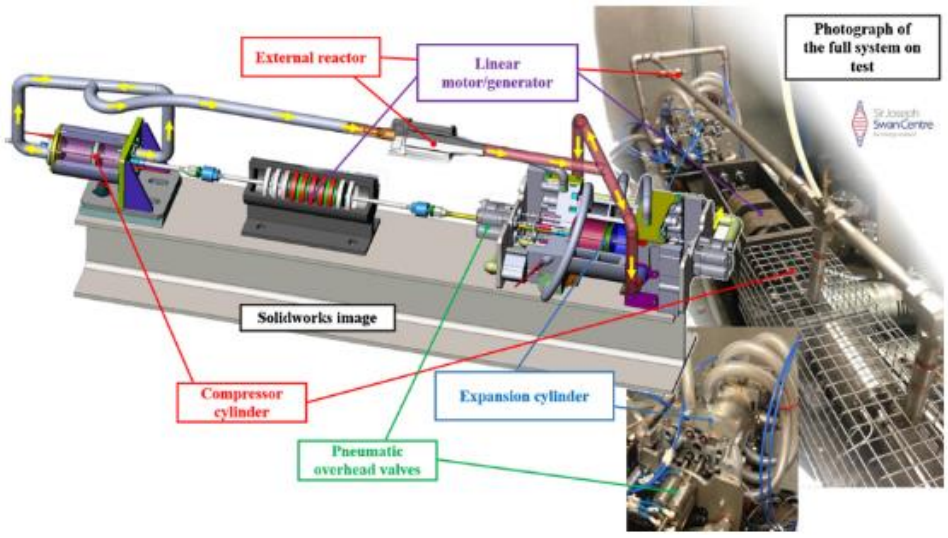


Figura 13. Sistema electromotriz de GL,[12]

En el trabajo de Wang et. al. [14], se presentan múltiples implementaciones además del desarrollo de sistemas de control para mejorar aspectos como la eficiencia y la regulación de tensión para diversas cargas.

Generadores lineales en biomedica

En la sociedad actual las personas no suelen permitirse ser sedentarias puesto que el agite de la ciudad implica que se mantenga en constante movimiento, este movimiento diario ha sido aprovechado por algunos investigadores, partiendo de la investigación de Büren y Tröster [11] en

la cual desarrollo un GLNA para generar energía de alimentación para sensores biomédicos, diferentes investigadores han propuesto opciones similares como Huang et. al. [22] y Gui et. al. [32].



Figura 14, IMPLEMENTACIÓN de GLNA desarrollada por [32]

En la Figura 14 se presenta el desarrollo de [32] en el cual registro hasta 20 mW generados, gracias a la marcha humana, el estudio definió cuál era la posición más óptima para el generador. Se puede observar que todos los desarrollos en esta área se han realizado con GLNA, pues en [22] también implementan este tipo de generadores.

5.2. Marco teórico

Imanación

La causa responsable de las propiedades magnéticas de la materia son los momentos magnéticos (**m**) de los átomos que conforman la sustancia [61]. El decir que están más o menos magnetizados depende de que tan orientados estén los momentos magnéticos. Tomando un pequeño volumen *dv,* la suma vectorial de los momentos magnéticos microscópicos en todo el volumen dv, da un vector designado por *dm* que al dividirlo por *dv,* cuyo significado es *momento magnético por unidad de volumen* o *imanación* que en [61] representan como **M,** escrita como se observa en la ecuación (1):

$$\boldsymbol{M} = \frac{dm}{dv} \tag{1}$$

Que define para cada punto del material, un vector **M** (x,y,z), aunque sea una descripción macroscópica de una distribución microscópica, esta forma da resultados satisfactorios. La unidad de imanación en el SI es $(N - m/m^3)$.

El campo magnético y la fuerza de Lorentz

Es una zona en la cual se manifiesta el efecto de un imán, esta zona se puede evidenciar fácilmente con una brújula [61], puesto que la aguja se alineara en la dirección del campo, ya que el campo es mayor al terrestre y la brújula se orienta según el campo externo; y ya que el campo mencionado también tiene una magnitud se puede hablar de un vector llamado **B** de acuerdo a distintos textos [61]–[64], este vector (x,y,z) se encuentra definido en cada punto del campo. Si en un punto (x,y,z) en un cierto instante, se encuentra una partícula cuya carga es *q* y se está moviendo a una velocidad

v, experimenta una fuerza debida solamente al campo magnético cuyo valor viene dado por la ecuación (2):

$$\boldsymbol{F} = q(v \times \boldsymbol{B} + E) = qv \times \boldsymbol{B} + \boldsymbol{Q}E \tag{2}$$

A esta fuerza se le llama la fuerza de Lorentz, la cual se observa que es siempre perpendicular a v y a **B**, y para determinar su dirección se puede aplicar la ley de la mano derecha tal como se observa en la Figura 15.

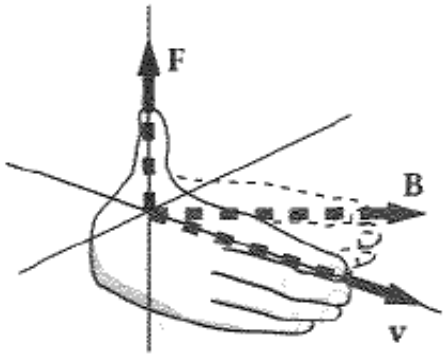


Figura 15 Regla de la mano derecha para determinar la dirección de la fuerza de Lorentz [63]

La ecuación (1) se puede considerar como una definición operacional del campo magnético en algún punto en el espacio, es decir, el campo magnético se define en términos de la fuerza que actúa sobre una partícula móvil cargada. La unidad SI del campo magnético es el Testla (T=1N/Am), también se encuentra un factor de conversión que relaciona el campo con el orden de magnitud del campo magnético terrestre, este es el Gauss (G) que equivale a la ecuación (3):

$$1G = 10^{-4}T = 10^{-4}\frac{N/C}{m/s} \tag{3}$$

Líneas de campo

El campo magnético o inducción magnética es tangente a sus líneas de campo, para efectos de concretar su valor se dibujan líneas de campo que atraviesen normalmente a la unidad de superficie, las líneas de campo magnético en **B** son curvas cerradas. Si un extremo de una barra magnética está incluido en una superficie, el número de líneas de campo que dejan la superficie es exactamente igual al número de las que entran en la superficie, es decir que el flujo neto de campo a través de cualquier superficie cerrada es cero [63]:

$$\phi_{m,neto} = \oint_S B_n dA = 0 \tag{4}$$

El resultado de la ecuación (4) es la ley de Gauss del magnetismo, esta afirmación matemática comprueba que no existen los polos magnéticos aislados.

Ley de Faraday

Un conductor que es afectado por un flujo magnético variable en el tiempo, genera en los terminales un voltaje inducido y en lazo cerrado una corriente inducida que puede evidenciarse con un amperímetro que cierra terminales, Faraday estableció que la fuerza electromotriz inducida se expresa por la ecuación (5).

$$\varepsilon = -N\frac{d\phi}{dt} \tag{5}$$

De la ecuación se puede observar que la fem está relacionada con una variación de flujo, es decir que el flujo por sí solo no genera una corriente inducida sino que este debe tener una variación respecto al circuito, de las ecuaciones de flujo mencionadas anteriormente se puede obtener de (5) la ecuación (6)

$$\varepsilon = -\oint_A \frac{\partial B_n}{\partial t} dA = \oint_A E \cdot dl \tag{6}$$

De la ley de Faraday se obtiene que todo campo magnético variable en el tiempo genera un campo eléctrico [63].

Magnetostática

La magnetostática existe como un subcampo de la electromagnética, este describe un campo magnético estático, estos se pueden encontrar por ejemplo en el campo magnético generado por una corriente eléctrica constante o el campo que genera un imán permanente. Las ecuaciones de interés para este proyecto en la magnetostática son la ley de Gauss.

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = \mathbf{0} \tag{7}$$

Y la ley de Maxwell- Ampere

$$\nabla \times \boldsymbol{B} = \mu_0 \mathbf{J} \tag{8}$$

Donde **B** es la densidad de flujo magnético, **J** es la densidad de corriente o corriente por unidad de área transversal en un conductor por el que circula corriente y μ_0 es la permeabilidad del vacío ($\mu_0 = 4\pi x10 - 7\mathrm{Tm/A}$). Ahora es importante recordar que en la versión del magnetismo de la Ley de Gauss no hay cargas magnéticas otra consecuencia de esta ley es que la densidad de flujo magnético es solenoidal, lo que implica que este puede escribirse como el resultado de la interacción de otro campo vectorial.

$$\boldsymbol{B} = \nabla \times \mathbf{A} \tag{9}$$

Donde **A** es llamado el vector de potencial magnético. En la rama eléctrica, el potencial eléctrico permite tener una forma de expresión más eficiente para las ecuaciones de la electrostática y las corrientes estacionarias, por su parte el vector de potencial magnético permite una forma más eficiente de formular las ecuaciones de la magnetostática.

Cogging forcé

Esta fuerza se debe a la superposición de campo magnético de bobina alimentada y estator o material magnético, cuando los bordes de estos tratan de alinearse generan una fuerza cuyos componentes se presentan longitudinal y perpendicularmente, la longitudinal es la que genera mayor afectación en el empuje lo que genera rizado [65].

Este término es usado comúnmente en los motores y se debe a la presencia de ranuras en la armadura, en el caso de las maquinas lineales estas ranuras son mucho más abiertas que en los motores rotativos por lo que su efecto es más notable, por su puesto el fenómeno se presenta tanto en motores como en generadores lineales.

Maquinas Lineales

Los generadores lineales son máquinas usadas en la industria y en el ambiente doméstico, un gran ejemplo de uso de generadores lineales son los trenes de levitación magnética de alta velocidad, del mismo modo vehículos eléctricos, robots y sensores biónicos emplean este tipo de máquinas rápidas como actuadores. El principio de operación de estas máquinas es igual al de las maquinas rotativas solo que cambiando el plano de movimiento, la Figura 16 presenta de manera gráfica la equivalencia que se tiene entre ambos tipos de maquia, en la maquina lineal el traslador es la parte móvil con movimiento longitudinal análogo a un rotor con cinemática rotacional.

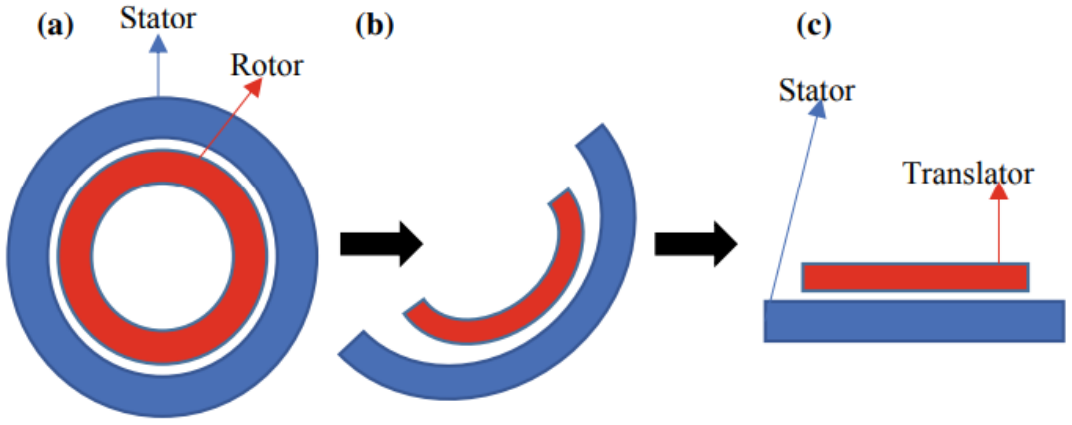


Figura 16, presentación grafica de la equivalencia entre generador lineal y axial[10].

Partiendo de esto se puede tomar que las ecuaciones de las maquinas rotativas son aplicables a las maquinas lineales con unas ligeras modificaciones, por ejemplo la fuerza de torque de la maquina

rotativa pasa a ser la fuerza lineal en la maquina lineal, la velocidad angular pasa a ser la velocidad lineal.

Método de elementos finitos

Es un método empleado para resolver problemas de análisis ya sea a nivel estático y dinámico de un sistema, comúnmente de una estructura, la cual para ejecutar el método se divide o discretiza en pequeñas partes a las que se denomina elementos finitos, estas partes se conectan entre sí mediante puntos nodales, de esta manera la estructura pasa a ser de infinitos grados de libertad a finitos grados de libertad. Este método no se remite exclusivamente a fines industriales o investigativos sino que también pueden contribuir al desarrollo académico facilitando la comprensión de múltiples fenómenos y brindando una visión más cercana a algunos campos de aplicación, tal y como plantean los autores Rodríguez, Torres y Vacca de [66] en su investigación estudiada con este método,

En la literatura se pueden encontrar diferentes métodos para realizar la discretización de la estructura, el más común es dividir en triángulos la superficie a analizar, formando una malla de triángulos ubicados donde el analista intuya que haya concentración de tensiones, además teniendo en cuenta que en estos puntos se establecerán elementos finitos con mayor finura que en las zonas en las que no se intuye tensión significativa para el análisis, a manera de ejemplo se presenta la superficie de la Figura 17 en la cual se discretiza por medio de elementos triangulares .

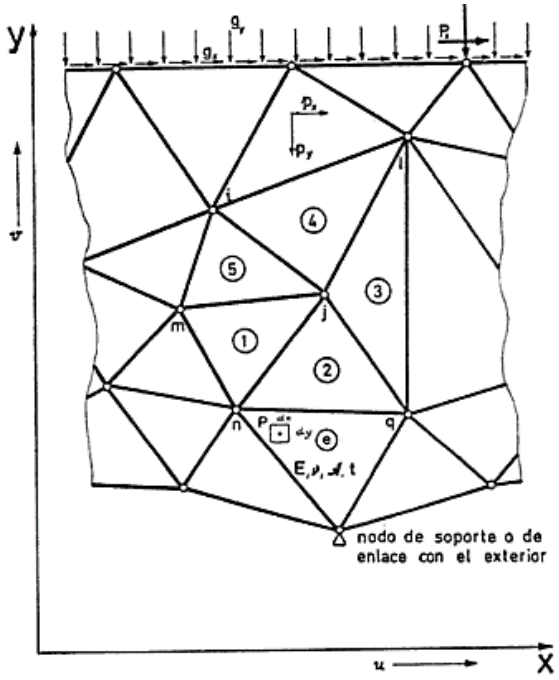


Figura 17, Discretización de una estructura en elementos triangulares [67].

De dicha superficie se analiza cada elemento desde los puntos nodales que generan, dejando así dos grados de libertad por elemento y cuyos corrimientos nodales se pueden observar en la Figura 18.

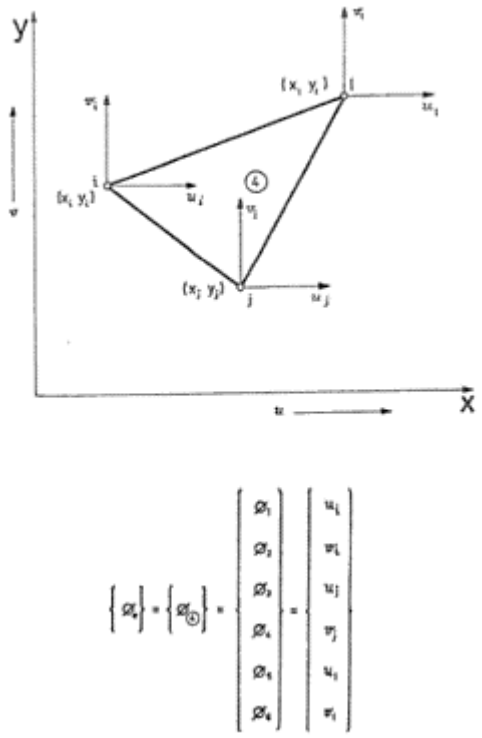


Figura 18, elemento finito triangular junto con sus corrimientos nodales [67].

Usualmente este proceso lo realiza computacionalmente un software de análisis ya que es bastante complejo y extenso dado que por más que sea finito aparecen muchos elementos en la estructura.

5.3. Marco Legal

El desarrollo del proyecto tendrá en cuenta la normativa referente al desarrollo y uso de fuentes no convencionales de energía renovable en Colombia, los cuales se promueven mediante la Ley 7115 de 2014, "Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovable no convencionales al sistema energético nacional" aprobada por el congreso de la república de Colombia. A partir de la ley anterior se han desprendido diferentes regulaciones que se deben considerar y acatar para el aprovechamiento de energías no renovables, las cuales se listan a continuación:

- Decreto 2469 de 2014 "Por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración"
- Resolución UPME 0281 de 2015 "Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala"

- Decreto 348 de 2017 “Por el cual se adiciona el Decreto 1073 de 2015, en lo que respecta al establecimiento de los lineamientos de política pública en materia de gestión eficiente de la energía y entrega de excedentes de autogeneración a pequeña escala”.
- Resolución CREG 015 de 2018 “Por la cual se establece la metodología para la remuneración de la actividad de distribución de energía eléctrica en el Sistema Interconectado Nacional”.
- Resolución CREG 030 de 2018 “Por la cual se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación distribuida en el Sistema Interconectado Nacional”

6. Metodología

La selección de la topología se realiza basándose en la literatura analizada, la selección contempla principalmente el tipo de magnetización de los imanes, presencia o no de dientes y el tipo de núcleo de la estructura, en la sección **5.1** se identificaron las características, ventajas y desventajas de cada uno de estos parámetros de diseño. De la Tabla 2 se tiene la comparación de topologías con base en el tipo de magnetización de los polos, se determina emplear una topología axial, pues aunque la topología Halbach tiene la mejor densidad de fuerza, tiene también el mayor costo y la integración mecánica más compleja, lo cual se soporta conjuntamente con el porcentaje de investigadores dentro de la literatura revisada que escogieron la magnetización axial. En la Figura 19 se puede observar que la magnetización axial es la más empleada.

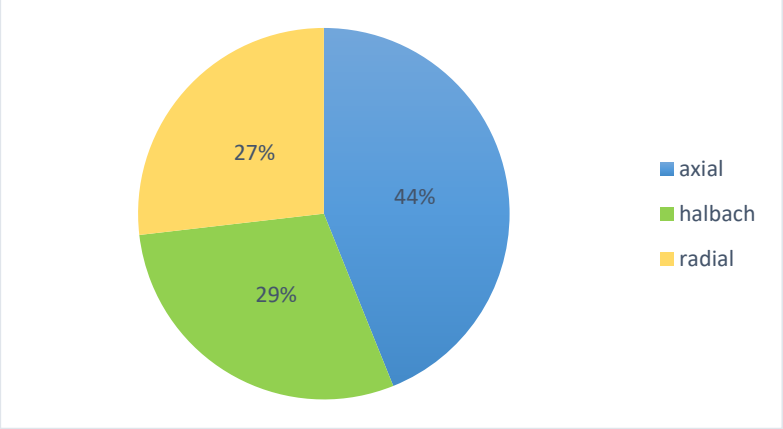


Figura 19. Porcentaje tipo de magnetización implementada en las topologías analizadas. Fuente: Elaboración propia.

Entre las topologías analizadas en la Tabla 3 se identificó que la presencia de dientes asegura una mayor densidad de flujo inducido a la bobina, además en la Figura 20 se observa que es un criterio más común por los investigadores escoger una estructura con dientes, aun cuando esto se refleja en el efecto cogging que se produce entre los imanes y la estructura, se prioriza la eficiencia.

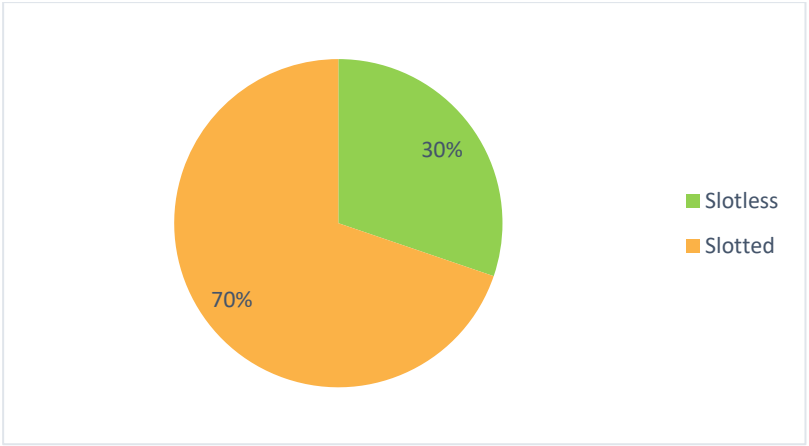


Figura 20. Porcentaje tipo de estructura implementada en las topologías analizadas. Fuente: Elaboración propia.

El criterio de selección por la estructura de dientes está relacionada a su vez con el tipo de núcleo ya que al escoger una topología con dientes, es está asumiendo indirectamente que la estructura será de un núcleo metálico, sin embargo, la selección del material del núcleo se da también por sus ventajas en cuanto al voltaje inducido, en la Figura 21 se consigna el porcentaje de utilización de cada material en las diferentes topologías de analizadas, el Hierro es el más común, entre otras ventajas el hierro ayuda a reducir la reluctancia del circuito magnético respecto a otros materiales [33], en la simulación se empleara una estructura de hierro de una sola pieza, sin embargo, en la práctica a futuro, se propone una estructura laminada ya que contribuye a la reducción de pérdidas en el hierro.

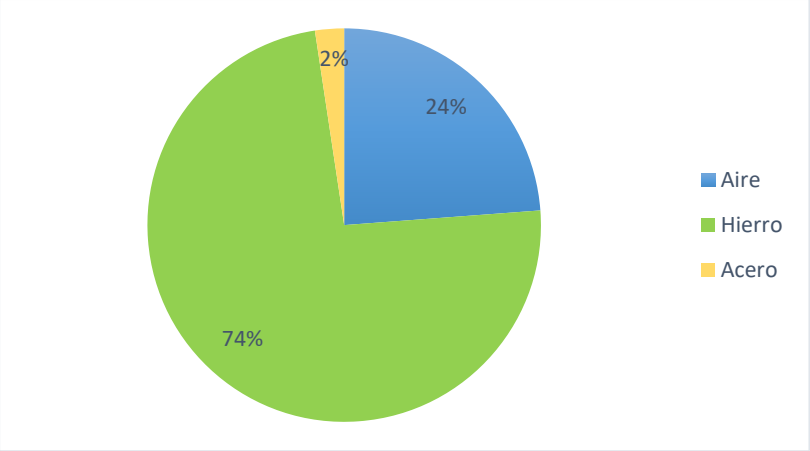


Figura 21. Porcentaje material de estructura implementada en las topologías analizadas. Fuente: Elaboración propia.

Una vez seleccionadas las características o parámetros de la topología seleccionada se establece un método de diseño y propuesta de topología, en la Figura 22 se presenta la metodología para el desarrollo de la topología propuesta hasta la solución final. A grandes rasgos la metodología parte de los parámetros iniciales definidos por el diseñador, luego se realiza el diseño de la topología base, la cual se obtuvo del análisis de la literatura, se realiza el análisis con el método de elementos finitos tanto sin carga como con carga y se compara con algunas otras topologías.

Si la topología seleccionada tiene resultados que continúen posicionándola como una buena opción, se procede a realizar una variación de dientes a una cantidad limitada de propuestas en cuanto a la forma de estos, para cada uno se realiza el análisis por el método de elementos finitos y una vez se complete el análisis sobre la cantidad de propuestas generadas, se realiza una selección de la variación con resultados superiores a las demás, finalmente se compara con la propuesta base, el resultado de la comparación da como resultado la solución final propuesta.

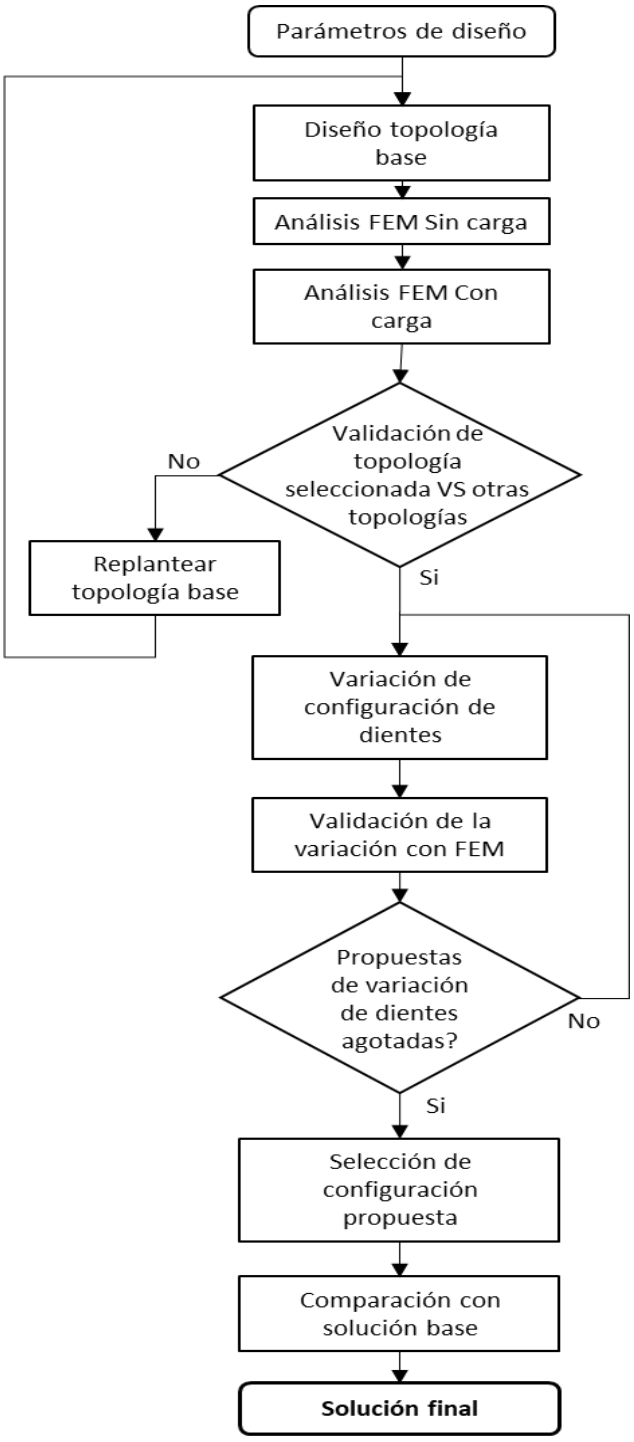


Figura 22. Diagrama de flujo de la solución desarrollada.

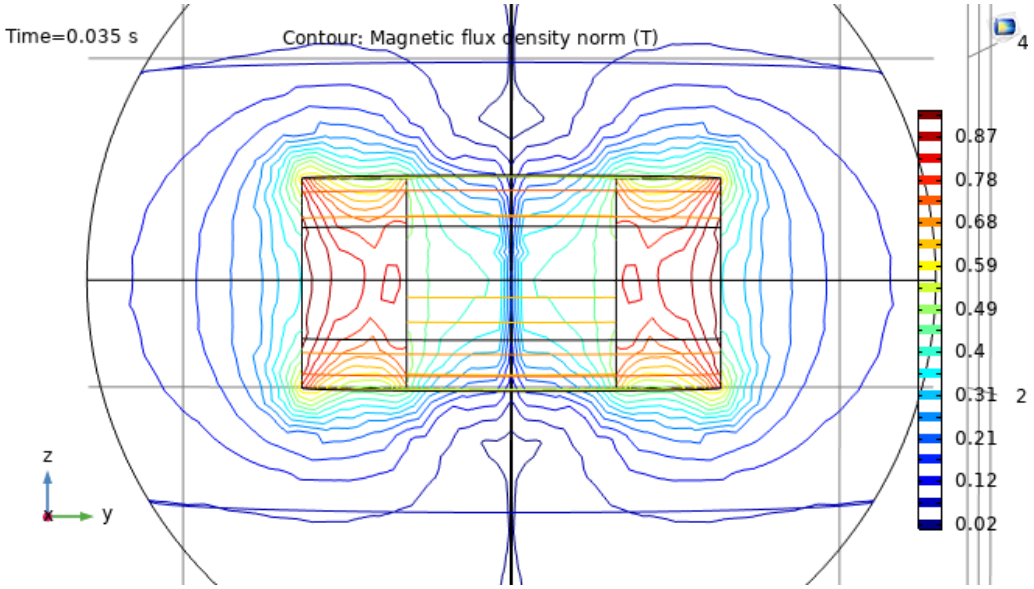
Para el diseño del generador se tienen unos parámetros de diseño iniciales los cuales se presentan en la Tabla 5, otros criterios de diseño son un diámetro total no mayor a 0.08 m y un largo de la estructura total entre 0.1 y 0.2 m, es decir no solo el estator y el traslador si no los soportes y elementos adicionales para la maquina en su totalidad.

Tabla 5. Parámetros de diseño iniciales.

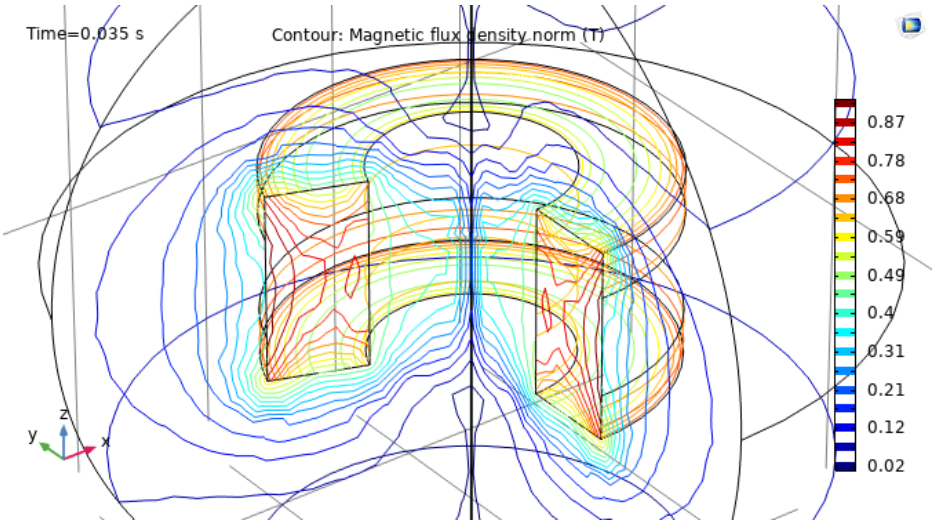
Voltaje pico sin carga v_o	40 vp
Frecuencia	40 Hz
Fases	3
Factor de llenado (Fill factor) ff	0.6
Polos / fase q	1
Potencia P	10 W
Magnetización	Axial

6.1 Diseño de topología base

El imán seleccionado corresponde a la referencia RX088 comercializado por K&J Magentics, esta referencia tiene un grado de magnetización N42 y su material es NdFeB el cual es de un uso cada vez más común en las maquinas debido a sus características superiores a la ferrita en este tipo de aplicaciones. Sus dimensiones son de 0.0254 m (1") de diámetro exterior, 0.0127 m (0.5") de diámetro interior y 0.0127 m (0.5") de grosor, en el Anexo de la hoja técnica del imán se encuentran con mayor detalle las características del imán, en la Figura 23 a) se puede observar la representación en elementos finitos del campo magnético del imán seleccionado en vista de corte de dos dimensiones y en la Figura 23 b) una vista isométrica con corte.



a)



b)

Figura 23. Representación del campo magnético del imán RX088: a) vista de corte en 2D b) vista de corte 3D isometrica , Fuente: elaboración propia.

La selección de polos y ranuras debe tener en cuenta múltiples parámetros y recomendaciones de otros autores, por una parte se tiene una constante de polos por slot de 1 (q) y un sistema de tres fases, en principio la cantidad de imanes mínima para tres bobinas en este caso sería tres, sin embargo autores como Kim et. al. y Arslan y Oy [69], [70] han experimentado con diferentes combinaciones de polos/slots los cuales se soportan a su vez en el trabajo más extenso de Miller en [71], del cual se extraen algunas combinaciones sugeridas en la Tabla 6.

Tabla 6. Combinaciones de polos y slots (ranuras).[71]

Slots	3	6	9	12	15	18	…
Polos	2	2	2	2	2	2	
	4	4	4	4	4	4	
		8	6	8	8	6	
		10	8	10	10	8	…
			10	14	14	10	
			12	16	16	12	
			14	20	20	14	

Entre las combinaciones que presentan los autores se determina emplear 4 polos y 3 ranuras para la simulación de elementos finitos, en este caso es favorable escoger cuatro polos dado que de esta manera se previene el efecto fin en las bobinas.

$$p = 4$$

Entre los parámetros de diseñador se define que el largo del generador debe ser de 10 a 20 cm, en la topología propuesta el traslador debe ser más largo que el estator con el propósito de evitar el efecto fin en las bobinas de los extremos, sin embargo para la simulación en el software Comsol se empleara un largo de 0.08 m para fines de simulación, sin embargo el prototipo final contara con un largo mayor que evita el efecto fin en las bobinas. El largo seleccionado para la simulación es de $L_t = 0.08\ m$.

A partir del largo del traslador y las dimensiones del imán, se puede calcular el paso polar el cual se presenta en la ecuación (10).

$$\tau_p = \frac{L_t}{P} = \frac{0.08m}{4} = 0.02m \tag{10}$$

A partir del paso polar y las dimensiones conocidas del imán se tiene un espaciador de hierro entre imanes, esta distancia se presenta en la ecuación (11).

$$\tau_e = \tau_p - \tau_m = 0.02m - 0.0127m = 0.0073m \tag{11}$$

En donde τ_e es el tamaño del espaciador de hierro, τ_m es el grosor del imán.

Entre los parámetros de diseño se establece la cantidad de polos por fase en uno (q) por lo cual se tiene en este caso $\tau_p = \tau_r$, siendo τ_r el paso de ranura en el estator. En las ecuaciones (12) y (13) se presenta el cálculo del ancho calculado para el slot de la bobina y el diente en el estator.

$$b_s = \frac{2}{3}\tau_r = \frac{2}{3}0.02m = 0.01333m \tag{12}$$

$$b_d = \frac{1}{3}\tau_r = \frac{1}{3}0.02m = 0.00666m \tag{13}$$

En donde b_c es el ancho en la bobina y b_d es el ancho en el diente, el alto de la bobina se define en $h_s = 0.003\ m$ y el ancho que queda del yugo se define en 0.0003 m.

De acuerdo con Nasar en [72] el flujo magnético en el air gap B_g se encuentra normalmente entre 0.6 y 0.7 Teslas este valor se asumirá como 0.65 para el cálculo de la cantidad de vueltas por bobina que se realiza en la ecuación (14).

$$N = \frac{\pi V_p}{2(2\pi f)B_g\tau_p\pi\bar{r}} = \frac{\pi * 40V}{2 * (2\pi * 40Hz) * 0.65T * 0.02m * \pi * 0.0162m} \tag{14}$$

$$N = 377.86\ vueltas$$

Para dejar un número entero de vueltas se aproxima por arriba $N = 378$.
El área del hilo de cobre se obtiene en la ecuación (15) con los valores determinados para el factor de llenado, la dimensión del slot encontrado y la cantidad de vueltas que deben ir en este slot.

$$A_c = \sqrt{\frac{ff * b_s * h_s}{N}} = \sqrt{\frac{0.6 * 0.01333m * 0.003m}{378}} = 0.000252m^2 \quad (15)$$

$$A_c = 0.252mm^2$$

A partir del área del hilo del conductor se puede seleccionar un calibre basado en la tabla de calibres presentado en la Figura 24, en este caso se selecciona el más cercano por arriba, el calibre 23 que se encuentra sobresaltado en la figura.

AWG gauge	Conductor Diameter Inches	Conductor Diameter mm	Conductor cross section in mm^2	Ohms per 1000 ft.	Ohms per km	Maximum amps for chassis wiring	Maximum amps for power transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper	Breaking force Soft Annealed Cu 37000 PSI
0000	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	380	302	125 Hz	6120 lbs
000	0.4096	10.40384	84.9	0.0618	0.202704	328	239	160 Hz	4860 lbs
00	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	283	190	200 Hz	3860 lbs
0	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	245	150	250 Hz	3060 lbs
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	211	119	325 Hz	2430 lbs
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	181	94	410 Hz	1930 lbs
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	158	75	500 Hz	1530 lbs
4	0.2043	5.18922	21.1	0.2485	0.81508	135	60	650 Hz	1210 lbs
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	118	47	810 Hz	960 lbs
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	101	37	1100 Hz	760 lbs
7	0.1443	3.66522	10.6	0.4982	1.634096	89	30	1300 Hz	605 lbs
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	73	24	1650 Hz	480 lbs
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	64	19	2050 Hz	380 lbs
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	55	15	2600 Hz	314 lbs
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	47	12	3200 Hz	249 lbs
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	41	9.3	4150 Hz	197 lbs
13	0.072	1.8288	2.63	2.003	6.56984	35	7.4	5300 Hz	150 lbs
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	32	5.9	6700 Hz	119 lbs
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	28	4.7	8250 Hz	94 lbs
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	22	3.7	11 k Hz	75 lbs
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	19	2.9	13 k Hz	59 lbs
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	16	2.3	17 kHz	47 lbs
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	14	1.8	21 kHz	37 lbs
20	0.032	0.8128	0.519	10.15	33.292	11	1.5	27 kHz	29 lbs
21	0.0285	0.7239	0.412	12.8	41.984	9	1.2	33 kHz	23 lbs
22	0.0253	0.64516	0.327	16.14	52.9392	7	0.92	42 kHz	18 lbs
23	0.0226	0.57404	0.259	20.36	66.7808	4.7	0.729	53 kHz	14.5 lbs
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	3.5	0.577	68 kHz	11.5 lbs
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	2.7	0.457	85 kHz	9 lbs

Figura 24. Tabla de calibres AWG y características. [73].

El cable seleccionado, según la referencia estadounidense de calibres de cable (AWG, por sus siglas en ingles), tiene capacidad de transmitir un máximo de 0.729 A, en la ecuación (16) se verifica si es un valor adecuado para el sistema, la densidad de corriente en el conductor J_c se selecciona como 5 A/mm^2 cuya intención es prevenir el exceso de pérdidas y se soporta también en que se va a tener una refrigeración del sistema al aire libre [33].

$$I_r = \frac{b_s * h_s * ff * J_c}{N} = \frac{0.01333m * 0.003m * 0.6 * 5 * 10^6\ A/m^2}{378} \quad (16)$$

$$I_r = 0.3174\ A$$

El cable 23 AWG tiene la capacidad de transmitir un máximo de 0.729 A, con la corriente esperada calculada se estaría operando por debajo del 50% de la capacidad del cable, lo cual es favorable dado que en la practica la velocidad puede variar implicando unos picos de voltaje posiblemente mayores.

El valor de corriente sin embargo, dependerá de la carga, para este caso, se adecuara la carga para obtener una potencia de 10W, como se estableció inicialmente. Para determinar la resistencia de carga y posteriormente identificar las perdidas en el cobre, es necesario calcular la resistencia de carga del generador, la ecuación (17) calcula en primer lugar la cantidad aproximada de cable en metros que se tiene para la cantidad de vueltas y el área del slot.

$$L_c = N2\pi\bar{r} = 378 * 2 * \pi * 0.0162m = 38.4757m \tag{17}$$

En donde N es el número de vueltas en la bobina y $\bar{r}$ es el valor promedio del radio de la bobina, teniendo en cuenta que es una bobina de múltiples capas, se toma el valor promedio para agilidad del cálculo, en la ecuación (18) se realiza el cálculo de la resistencia de cada bobina del generador.

$$R_c = \frac{L_c}{\sigma_{cu} * D_c} = \frac{38.4757m}{(6 * 10^7)\, S/m * (2.59 * 10^{-7})m^2} \tag{18}$$

$$R_c = 2.4759\ 1/S\ =\ 2.4759\ \Omega$$

Donde L_c es el largo del cable en metros, σ_{cu} es la conductividad del cobre en Siemens sobre metro y D_c es el diámetro del cable en metros cuadrados, el cual se obtiene de las características del calibre seleccionado.

Con la resistencia del generador es posible calcular la carga aproximada para obtener la potencia definida de 10W, en la ecuación (19) se presenta el cálculo.

$$R_L = \frac{{V_o}^2}{P} - R_c = \frac{40V^2}{10W} - 2.4759\ \Omega \tag{19}$$

$$R_L = 157.5241\ \Omega$$

DondeR_L es la resistencia de carga, V_o es el voltaje en circuito abierto, P es la potencia esperada y R_c es la resistencia de la bobina del generador. Para efectos de la simulación se empleara el valor entero de resistencia, en este caso se aproxima $R_L = 158\ \Omega$.

Considerando el voltaje y la potencia de diseño se espera una corriente aproximada a la que se presenta en la ecuación (20).

$$i_L = \sqrt{\frac{P}{R_L}} = \sqrt{\frac{10\ W}{158\ \Omega}} = 0.2496\ A \quad (20)$$

La velocidad del traslador para generar un voltaje a la frecuencia seleccionada está determinado por la ecuación (21) y depende de la frecuencia seleccionada y el paso polar. (

$$v = 2f\tau_p = 2 * 40\ Hz * 0.02\ m = 1.6\ m/s \quad (21)$$

Las pérdidas en el cobre y en el hierro son elementos a tener en cuenta ya que de estos dependerán características de gran importancia como lo es la eficiencia, a partir de la corriente esperada y la resistencia del generador se calculan las pérdidas en el cobre por fase en la ecuación (22)

$$P_{cu} = I^2 R_c = (0.2496\ A)^2 * (2.4759\ \Omega) = 0.618\ W \quad (22)$$

La estructura del estator, cuyo material seleccionado es hierro, cuenta hasta el momento con el ancho del diente de $b_r = 0.00666m$ y un largo del diente equivalente al largo de la bobina *0.003 m,* el largo de la estructura del estator contemplando los dientes y las bobinas es de *0.06663 m,* el ancho del yugo se define en *0.003 m.*

En la Tabla 7 se consignan los parámetros finales para la simulación del generador con el método de elementos finitos.

Tabla 7, parámetros de la topología base diseñada.

Parámetro	Valor
Voltaje pico sin carga v_o	40 vp
Frecuencia f	40 Hz
Velocidad v	1.6 m/s
Fases	3
Resistencia de generador por fase R_c	2.4759 Ω
Numero de vueltas por fase N	378 vueltas
Polos p	4
Factor de llenado (Fill factor) ff	0.6
Polos / fase q	1
Resistencia de carga R_L	158 Ω

Corriente con carga i_L	0.2496 A
Potencia P	10 W
Magnetización	Axial
Diámetro interno imán D_{mi}	0.0127 m
Diámetro externo imán D_{mo}	0.0254 m
Altura imán h_m	0.0127 m
Paso polar τ_m	0.02 m
Largo de separador de polos	0.0073 m
Ancho de separador de polos	0.00635 m
Airgap g	0.002 m
Ancho de la ranura de bobina w_s	0.003 m
Largo de la ranura de bobina h_s	0.01333 m
Paso de diente τ_d	0.02m
Ancho de diente w_d	0.00666 m
Altura del diente h_d	0.003 m
Ancho del yugo del estator Y_s	0.003 m

Una vez definidos los parámetros se procede a realizar el diseño, el cual se realiza como un corte en 2D y mediante el software Comsol se realiza la revolución para formar el sólido, el diseño realizado se observa en la Figura 25 y se puede también evidenciar en la sección de anexos.

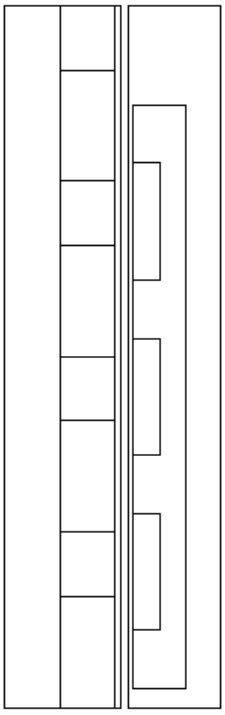


Figura 25. Topología base propuesta. Fuente: elaboración propia.

6.2 Análisis de topología base con FEM sin carga

Para la simulación se asigna la función de cálculo para cada material, en las secciones de hierro que corresponden a los separadores de polos y a la estructura del estator se asigna la ley de Ampere y se indica que el material tiene un modelo de magnetización de curva B-H, tal como se muestra en la Figura 26. Se puede observar también que el software presenta la ecuación a emplear, en este caso presenta la ecuación en su forma diferencial aplicada en el estudio estacionario, en el estudio dependiente del tiempo se complementa la ley con el diferencial del vector de potencial magnético A con respecto al tiempo $\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$.

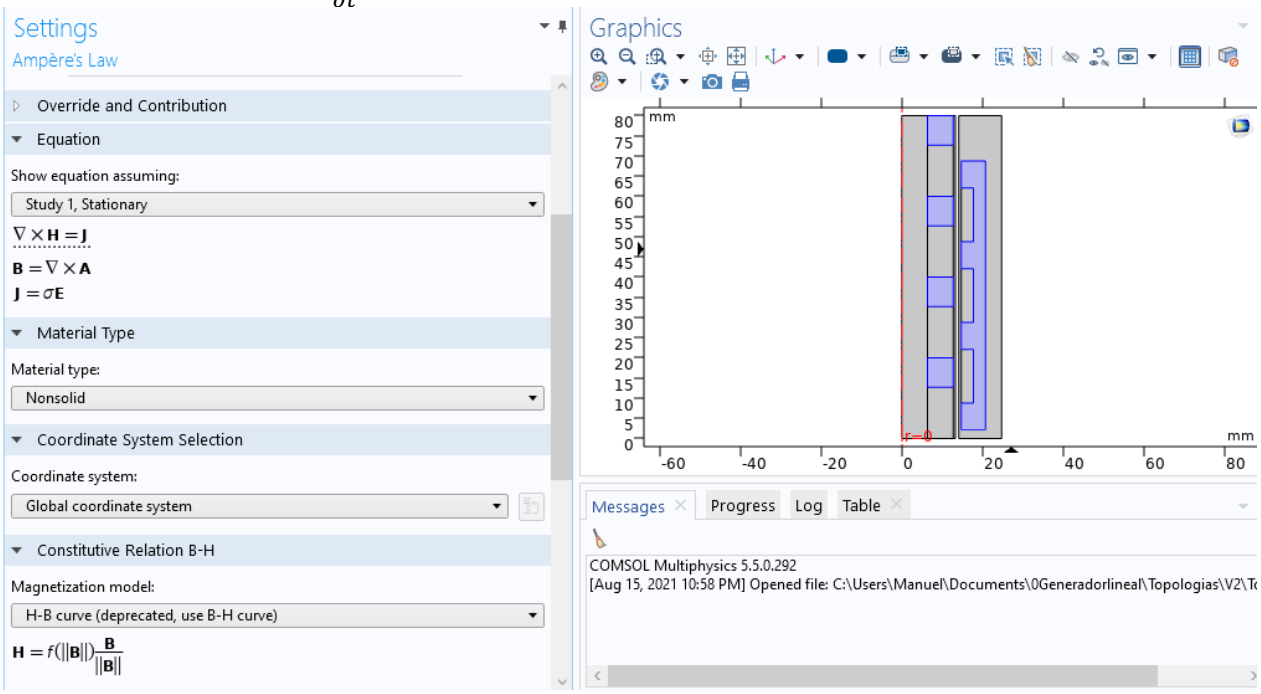


Figura 26. Asignación de ecuación a las secciones de Hierro en Comsol.

En la Figura 27 se presenta la curva BH en el primer cuadrante, que se emplea para hierro en el estudio, en este caso tomando los valores que suministra el software desde su registro para el material seleccionado, este aspecto es importante para el diseño en cuanto a las perdidas asociadas a los campos cambiantes en el estator.

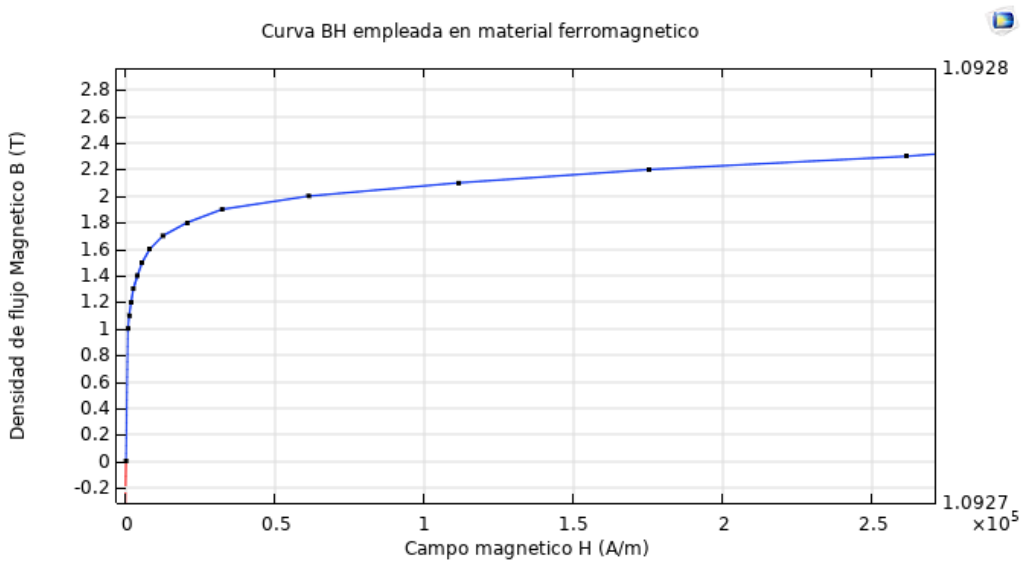


Figura 27. Curva BH para el material ferromagnético.

En el caso de cada bobina se crea un elemento de bobina en el que el software calcula la densidad de corriente inducida y se asignan los parámetros del diseño y se establece una corriente en la bobina de 0 A, debido a que se está empleando en función de generación, si fuese un motor lineal se asignaría una corriente para mover el estator. En la Figura 28 se observa la asignación realizada para una de las bobinas, esta se realiza para cada una de las bobinas.

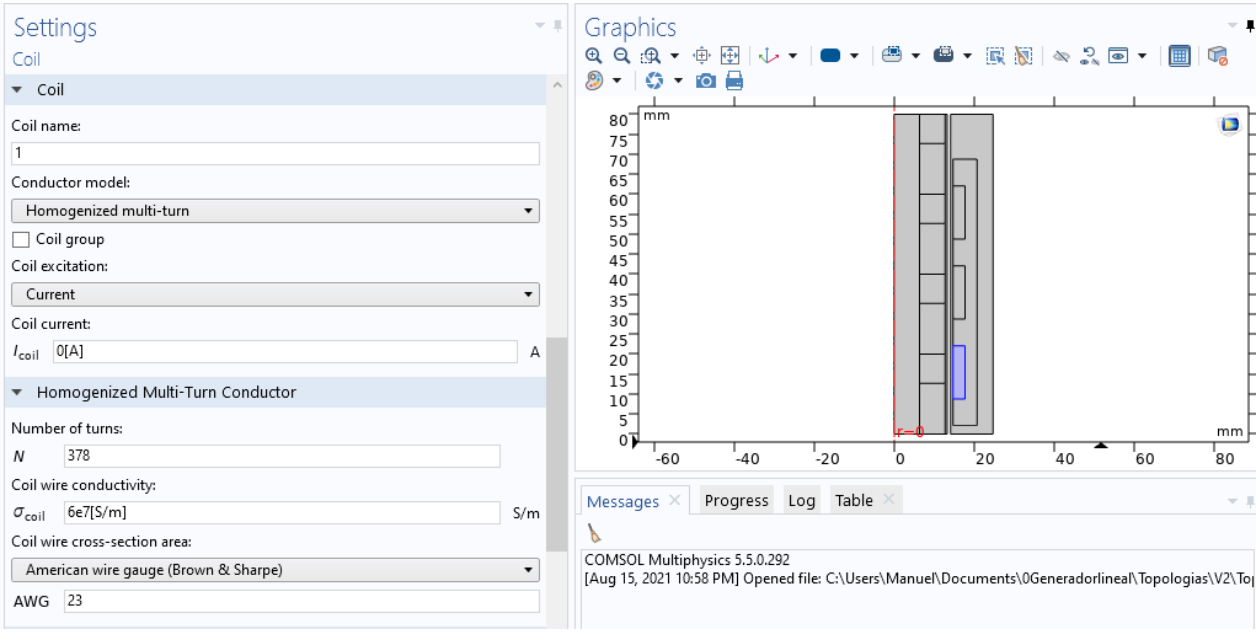


Figura 28. Asignación de ecuación a las bobinas en Comsol.

La densidad de corriente que fluye en el dominio de la bobina se calcula en el software a partir de una cantidad acumulada que constituye la excitación de la bobina. La ecuación de la densidad de

flujo para el modelo seleccionado de bobina de múltiples capas o múltiples vueltas se presenta en la ecuación (23)

$$J_e = \frac{NI_{bobina}}{A} e_{bobina} \tag{23}$$

En donde N es el número de vueltas de la bobina, I_{bobina} es la corriente que circula por la bobina y e_{bobina} es la excitación A es el área transversal del conductor. Todas las características de la bobina se pueden excitar con excitación de corriente, excitación de voltaje o, en ciertos casos, excitación de potencia. El valor o expresión suministrada se traduce a una densidad de corriente o campo eléctrico aplicado al dominio según el modelo de bobina utilizado. En este caso se define que la corriente I_{bobina} es cero dado que de lo contrario el sistema entendería que se le está inyectando una corriente mediante una fuente externa, en este caso la corriente será resultado de la inducción del flujo magnético en el estator.

Para los imanes se asigna al igual que con el hierro la asignación de la ley de Ampere, con la diferencia de que el modelo de magnetización es por densidad de flujo remanente, además se asigna la dirección de magnetización y el flujo remanente que está definido por el imán, en este caso para N42 se tiene una remanencia de 1.32 T, en la Figura 29 se observa la asignación de los parámetros mencionados (la variable B0 contiene el valor de remanencia de 1.32 T).

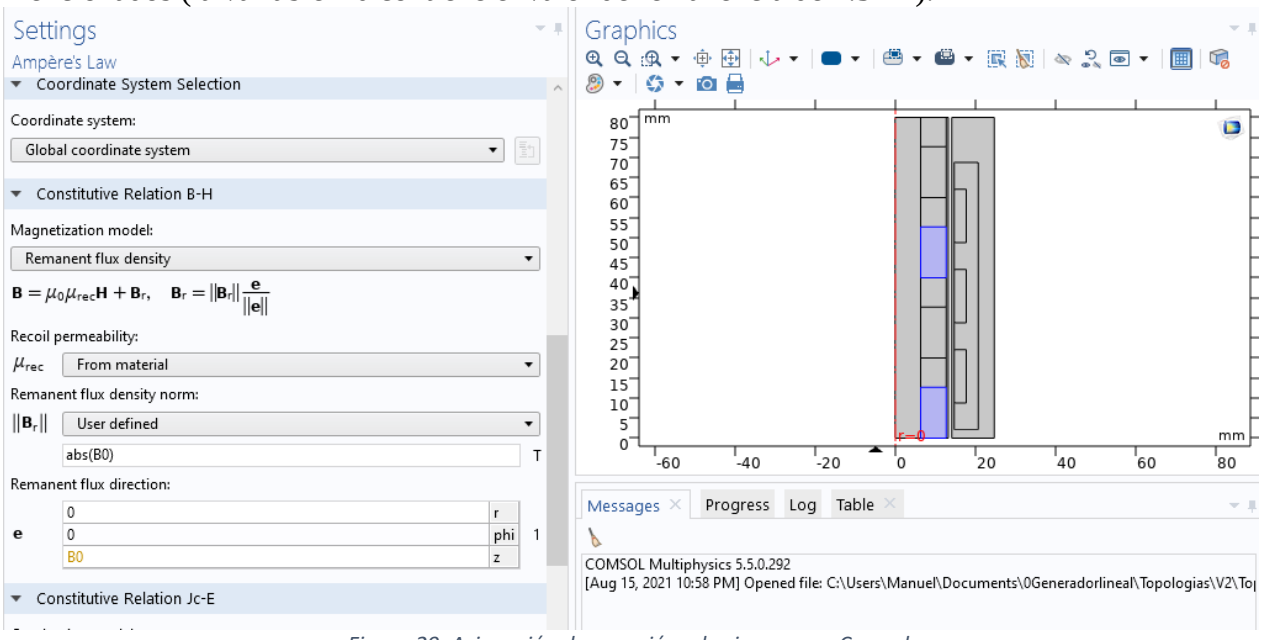


Figura 29. Asignación de ecuación a los imanes en Comsol.

Puesto que se está trabajando en coordenadas cilíndricas para realizar posteriormente la revolución del corte en 2D, la dirección de magnetización axial se define en el eje z, para el caso de los imanes que se deben ubicar en posición contraria, se asigna en la dirección opuesta sobre el mismo eje, como se aprecia en la Figura 30.

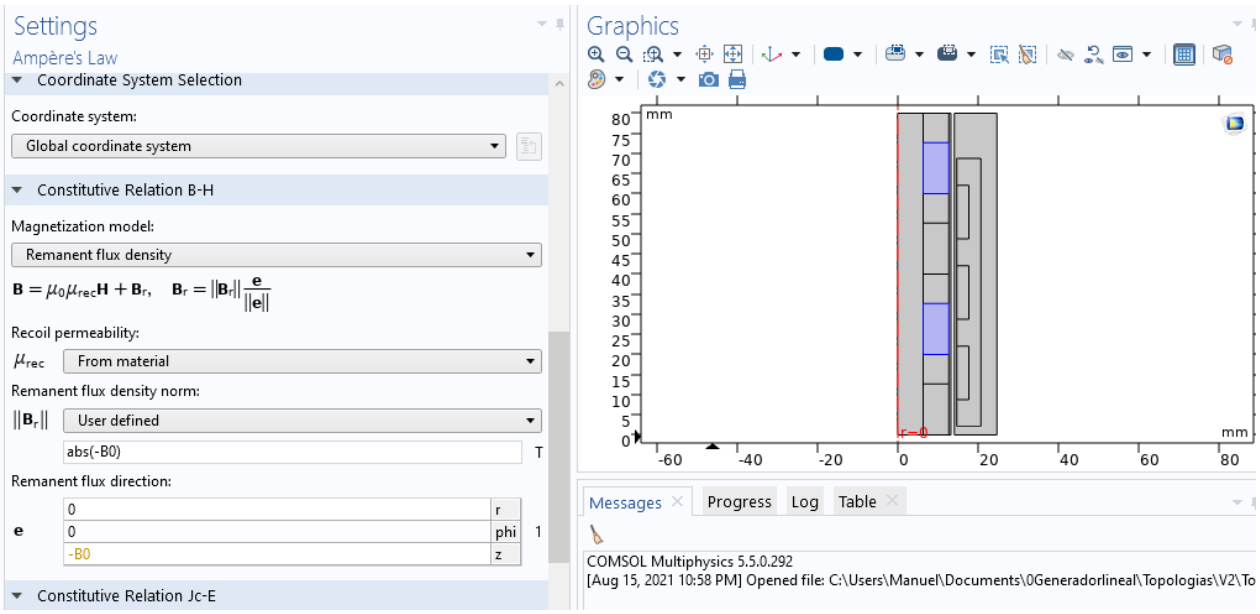
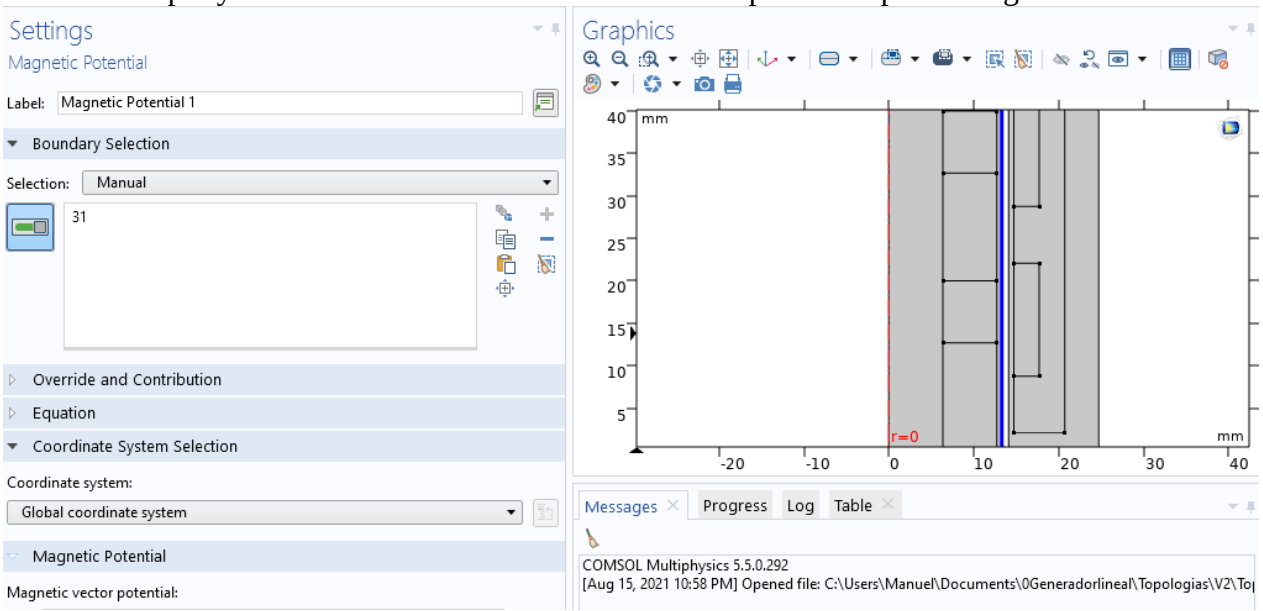


Figura 30. Asignación de ecuación a los imanes en sentido opuesto en Comsol.

Dado que el diseño está compuesto por dos partes, estator y traslador, se debe definir la geometría que genera el potencial magnético y la geometría que actuaría en el espacio como el conductor magnético, esta asignación se aprecia en la Figura 31, el vector de potencial magnético se ejecuta en dirección phi y con la definición de extrusión realizada para el mapeo de la geometría diseñada.



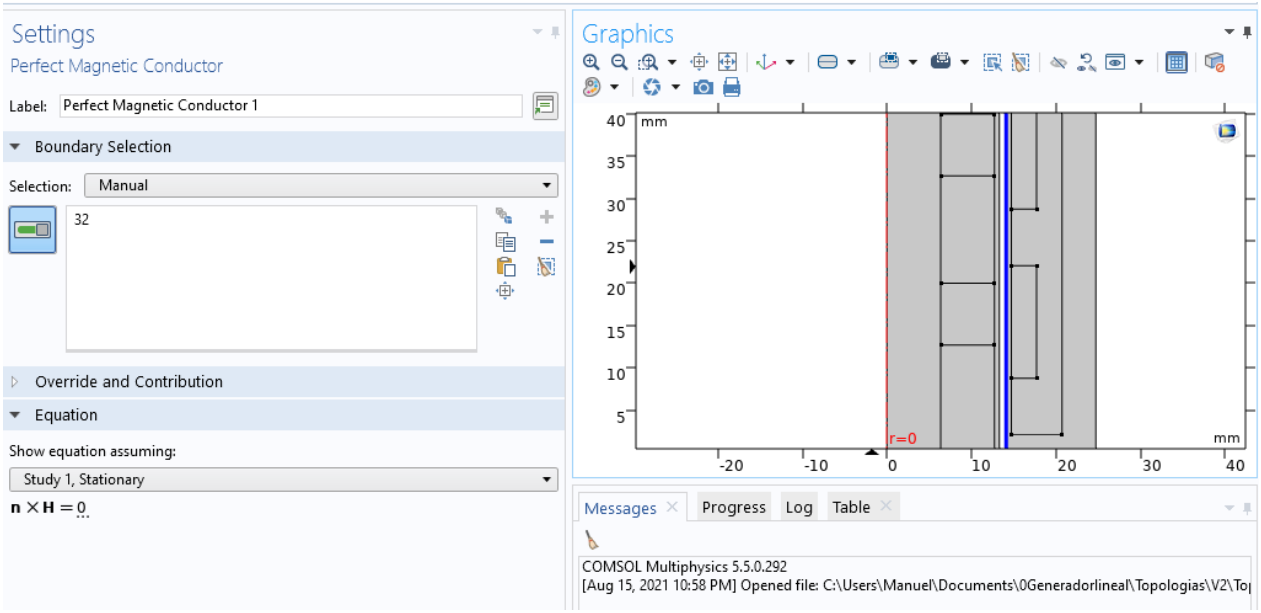


Figura 31. Asignación de potencial magnético y conductor magnético ideal.

Antes de crear la malla de elementos finitos se definen las geometrías que se desplazaran, para ello se define un desplazamiento lineal en la función analítica (pw1), con una pendiente de 1.6 que indica la velocidad, el desplazamiento se realizara por el tiempo mínimo para obtener un periodo completo de la onda con el fin de optimizar los recursos que requiere el software para el procesamiento. La señal de desplazamiento se observa en la Figura 32.

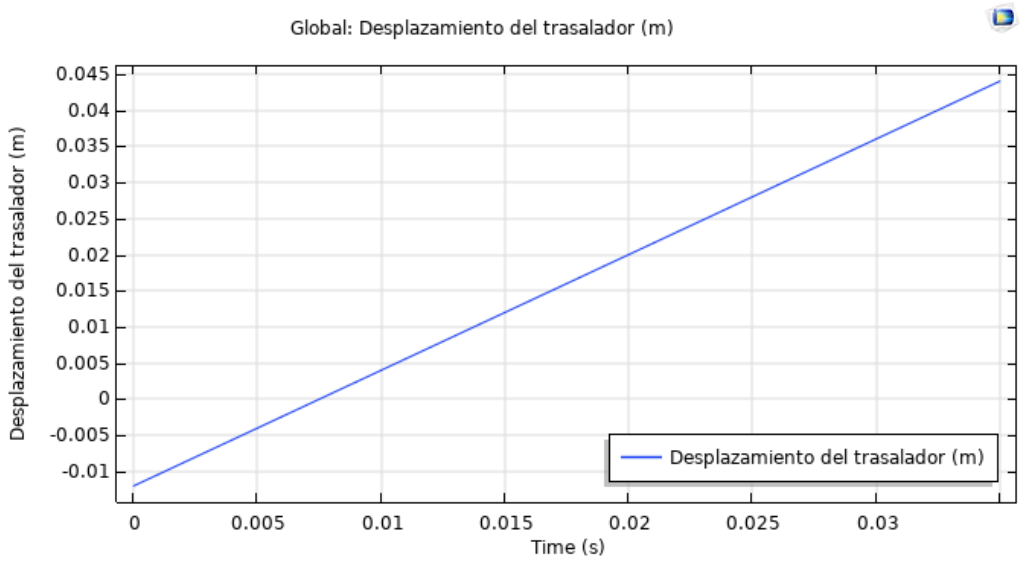


Figura 32. Señal de desplazamiento del traslador.

Luego se prescribe el movimiento de las geometrías del traslador asignando la señal de desplazamiento *an1* en el tiempo, en la Figura 32 se observa la asignación realizada, esto es necesario para que el software identifique que una de las mallas de elementos finitos es móvil, lo que no se encuentra seleccionado mantendrá una malla estática.

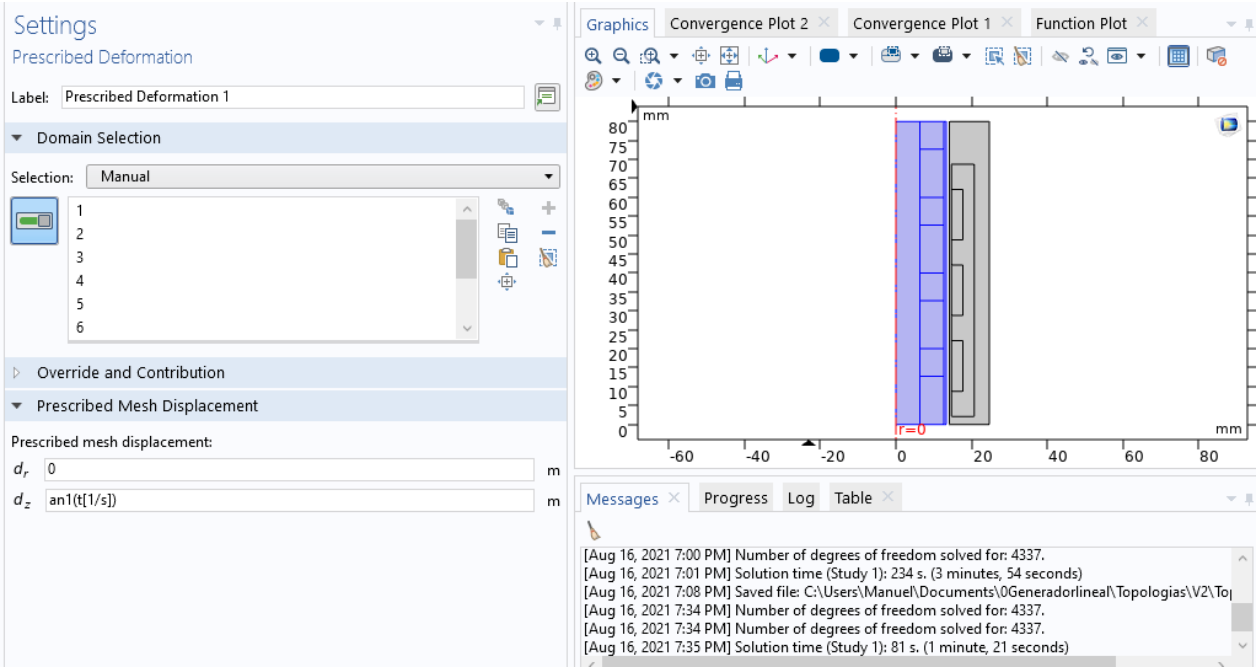


Figura 33. Asignación de malla móvil y señal de desplazamiento.

Por último se construye la malla de elementos finitos, cuanto más fina es esta mayor precisión va a tener la simulación, sin embargo es necesario tener en cuenta que implica mayor exigencia de recursos en la maquina en la que se ejecuta el análisis y la simulación, en la Figura 34 se presenta la malla establecida, los elementos con menor dimensión se ubican en la zona de conducción magnética entre las estructuras ya que es donde se presenta una mayor interacción y donde se requiere mayor atención.

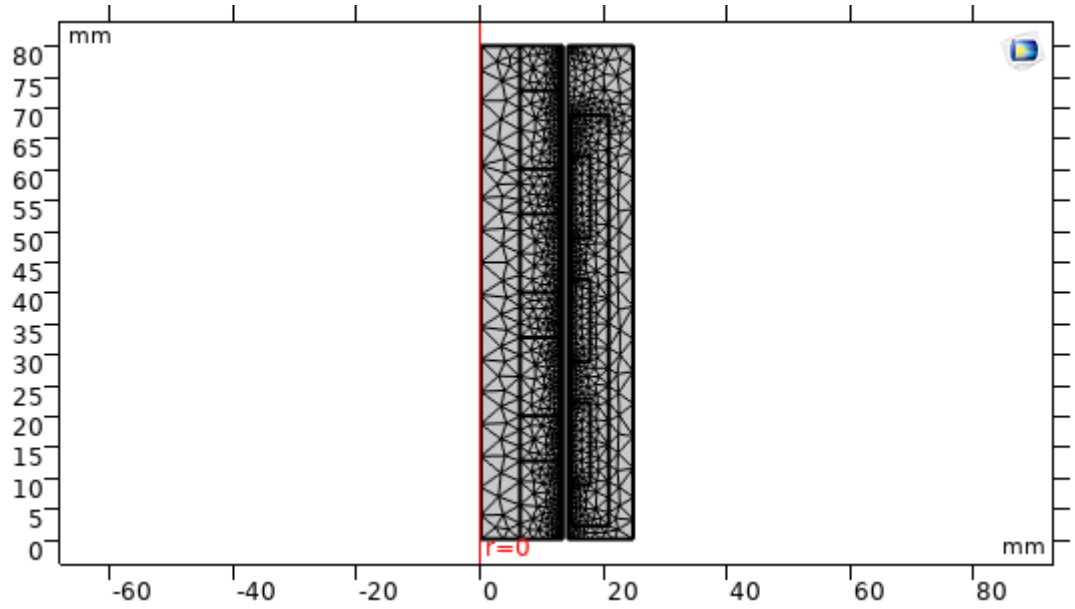


Figura 34. Malla de elementos finitos para topología base.

Al ejecutar el análisis del estudio diseñado, se obtiene la distribución del campo magnético en la revolución de la geometría 2D, es decir se obtiene un generador tubular y su densidad de flujo magnético en Teslas, ver Figura 35.

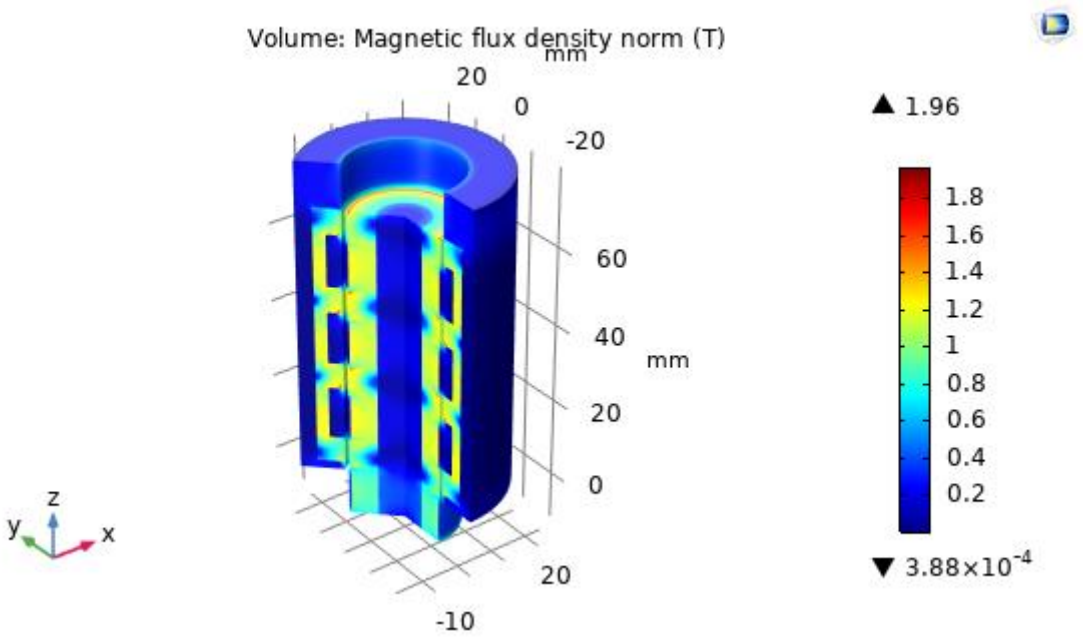


Figura 35. Densidad de flujo magnético en generador tubular lineal de topología base.

Desde la vista de corte en 2D se puede evidenciar de mejor manera las líneas de campo y el flujo magnético en la estructura, para ello se presenta la Figura 36, en este caso la densidad de flujo esta entre 1.2 y 1.4 T en la mayoría de las zonas del circuito magnético y en los bordes de los dientes del estator y del traslador se observa una concentración mayor del flujo, es decir se presenta el efecto de bordes en las aristas vivas del material magnetico.

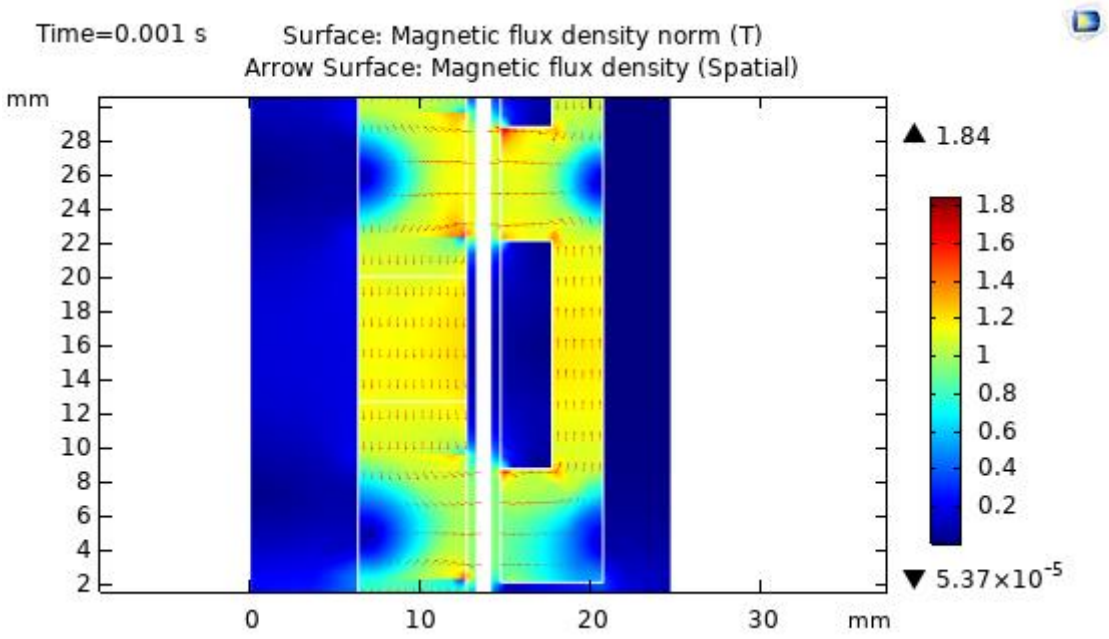


Figura 36. Líneas de campo magnético en la estructura en el tiempo 0.001 s de simulación.

Con el flujo magnético en la estructura el software determina la densidad de corriente en las bobinas que se muestra en Figura 37, las bobinas uno y tres que se ubican en los extremos de la estructura se encuentran en fase, por la misma construcción diseñada en la que el paso polar y el paso de ranura es equivalente, la bobina dos está desfasada 180° con respecto a las otras dos, sin embargo por la misma simetría este desfase es constante ante un movimiento lineal de traslador.

En cuanto al voltaje generado se cumple con los parámetros del diseño, en donde el voltaje pico es de 40 Voltios, por otra parte la forma de onda se ve recortada por efectos de la estructura, ya que posiblemente con un paso polar más grande para esta estructura se podría obtener una forma de onda más sinusoidal, sin embargo para efectos de análisis y de su posible acondicionamiento en futuros circuitos de potencia, puede ser admisible. La frecuencia que genera ronda los 40 Hz tal como se estableció en el diseño.

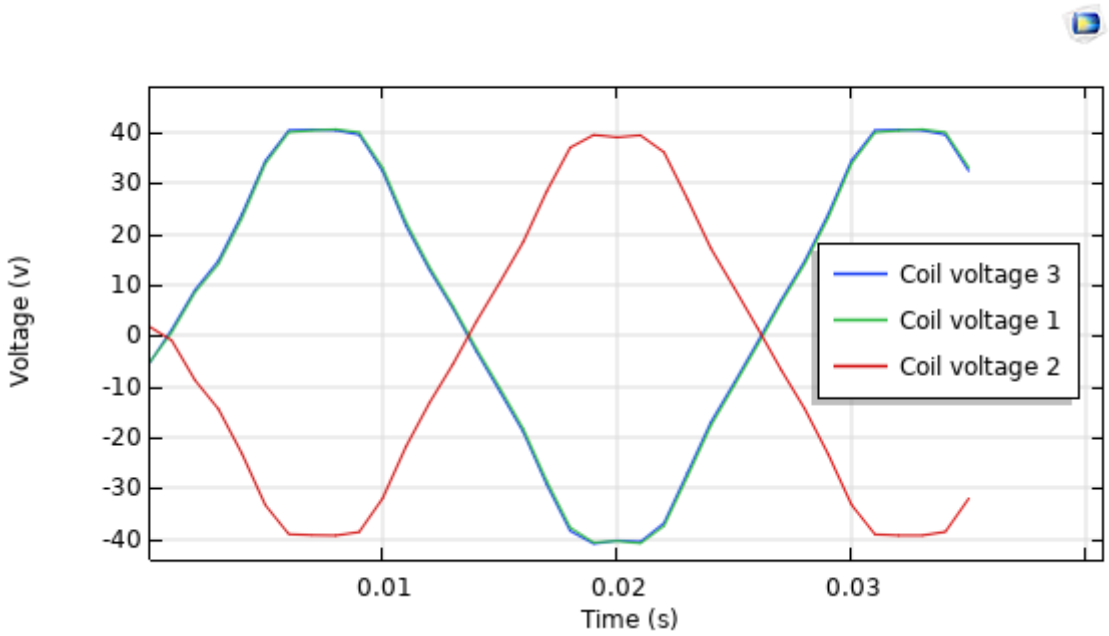


Figura 37. Voltaje inducido en las bobinas de la topología base sin carga.

En cuanto a la resistencia de cada bobina se genera en una tabla dentro del software Comsol, ver Figura 38, se puede observar que la resistencia en el tiempo es de 2.478Ω que representa solo 0.08% de error relativo con respecto a la resistencia calculada cuyo valor es de 2.4759 Ω.

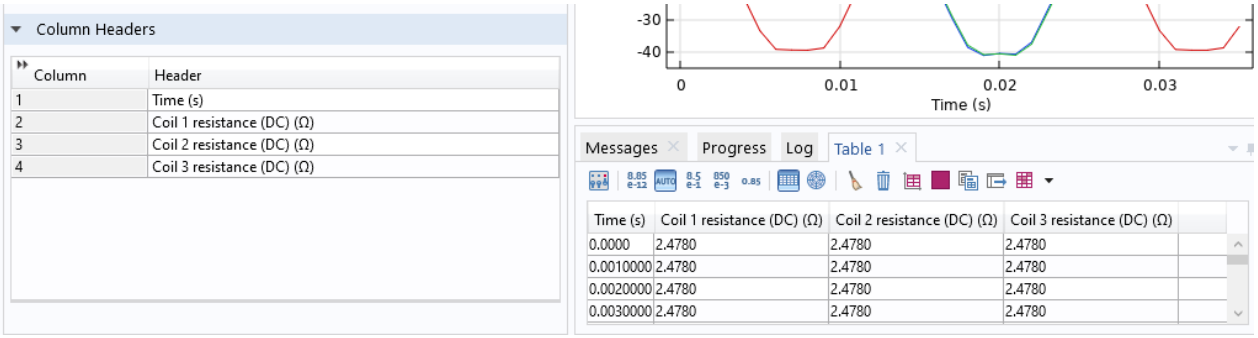


Figura 38. Reporte de resistencia en las bobinas en la topología base.

6.3 Análisis de topología base con FEM con carga

El análisis con carga requiere que se agregue un circuito, en este caso con los cálculos diseñados se establece una carga resistiva cuyo valor calculado es de 158 Ω, para programar la conexión en el software de la carga con el generador, en la Figura 39 se define en cada bobina que se tendrá una excitación de corriente para un circuito, esto se realiza en cada una de las bobinas.

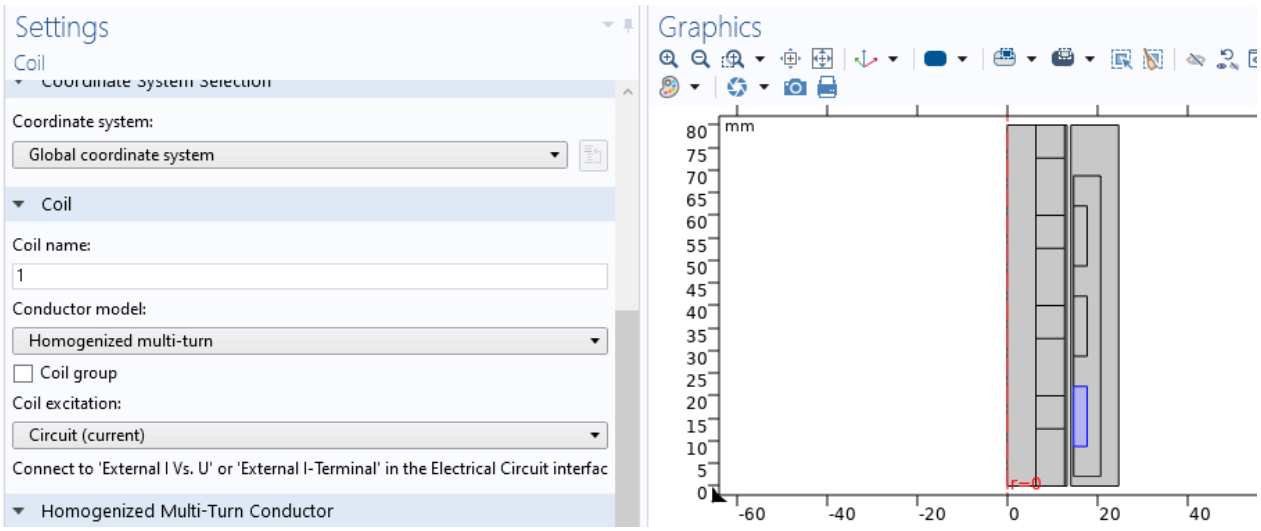


Figura 39. Definición de tipo de excitación en las bobinas de la topología base.

Posteriormente se crea un circuito en el que se tiene la resistencia de carga, en este caso, en paralelo a cada una de las bobinas se tiene una resistencia de carga del mismo valor en los tres casos, como se observa en la Figura 40 la resistencia de carga tiene el valor calculado para la potencia deseada. El circuito está compuesto por la resistencia de carga, el elemento de transformación de corriente proveniente del generador a voltaje y una tierra de referencia para la medida en el software.

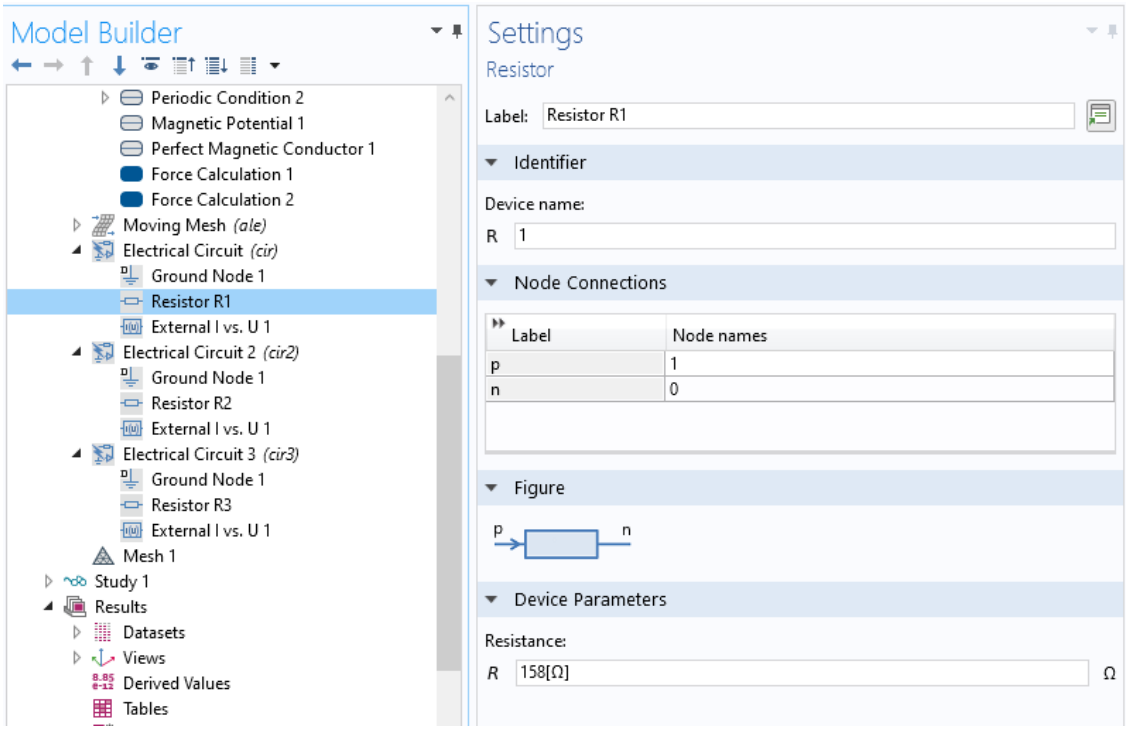


Figura 40. Asignación de circuito de carga para las bobinas de la topología base.

Se ejecuta el estudio con carga y se obtiene el generador de la Figura 41, en donde se puede evidenciar que la densidad de flujo magnético en Teslas continua rondando un máximo de flujo entre 1.2 y 1.4 T en la mayoría del circuito magnetico.

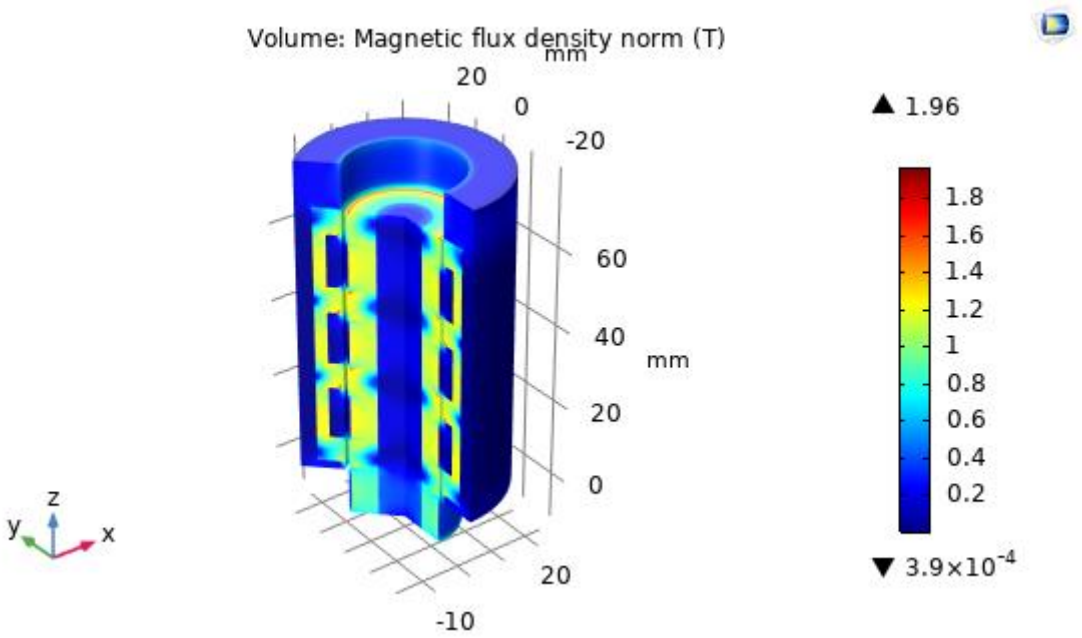


Figura 41. Densidad de flujo magnético en generador linear tubular de topología base con carga.

El voltaje generado se mantiene alrededor de los 40 Voltios pico, pero presentando una ligera deformación como se observa en la Figura 42, esto debido a las perdidas en el cobre y la presencia de la carga.

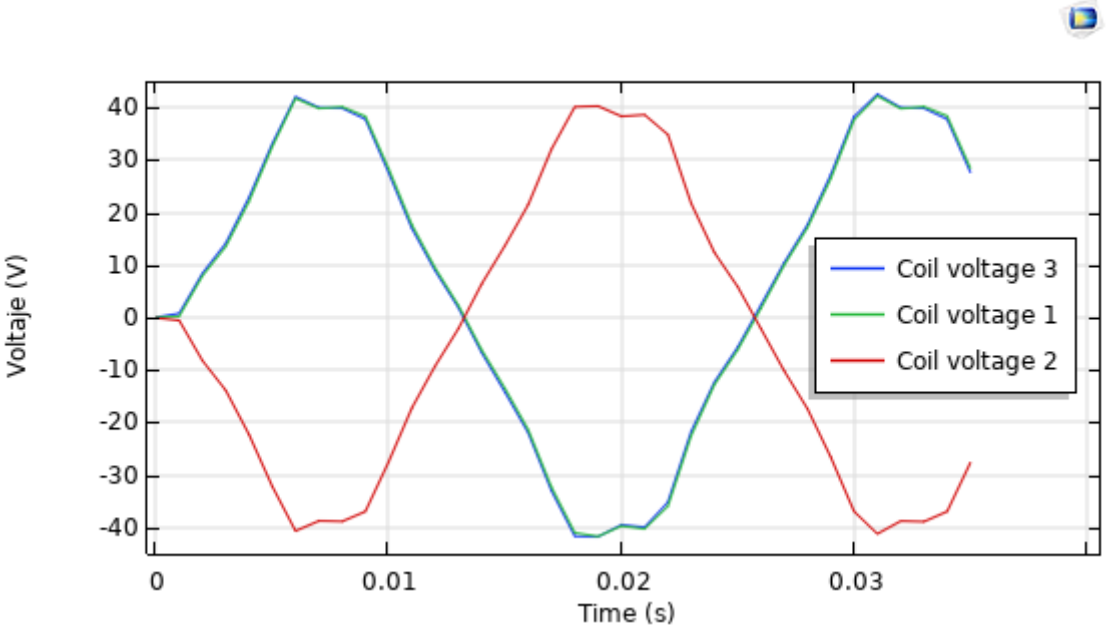


Figura 42. Voltaje inducido en las bobinas de la topologia base con carga.

La corriente en el circuito oscila entre el valor de corriente calculado, como se aprecia en la Figura 43 el valor de corriente pico se encuentra alrededor de 0.25 A vs la corriente calculada de 0.2496 A, lo que representa un error relativo del 0.16%, por tanto es aceptable el estudio por baja discrepancia porcentual.

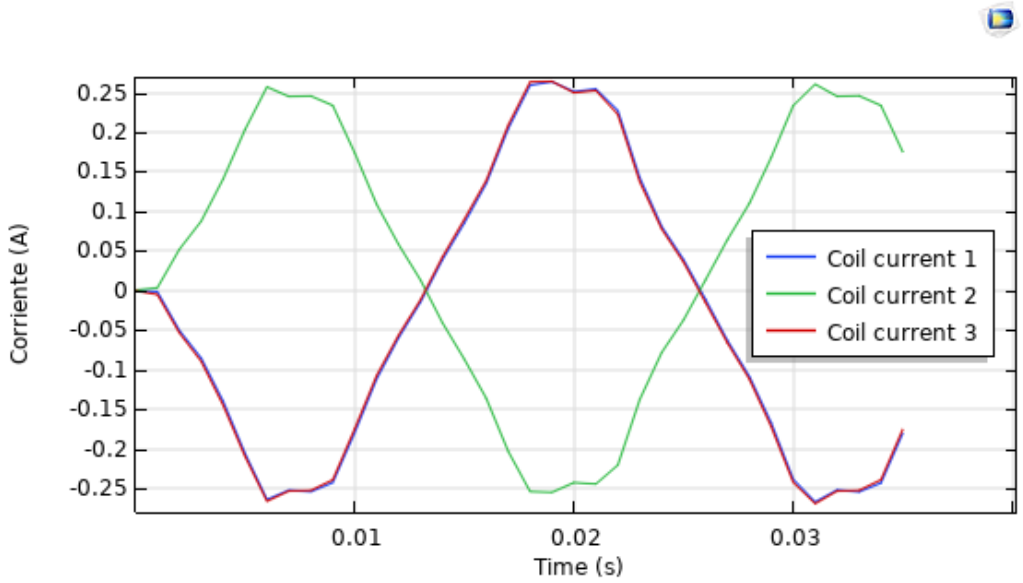


Figura 43. Corriente inducida en el generador de la topología base con carga.

Finalmente se tiene la potencia útil en el circuito en la Figura 44, el pico de potencia se presenta pasando los 11 W, la potencia deseada es de 10 W, esto representa un error relativo del 10%, que tendría más peso si estuviese por debajo del valor esperado, al tratarse de un generador de energía una porción pequeña de potencia útil adicional es bienvenida, adicionalmente el pico de potencia en proporción se encuentra bastante cerca de los 10W, exceptuando el primer pico de cada periodo en la señal.

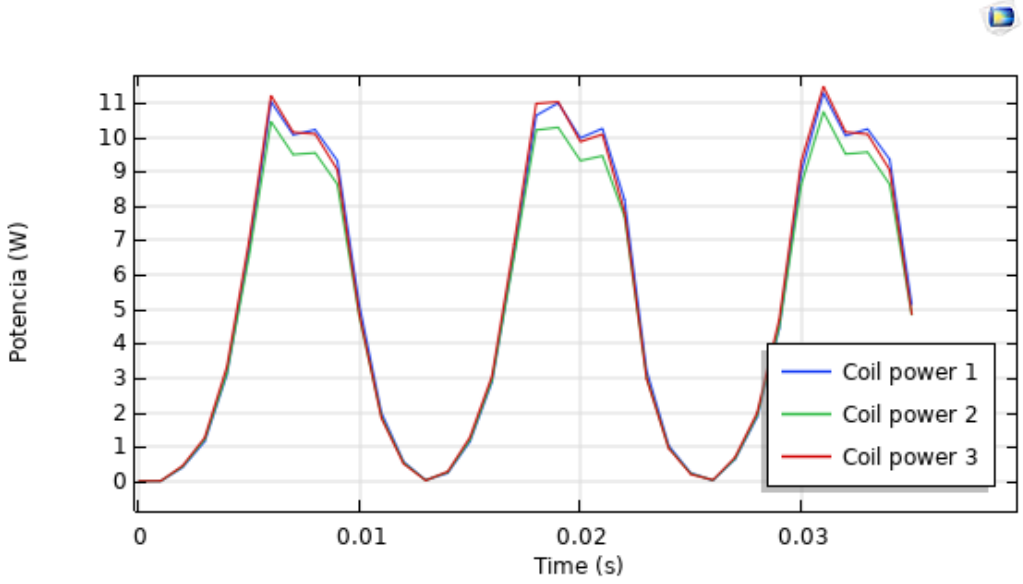


Figura 44. Potencia inducida en el generador de la topología base con carga.

De manera general el generador diseñado en la simulación concuerda con el diseño analítico que se realiza inicialmente.

6.4 Validación de topología seleccionada v.s. otras topologías

Para brindarle mayor soporte a la topología que se está trabajando se realiza una comparación con otras topologías realizando cambios en formas de caminos magnéticos y medios magnéticos conservando dimensiones del modelo. Se realiza la comparación con las topologías sin dientes y la topología Halbach.

La topología sin dientes es del mismo tamaño pero eliminando los dientes que separan las bobinas, dejando una estructura externa a la que se le asigna el material de aire, simulando un material no conductor como un silicón, en la Figura 45 se observa el diseño del generador sin dientes, como se menciona, sin estructura entre bobinas y con una asignación de aire como material para la estructura que las soporta.

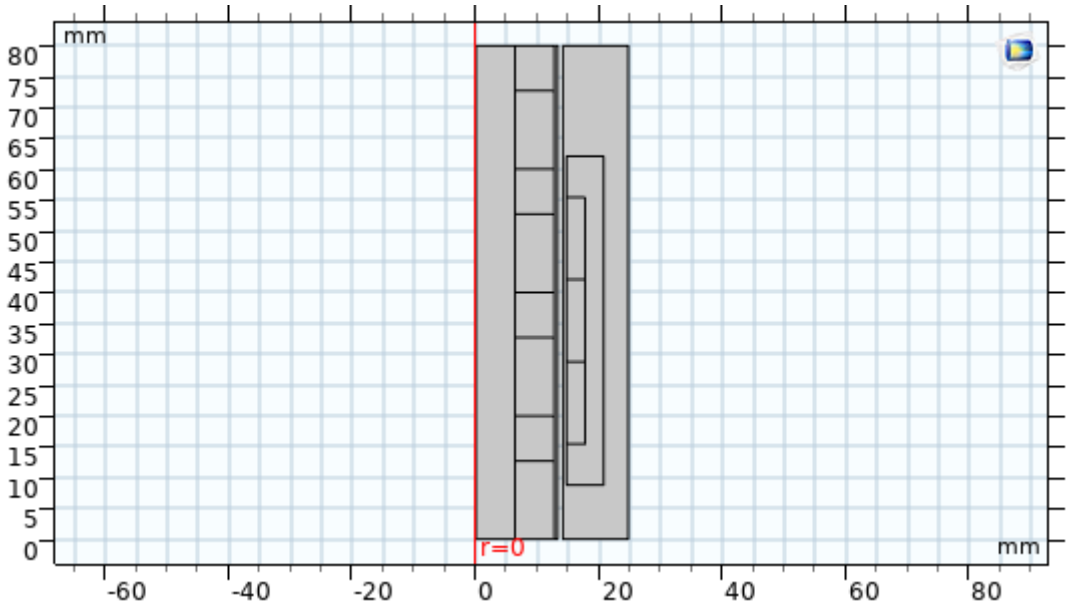


Figura 45. Topología de generador sin dientes para comparación.

La otra topología diseñada para comparación tiene también modificaciones leves en su estructura, para conformar la topología Halbach, se deja el mismo estator y se cambia el diseño del traslador por múltiples imanes de la misma dimensión pero con direcciones de campo magnético distribuidas según la configuración Halbach, el diseño se observa en la Figura 46.

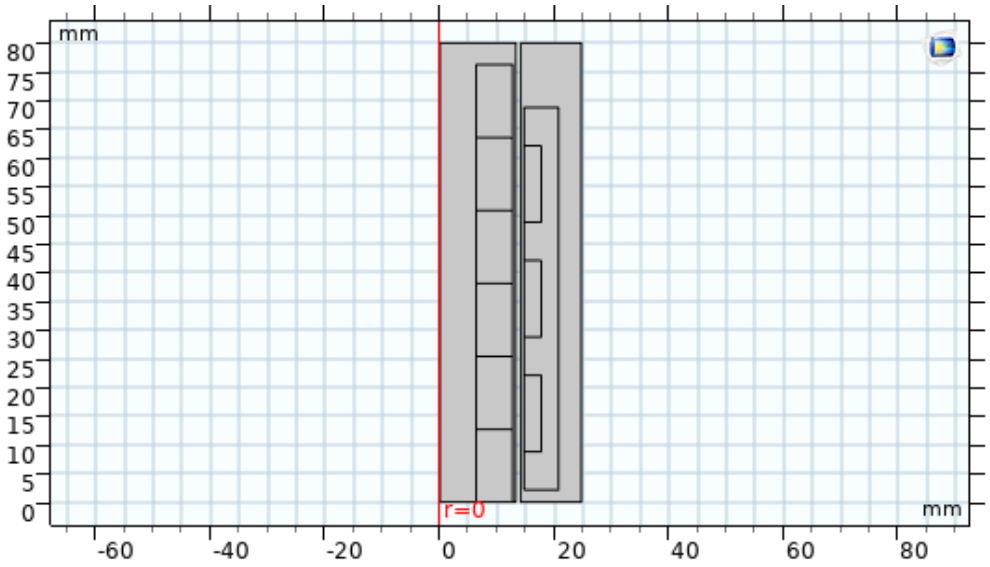


Figura 46. Topología de generador Halbach para comparación.

En cuanto a la simulación se agregan dos leyes de ampere para asignar las direcciones de magnetización de los otros imanes, ver Figura 47, en este caso en la coordenada r, el valor remanencia magnética es el mismo 1.32 T, ya que se pretende que las variaciones de los diseños de comparación sean muy pocas.

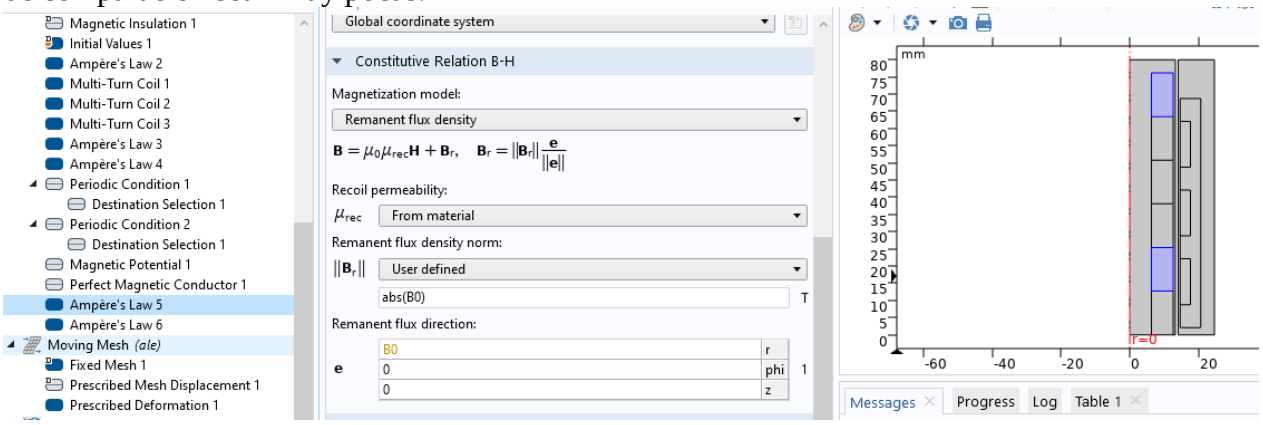


Figura 47. Configuración de los imanes adicionales en la topología Halbach.

Una vez se tienen los diseños de comparación configurados, se procede a realizar el estudio de cada uno de estos, en la Figura 48 a) se presenta la densidad de flujo magnético del generador de topología sin dientes, se observa que en la mayoría de la estructura el flujo magnético se encuentra entre 0.8 y 1 T, es decir que hay un flujo magnético menor y consecuentemente habrá un voltaje inducido de menor valor comparado con la topología base. En Figura 48 b) se presenta la densidad de flujo magnético en el estudio de la topología Halbach, en esta se puede observar algunas zonas con valores entre 1.2 y 1.4 T por lo que es posible que el voltaje inducido tenga valores cercanos a los de la topología base.

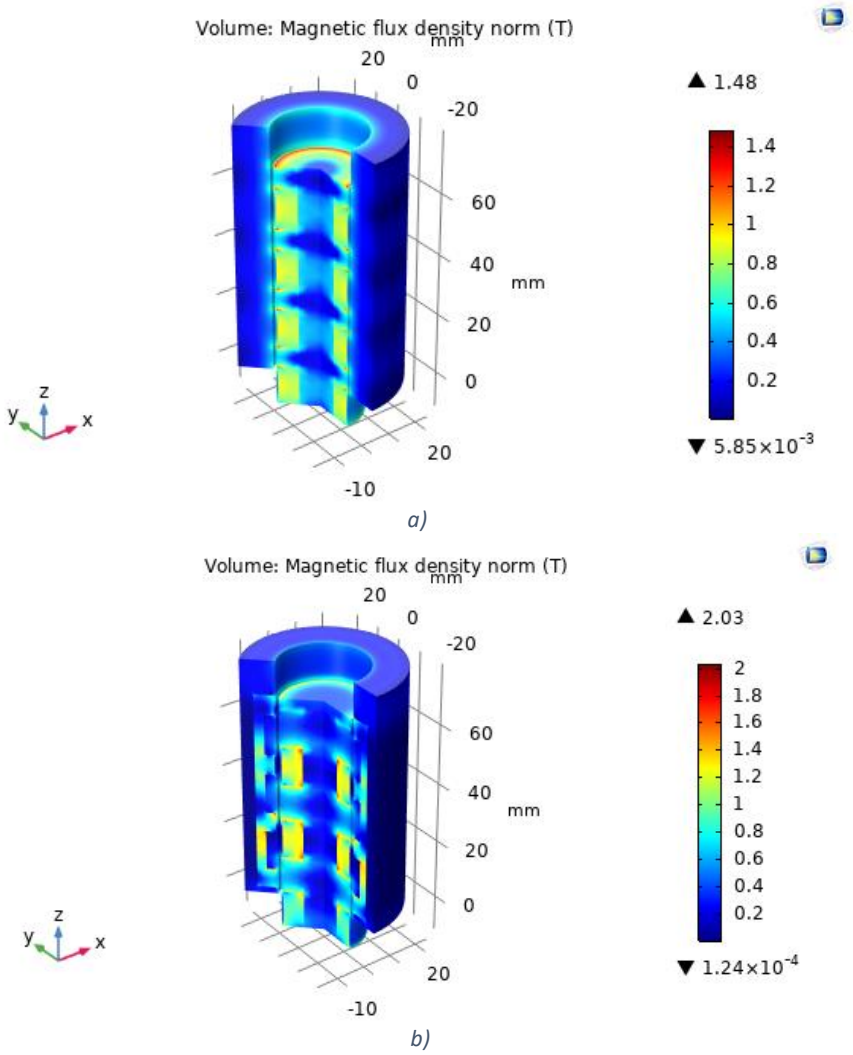


Figura 48. a) densidad de flujo magnético en topología sin dientes. b) Densidad de flujo magnético en topología Halbach.

En la Figura 49 se presenta el voltaje inducido en cada una de las topologías, se puede observar que la forma de onda en el caso de la topología sin dientes es más sinusoidal que las otras dos y que la forma de onda de la topología Halbach está mucho más alejada de una forma sinusoidal, además en la topología sin dientes el corrimiento entre fases es menor debido a que las bobinas se encuentra prácticamente pegadas, sin embargo se evidencia el efecto de la ausencia del material ferromagnético que constituye en los otros casos el circuito magnético pues para el caso de la topología sin dientes el voltaje pico es de 15 Vp aproximadamente, mientras que las otras dos topologías superan los 30 Vp.

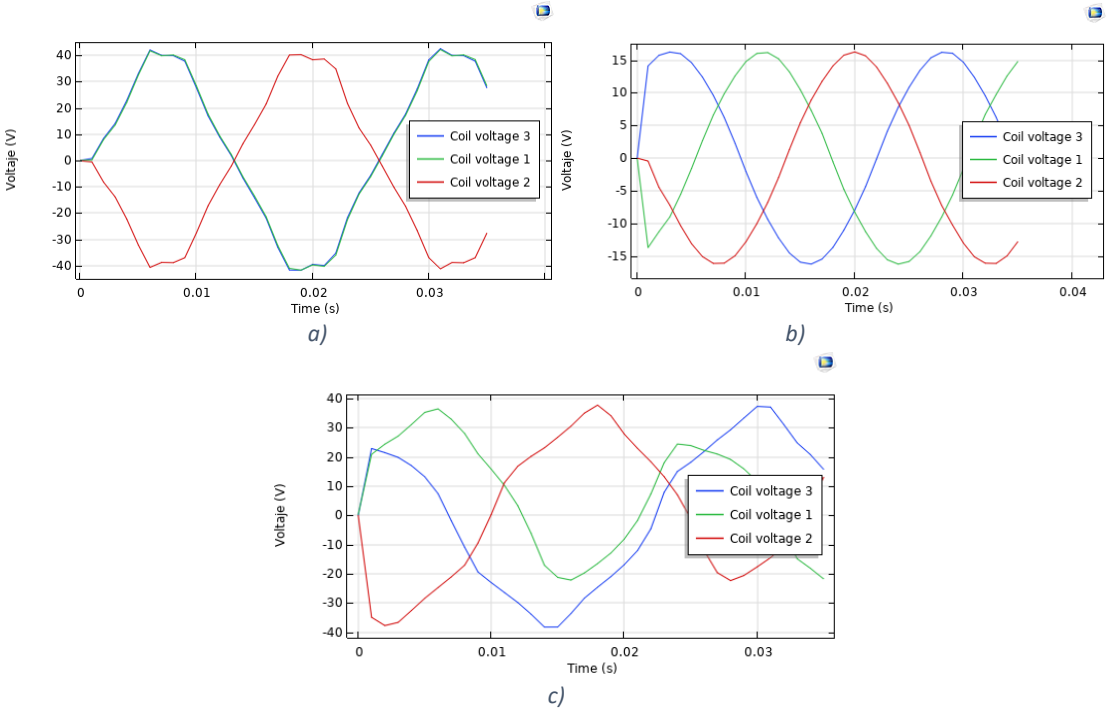
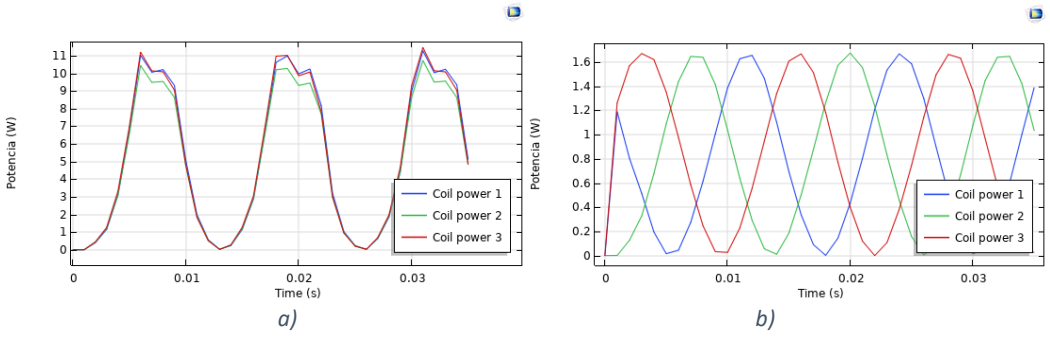
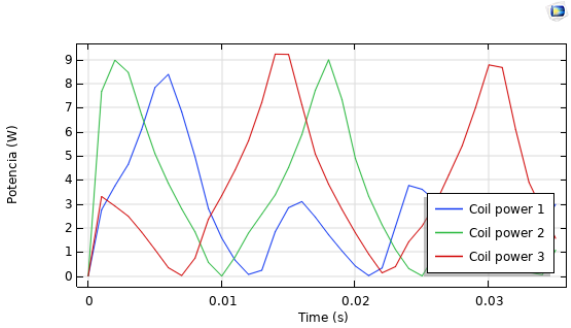


Figura 49. a) Voltaje inducido en la topología base. b) Voltaje inducido en la topología sin dientes. c) Voltaje inducido en la topología Halbach.

Los estudios se realizan con carga debido a que el punto de interés es la potencia útil, en la Figura 50 se observa la potencia en cada uno de los casos, en la topología sin dientes se mantiene una forma de onda sinusoidal pero de una amplitud mucho menor a las demás con un aproximado de 1.6 W pico, la topología Halbach tiene una forma de onda más distorsionada que en la etapa de potencia, que esta fuera del alcance de este proyecto, podría generar problemas de múltiples armónicos.





c)

Figura 50. a) Potencia en la topología base. b) Potencia en la topología sin dientes. c) Potencia en la topología Halbach.

Una vez realizada la comparación se determina que la topología base tiene las ventajas esperadas para la topología seleccionada, tiene una mayor densidad de flujo y mayor voltaje inducido, aunque según la literatura la topología Halbach presenta mejores características, se observó que en este caso, con las dimensiones planteadas no se tiene ese resultado y la forma de onda es bastante distorsionada, lo cual se vuelve un problema en una futura etapa de potencia. La topología Halbach comparada con la topología base no tiene realmente una ventaja que se pueda resaltar sobre esta, en cuanto a la topología sin dientes la forma de onda es el único elemento a resaltar, pero esto costaría disminuir la potencia más de un 80%, por lo cual se decide mantener la topología base por sus ventajas en generar con respecto a las topologías comparadas.

6.5 Variación de configuración de dientes

Esta etapa se desarrolla con la intención de investigar el efecto que podría tener la variación de la geometría de los tienes tanto en el estator como en el traslador de la topología base, a su vez, surge a partir del resultado de la anterior etapa puesto que según la topología que hubiese tenido mejores resultados la variación en los dientes aplicaría solo para el traslador o solo para el estator, sin embargo, gracias a que la topología base obtuvo mejores resultados se realizan diferentes propuestas de variación de dientes tanto en el estator como en el traslador. En cada variación se modifica únicamente la geometría de los dientes, manteniéndose los parámetros de movimiento, numero de vueltas de la bobinas, remanencia magnética de los imanes, etc. Se realizan en total ocho propuestas de variación las cuales se presentan a continuación.

La primera variación consta de dientes tipo T tanto en los separadores del traslador como en el hierro del estator, los cuales son comunes en diferentes maquinas eléctricas, la Figura 51 presenta la geometría propuesta.

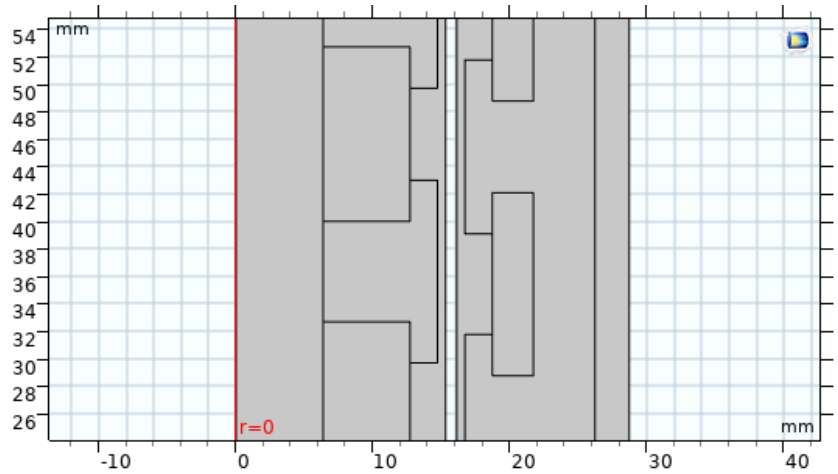


Figura 51. Geometría tipo T en dientes de estator y de traslador.

La segunda propuesta de variación tiene un diente con forma convexa en el traslador y un diente tipo T en el estator, la geometría se observa en la Figura 52

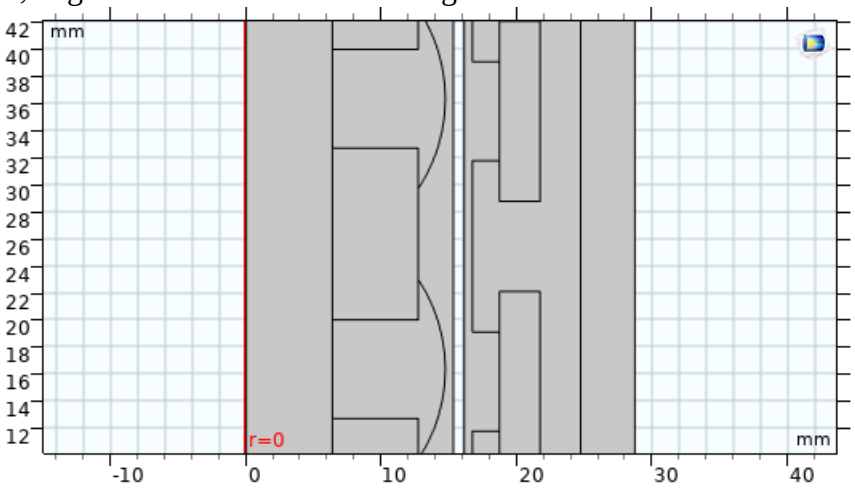


Figura 52. Geometría convexa en dientes del traslador y tipo T en estator.

En la Figura 53 se presenta la tercera propuesta de variación, la cual tiene dientes en forma convexa en el estator y en el traslador.

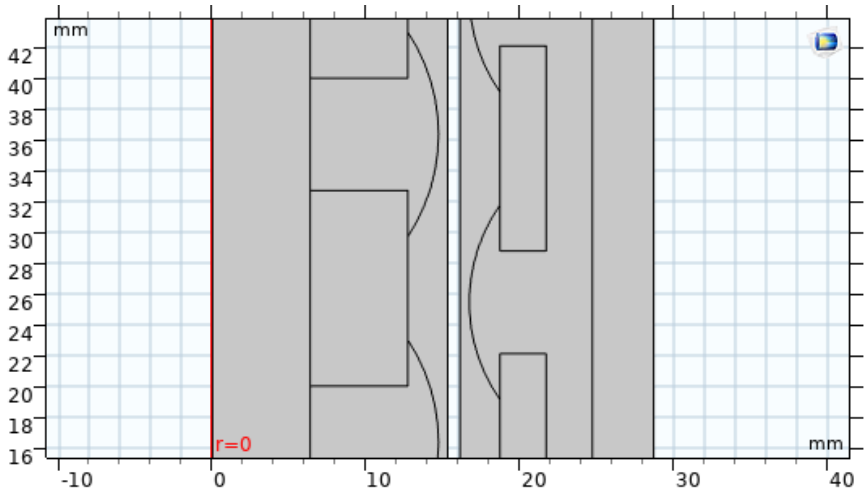


Figura 53. Geometría convexa en dientes del traslador y del estator.

En la cuarta propuesta cuenta con dientes de geometría convexa en el traslador y cóncava en el estator, es posible que en el estudio las puntas que quedan en el diente cóncavo afecten especialmente la forma de onda, sin embargo en el estudio que se realice se evidenciara de mejor manera.

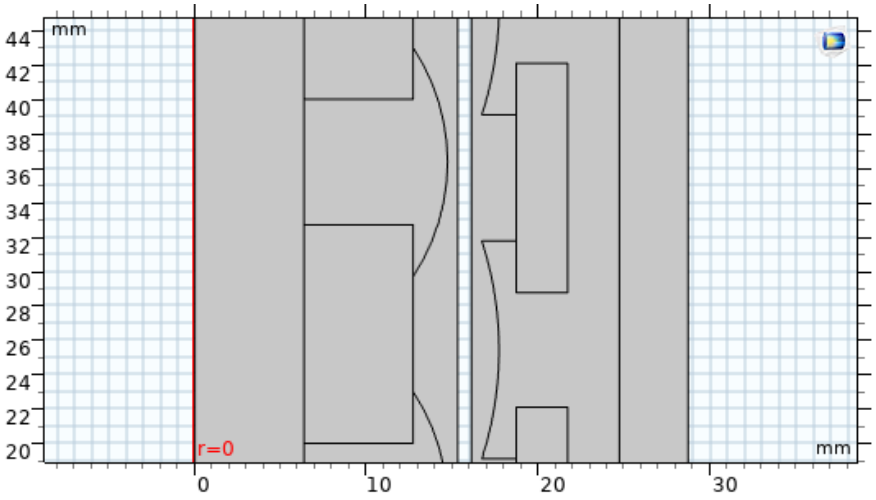
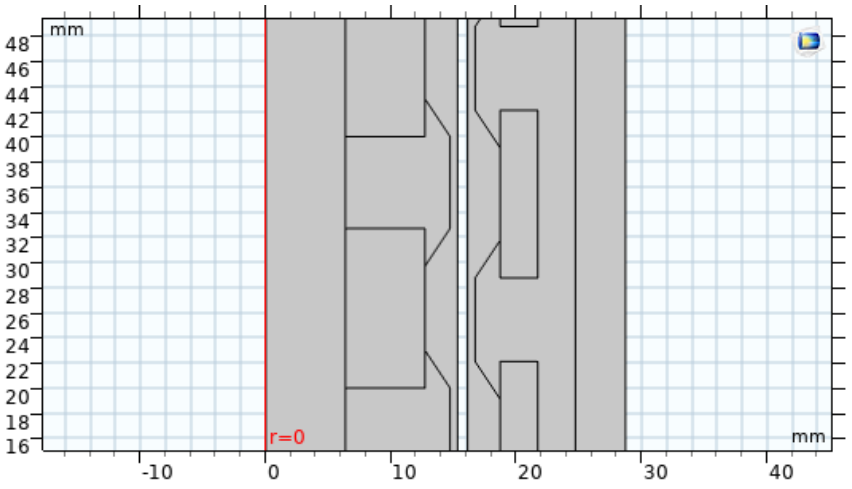
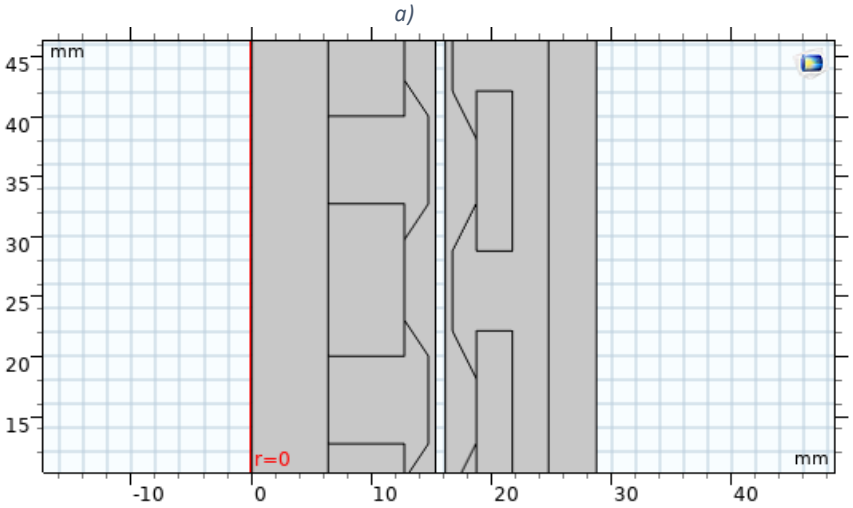


Figura 54. Geometría convexa en dientes del traslador y cóncava en el estator.

En la quinta y sexta propuesta se tienen dientes con geometría trapezoidal tanto en el traslador como en el estator, en la Figura 55 a) se tiene la primera propuesta con geometría trapezoidal y en la Figura 55 b) las bases del trapecio se extienden un poco es decir es un diente más ancho pero con la misma geometría.



a)



b)

Figura 55. a) Geometría de diente de tipo trapecio en traslador y en estator. b) Geometría de diente de tipo trapecio con extremos extendidos en traslador y estator.

Por ultimo las propuestas siete y ocho son una variación de la geometría del trapecio, con la diferencia que esta se corta o se agrega un lado más a cada extremo, tal como se observa en la Figura 56 a) al final de la punta del trapecio se deja cuadrada por así decirlo, en la Figura 56 b) se hace un recorte mucho mayor tanto en los dientes del estator como del traslador.

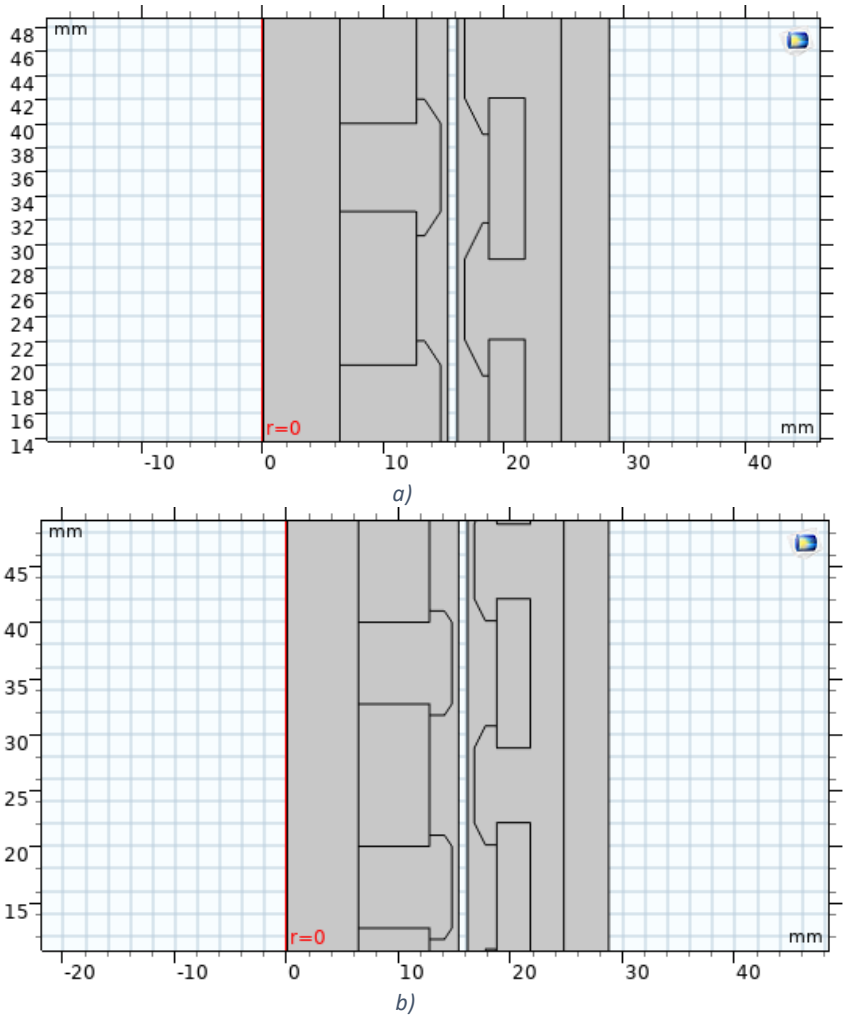


Figura 56. a) Geometría de diente de tipo trapecio recortado I en traslador y en estator. b) Geometría de diente de tipo trapecio recortado II en traslador y estator.

6.6 Validación de cada variación con FEM

Se realiza el estudio de las ocho propuestas con la misma carga resistiva de la topología base de 158 Ω, si bien se presenta la densidad de flujo magnético y el voltaje inducido, la variable de mayor interés en cada uno de los resultados será la potencia.

En la Figura 57 se presentan las diferentes densidades de flujo magnético generadas en los estudios de cada variación, en la mayoría de las topologías se observa que en los bordes de la geometría de dientes se tiene una mayor densidad de flujo magnético y en las geometrías de tipo T y trapezoidales o trapezoides recortados se observa una densidad de flujo magnético mayor en la base de los dientes en el traslador con valores entre 1.8 y 2 T.

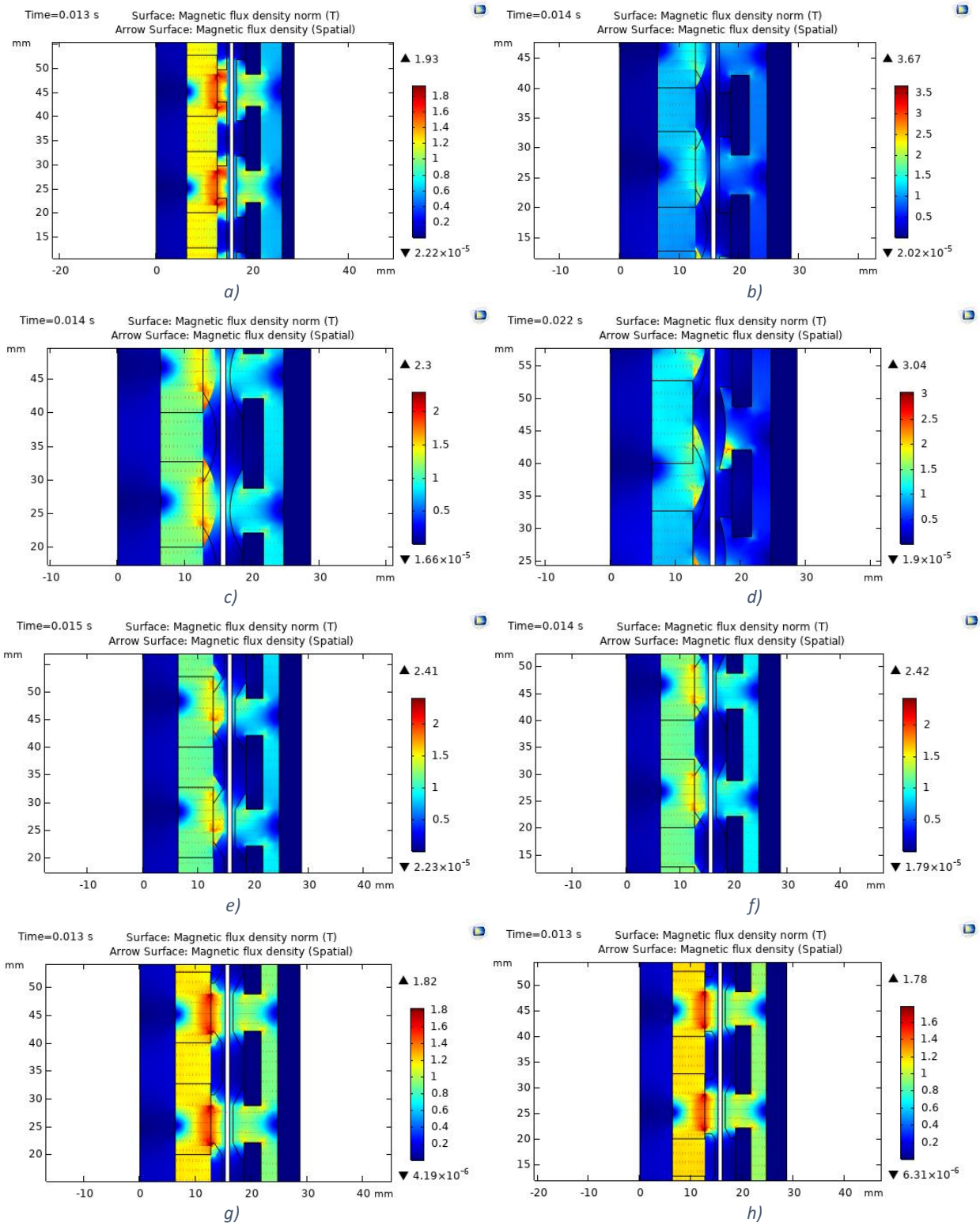


Figura 57.Densidad de flujo magnético en: a) Dientes T. b) Diente convexo en traslador - T en estator. c) Diente convexo en estator y traslador. d) diente convexo en traslador y cóncavo en estator. e) diente trapezoidal en estator y traslador. f) Diente trapezoidal en traslador y estator. g) Dientes trapecio recortado I. h) Dientes trapecio recortado II.

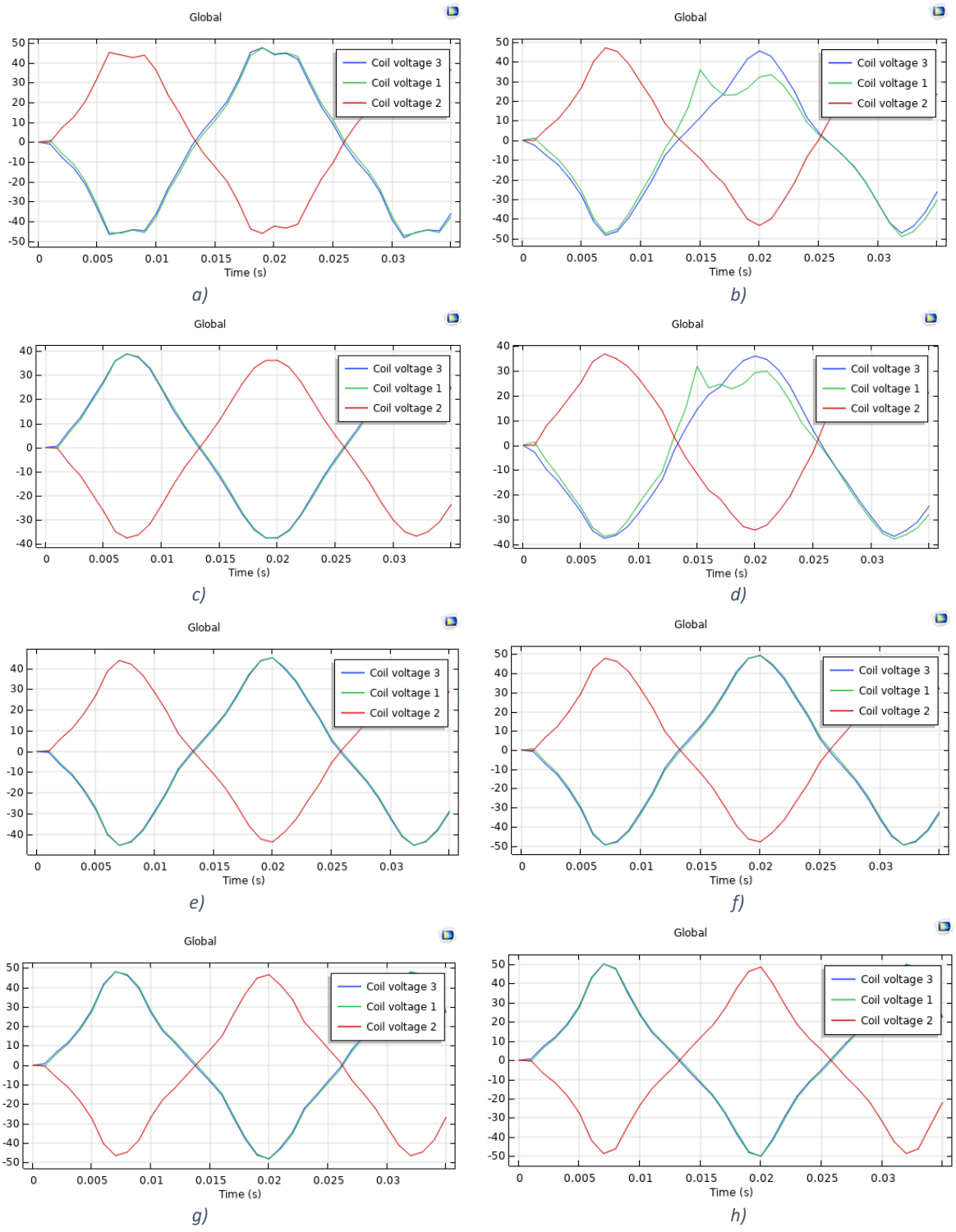


Figura 58. Voltaje inducido en: a) Dientes T. b) Diente convexo en traslador - T en estator. c) Diente convexo en estator y traslador. d) diente convexo en traslador y cóncavo en estator. e) diente trapezoidal en estator y traslador. f) Diente trapezoidal en traslador y estator. g) Dientes trapecio recortado I. h) Dientes trapecio recortado II.

En cuanto al voltaje inducido se puede apreciar una mejora desde la primera propuesta en la Figura 58 a) se observa que se obtiene un voltaje inducido que ya supera los 40 Vp de la topología base, con una forma de onda similar también, en la Figura 58 b) y d) se observa que estas variaciones producen una distorsión de la forma de onda en la bobina número 1, en las variaciones de la Figura 58 f), g) y h) se observa que el voltaje inducido aumenta casi 10 Vp sobre la topología base con una forma de onda menos achatada que la de la topología base pero también con un cambio de concavidad más evidente en la onda, mientras que las variaciones c) y d) presentan incluso menor voltaje inducido que la topología base, sin embargo entre las ocho variaciones se observa que la topología c) presenta una forma de onda más sinusoidal, por otra parte priorizando la cantidad de voltaje inducido la topología h) se encuentra a la cabeza rondando los 50 Vp .

Posterior al análisis y comparación del voltaje inducido en cada variación se realiza el análisis de potencia sobre la carga, en la Figura 59 se presenta la potencia en cada una de las variaciones, las variaciones b) y d) presentan una distorsión en la forma de onda como se había previsto desde el análisis del voltaje inducido, la variación a) tiene una forma de onda similar a la de la topología base y con una ligera mejora que ronda 1 W. En las variaciones trapezoidales e) y f) se empieza a ver una mayor mejora en la potencia generada oscilando los 13 W, sin embargo las variaciones de trapezoide recortado presentan una mejora aun mayor con la variación g) entre 14 y 15 W y la variación h) llegando a los 16W. Siendo entonces la variación h) la que supera en gran medida a las demás, con un 60% más de potencia generada en comparación con la topología base.

6.7 Selección de la configuración propuesta

A partir de las propuestas generadas y las comparaciones realizadas se determina que la propuesta de variación de dientes trapezoidales con recorte II, mejora las características del generador propuesto en la topología base, aun cuando la mayoría de las variaciones mejoran en algún aspecto la topología base, esta presenta los valores más altos en las variables de interés, además de mejorar la forma de onda en comparación con la topología base, lo que contribuye a la disminución de armónicos.

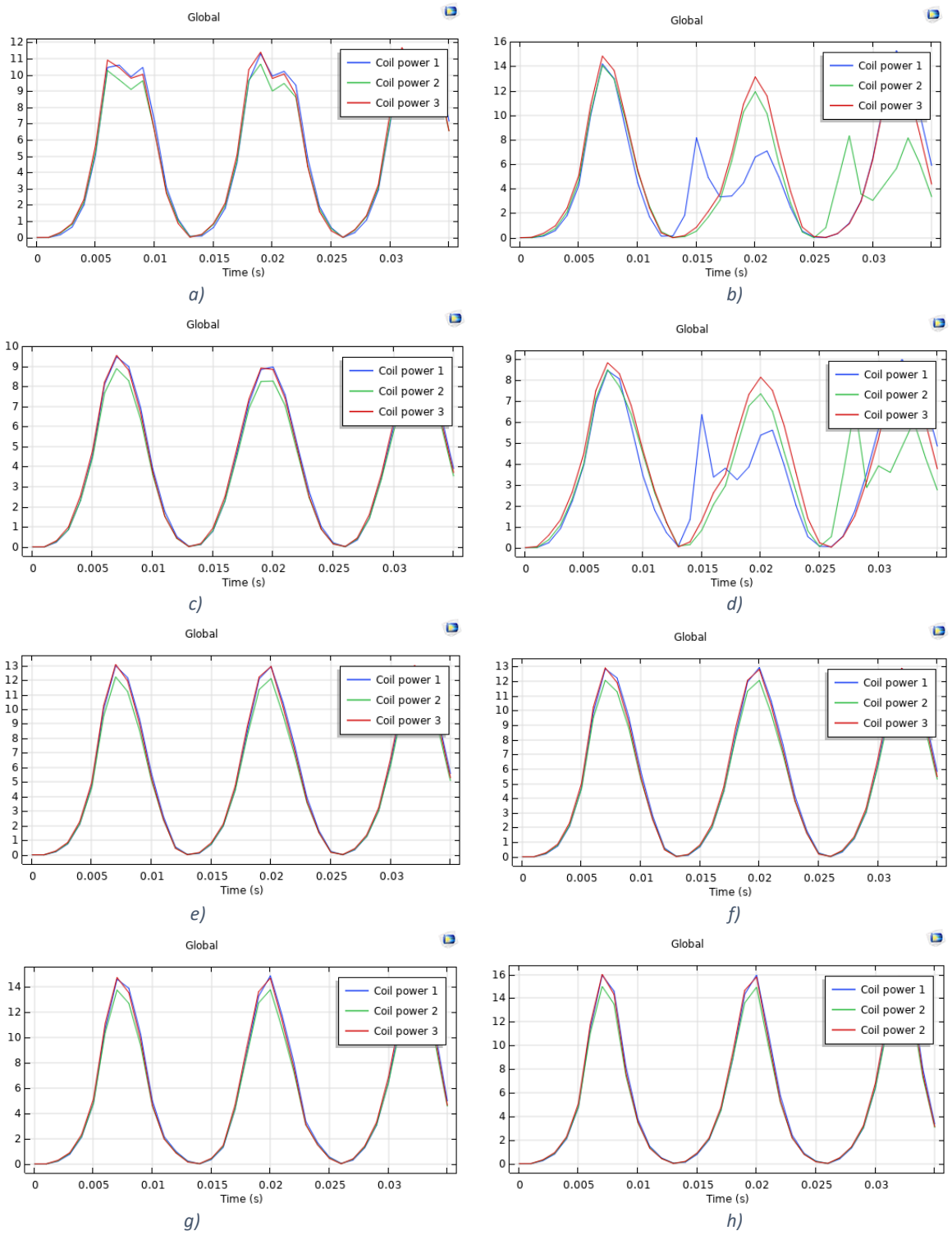


Figura 59. Potencia generada en: a) Dientes T. b) Diente convexo en traslador - T en estator. c) Diente convexo en estator y traslador. d) diente convexo en traslador y cóncavo en estator. e) diente trapezoidal en estator y traslador. f) Diente trapezoidal en traslador y estator. g) Dientes trapecio recortado I. h) Dientes trapecio recortado II.

7. Resultados

La topología de generador lineal tubular básica diseñada presenta los resultados esperados de acuerdo a los cálculos realizados, para mayor detalle remitirse al Anexo del reporte de estudio de simulación, posteriormente supero la comparación con otras topologías dentro de una serie de parámetros cercanos a la topología base, obteniendo en general mejores características de generación de energía. Posteriormente de la propuesta de variación de geometría de dientes se obtuvo una mejora significativa, en la Figura 60 se puede comparar gráficamente la densidad de flujo magnético en cada una de las topologías a) siendo la topología base diseñada y b) la topología seleccionada entre las variaciones de geometría de dientes, se observa que en la topología mejorada se tienen zonas de flujo magnético de entre 1.4 y 1.6 T, mientras que en la topología base los valores más frecuentes están entre 1.2 y 1.4 T.

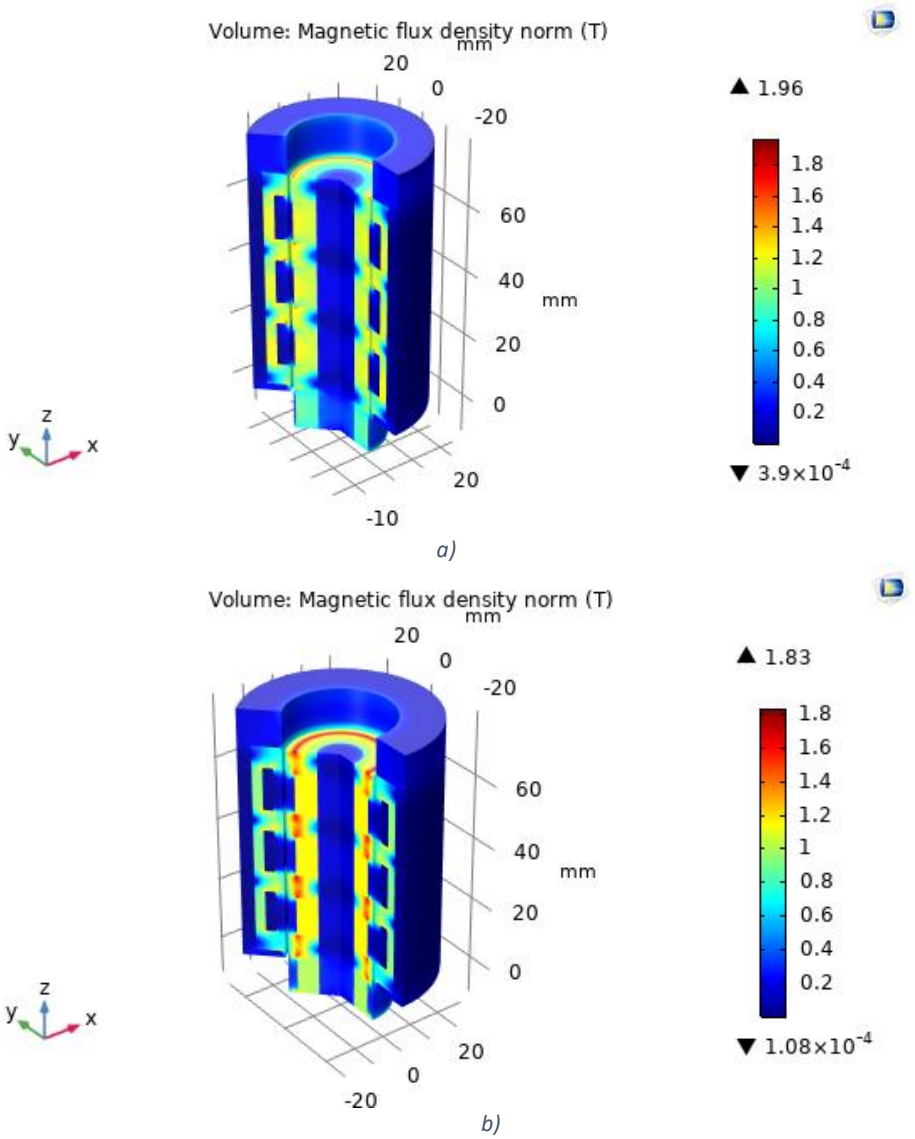
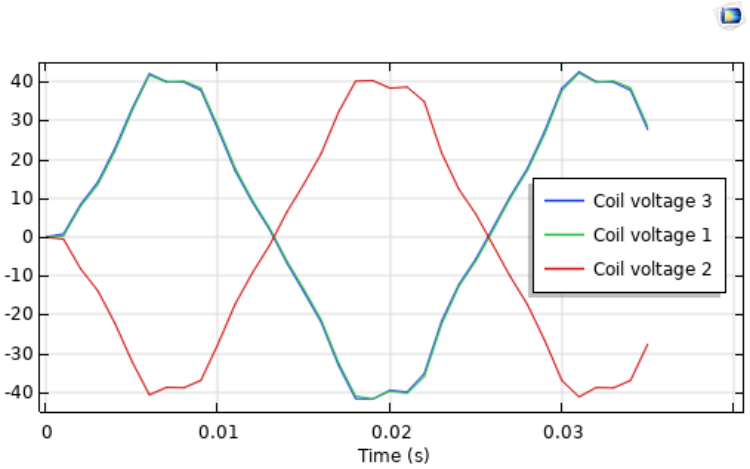
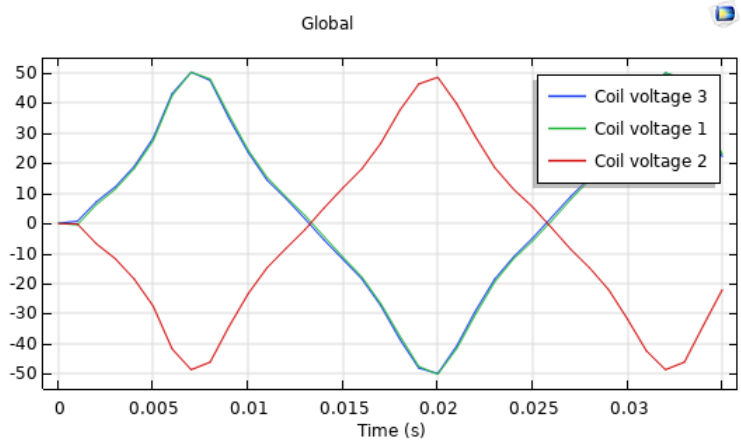


Figura 60. Densidad de flujo magnético en: a) topología base. b) topología mejorada con geometría de dientes trapezoidal recortada.

En cuanto al voltaje inducido se puede observar en la Figura 61 que se mejora en 10 V el voltaje en las bobinas, además de mejorar ligeramente la forma de onda de la señal con respecto a la topología base, como ya se mencionó anteriormente la forma de onda que posee al ser casi recta en la cresta implica la generación de armónicos que afectarían las futuras etapas de potencia, con la forma de onda de la topología mejorada se reduce la probabilidad de múltiples armónicos.



a)



b)

Figura 61. Voltaje inducido en: a) topología base. b) topología mejorada con geometría de dientes trapezoidal recortada.

En cuanto a la potencia que es la variable de interés, se mejoró significativamente por un poco más del 50%, como se puede ver en la Figura 62 la potencia generada con la topología base fue entre 10 y 11 W mientras que en la topología mejorada esta entre 15 y 16 W, de esta manera queda soportado que es posible mejorar la generación de energía en las maquinas, en este caso lineales, realizando variaciones en la geometría de los dientes, en este caso la geometría con mejor resultado fue el trapecio recortado, aunque quedan infinitas posibilidades y combinaciones en la geometría de los dientes. Se espera que a partir de este documento a futuro se continúen investigando estas variaciones entre la comunidad científica.

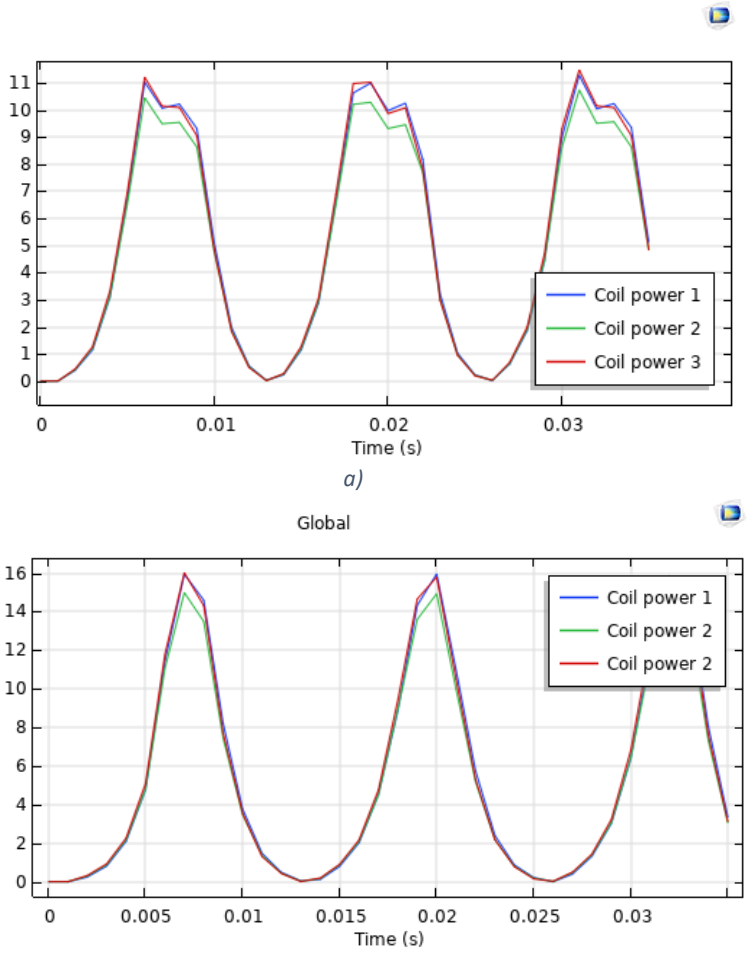
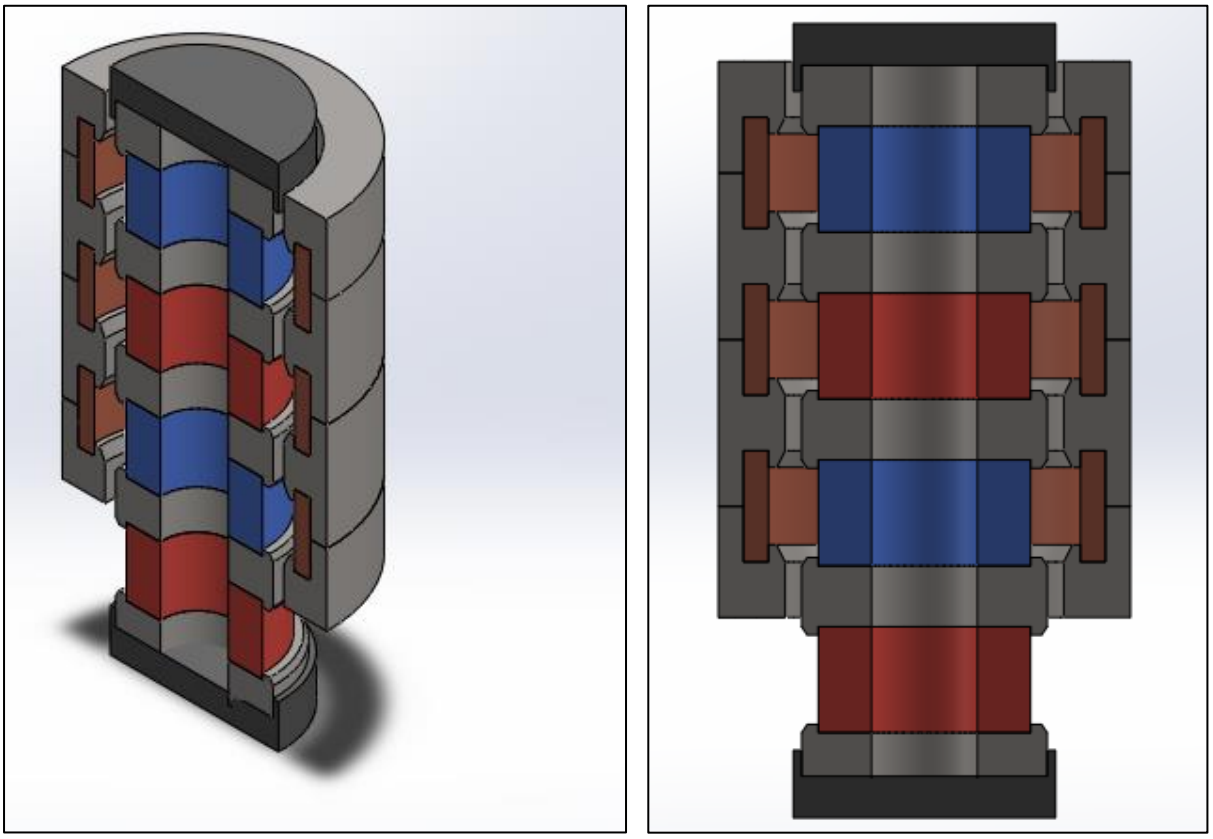


Figura 62.Potencia generada en: a) topología base. b) topología mejorada con geometría de dientes trapezoidal recortada.

Se realizó el diseño del prototipo de generador en software de diseño, en la Figura 63 se presenta el resultado, se realizó un corte sobre el ensamble para tener una vista del interior del generador, adicionalmente se asignaron colores azul y rojo a los imanes simbolizando las direcciones de magnetización que estos deben tener en el ensamble, en los extremos del traslador se puede observar una tapa final que se emplearía para proteger la estructura de los separadores metálicos, además de ser el soporte y recibir el choque con el resorte o pared que se ubique en los extremos, esto variara de acuerdo a la aplicación.

En la estructura de hierro del estator se observan algunas líneas o ranuras, estas se colocan para simular la vista del ensamble ya que hacer esta estructura en una sola pieza es complejo en cuanto a su producción y en cuanto a la ubicación de las bobinas, de tal manera que haciéndola modular se facilita el proceso de ensamble del generador y de los costos de producción.



a) b)

Figura 63. Generador tubular lineal diseñado.

El desarrollo de la investigación más allá del diseño y la simulación del generador, brinda herramientas base para la construcción de máquinas tanto para generadores como para motores lineales. El generador diseñado tiene un largo total de 0.0973 m y un diámetro de 0.0494 m, ocupa un espacio bastante reducido y por tener un punto de comparación su largo es menor que la mayoría de los Smartphone que se encuentran en el mercado de hoy en día, con esta pequeña maquina es posible generar una cantidad de energía de 16 W con un movimiento en el traslador de 1.6 m/s, en la práctica las velocidades varían según la aplicación y el tipo de movimiento también, como trabajo futuro se debe realizar tanto la implementación como el estudio de las variaciones en la generación de energía con diferentes movimientos en el traslador, otro aspecto importante a tener en cuenta es el análisis de pérdidas en el hierro que seguramente se presentaran pero no deben afectar la generación de energía al punto de reducir la potencia a un valor despreciable.

En la Figura 64 se presenta una propuesta de estructura para una aplicación general, no marítima como se está acostumbrado a ver, en esta propuesta se tiene una estructura que soporta el estator y deja libre el traslador, cuenta con resortes en cada extremo para amortiguar los movimientos bruscos que este pueda tener y así prevenir daños en el mismo, cuenta además con una serie de rejillas que ayudan a la ventilación y refrigeración natural del generador, esta propuesta puede ser implementada mediante mecanismos con los que se interactúe en otras áreas, como una adaptación a una bicicleta, en los suelos donde circulen vehículos de alto peso y generen gran vibración al

pasar, mecanismos de adaptación para aprovechamiento de la energía eólica, entre una gran variedad de posibles aplicaciones que este puede tener.

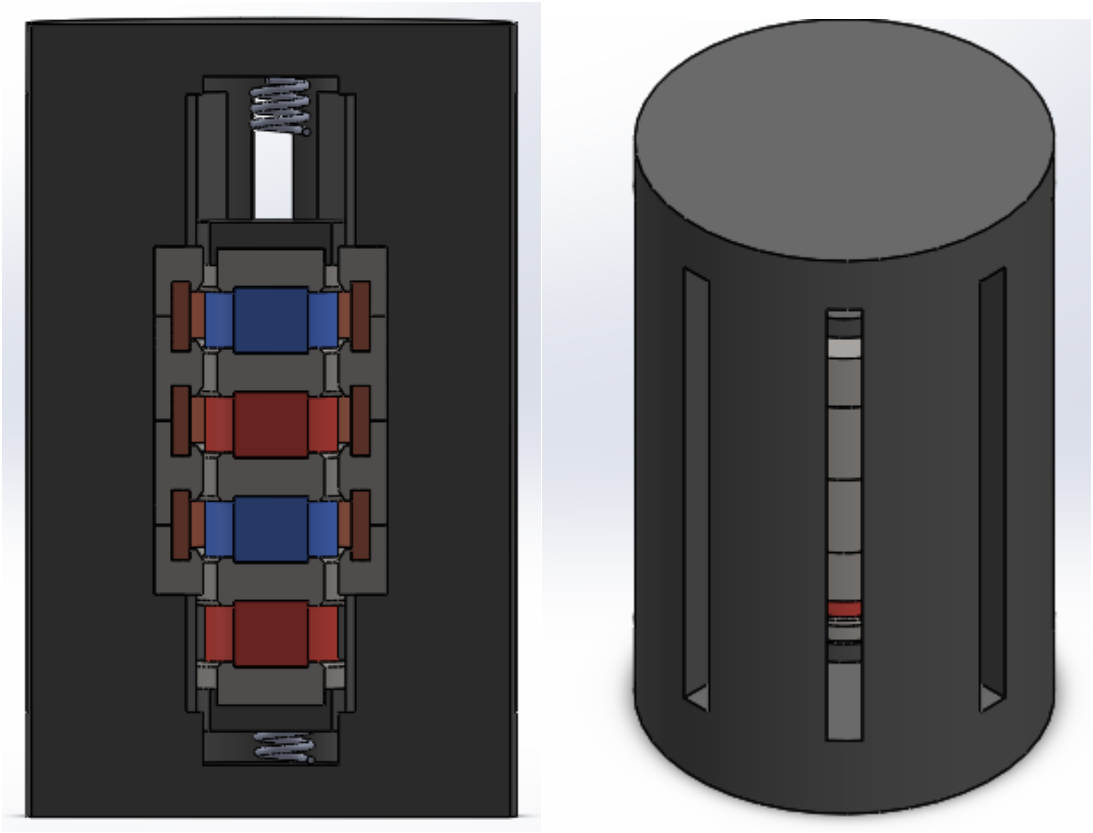


Figura 64. Propuesta de aplicación general.

En la Figura 65 se presenta otra propuesta de aplicación, esta vez más específica, consta de una baldosa generadora de energía, en la cual se ubicarían tres generadores lineales en el medio y dos amortiguadores en los extremos, colocando estas baldosas en diferentes puntos donde haya gran circulación de personas y viendo que el movimiento necesario para la generación de energía es poco, se podrían tener diferentes puntos de generación de energía alternativa en las ciudades, otras tecnologías más comunes son complejas de adaptar a la ciudad, los generadores eólicos típicos requieren amplios espacios, los generadores marítimos implican que la zona beneficiada este cerca de un cuerpo de agua suficientemente grande para mover estos mecanismos sin afectar la actividad económica y los paneles solares suelen ser para la población con situación económica media – alta, esta propuesta resultado del impacto de la investigación puede significar una nueva alternativa para unas políticas y lineamientos del gobierno.

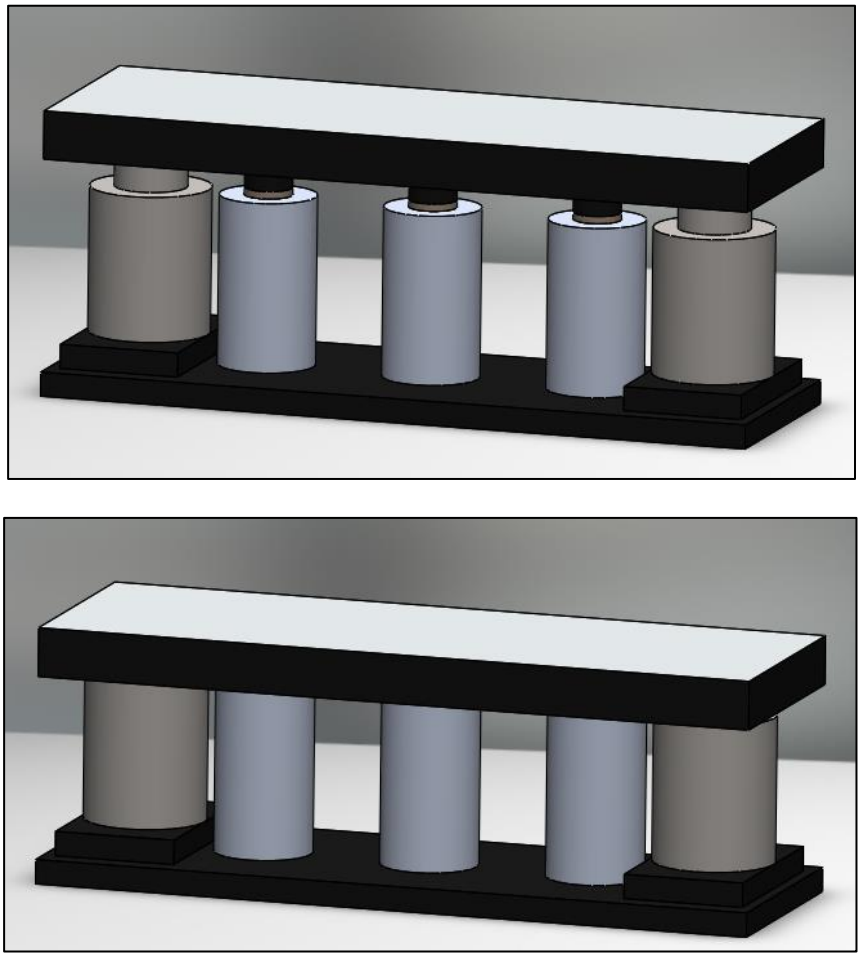


Figura 65. Segunda propuesta de aplicación del generador.

8. Conclusiones y Recomendaciones

La topología de generador tubular lineal base seleccionada de la literatura científica presento los resultados más destacables en cuanto a Voltaje inducido y Potencia comparados con las topologías sin dientes y Halbach con variaciones mínimas de la estructura realizadas para la comparación.

El generador tubular lineal de la topología base diseñada presento resultados satisfactorios con respecto al diseño analítico realizado, el pico máximo de potencia útil del generador fue entre 10 y 11 W, en donde cabe resaltar que esta variación es aceptada teniendo en cuenta que favorece al tipo de maquina generar energía útil de mas, como trabajo futuro se debe realizar un estudio sobre las perdidas en el hierro y un estudio térmico en la máquina, se debe determinar si el software empleado tiene la versatilidad de realizar estudios sobre estos aspectos.

Realizar variaciones en la geometría de los dientes en la máquina mejora de manera significativa la generación de energía útil, si bien se realizó con un diseño a pequeña escala, sus efectos magnéticos se mantienen en dimensiones mayores.

La solución propuesta de generador tubular lineal a partir de la variación de la geometría de dientes, supera en más del 50% la potencia generada por la topología base, con la geometría de trapecio recortado la densidad de flujo magnético en la estructura del estator aumento significativamente, además de mejorar también la forma de onda de la señal generada en comparación con la de la topología base. Como trabajo futuro se debe realizar la implementación de esta propuesta en un prototipo físico.

El desarrollo de la investigación permitió no solo cumplir con los objetivos planteados sino que también dio paso a la generación de ideas que puedan tener un impacto social, como lo es la baldosa generadora de energía a partir de generadores lineales, la cual se proyecta implementar a futuro y una vez se encuentre en funcionamiento, presentarlo como proyecto social para instalar en espacios públicos o realizar su proceso de patente con la Universidad Distrital y sea mediante la institución que sea posible llevar a cabo este tipo de proyectos.

9. Referencias

[1] "Scopus - Analyze search results." [Online]. Available: https://www.scopus.com. [Accessed: 21-May-2019].

[2] V. Tyagi, A. Pathak, G. Singh, R. Kothari, J. Selvaraj, and A. Padey, "Renewable energy scenario in Indian context: vision and achievements," *4th IET Clean Energy Technol. Conf.*, pp. 1–8, 2016.

[3] M. H. Nehrir *et al.*, "A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 2, no. 4, pp. 392–403, 2011.

[4] C. A. Tobías Salas, Alfredo, Rubio Jiménez, "Estado Del Arte De Aerogeneradores De Eje Horizontal Y Vertical," *Jovenes en la Cienc.*, vol. 3, no. 2, pp. 0–5, 2017.

[5] J. Melorose, R. Perroy, and S. Careas, "ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UNA MICROTURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN UNA ZONA URBANA DE BOGOTÁ," *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, vol. 1, 2015.

[6] M. Rivero, F. Pino, L. Bergés, and T. Dicranian, "De Fósiles a Renovables : ¿ Cómo acelerar la transición ?," pp. 1–35, 2016.

[7] M. Badii, A. Guillen, and O. Lugo Serrato, "History and Use of Renewable Energies," *Daena Int. J. Good Conscienc.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–18, 2015.

[8] F. Cortez, J. Cercado Mancero, A. Vera Lorenti, and E. Valle Flores, "Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia," *Espacios*, vol. 39, p. 10, 2018.

[9] G. A. Zapata and J. A. Valencia, "Guía práctica para la aplicación de los incentivos tributarios de la Ley 1715 de 2014," Colombia.

[10] W. Xu, I. Rabiul, and M. Pucci, *Advanced Linear Machines and Drive Systems*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2019.

[11] T. von Büren and G. Tröster, "Design and optimization of a linear vibration-driven electromagnetic micro-power generator," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 135, no. 2, pp. 765–775, 2007.

[12] B. Jia, D. Wu, A. Smallbone, U. C. Ngwaka, and A. P. Roskilly, "Dynamic and thermodynamic characteristics of a linear Joule engine generator with different operating conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 173, no. July, pp. 375–382, 2018.

[13] J. Faiz and A. Nematsaberi, "Linear electrical generator topologies for direct-drive marine wave energy conversion- an overview," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 9, pp. 1163–1176, 2017.

[14] X. Wang, F. Chen, R. Zhu, G. Yang, and C. Zhang, "A Review of the Design and Control of Free-Piston Linear Generator," *Energies*, vol. 11, no. 8, p. 2179, 2018.

[15] R. Ekström, B. Ekergård, and M. Leijon, "Electrical damping of linear generators for wave energy converters — A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 116–128, 2015.

[16] J. Si, H. Feng, P. Su, and L. Zhang, "Design and Analysis of Tubular Permanent Magnet Linear Wave Generator," vol. 2014, 2014.

[17] L. Huang, M. Hu, Z. Chen, H. Yu, and C. Liu, "Research on a Direct-Drive Wave Energy Converter Using an Outer-PM Linear Tubular Generator," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no.

6, pp. 1–4, 2017.
[18] L. Huang, M. Chen, L. Wang, F. Yue, R. Guo, and X. Fu, “Analysis of a Hybrid Field-Modulated Linear Generator for Wave Energy Conversion,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, pp. 1–5, 2018.
[19] N. P. Gargov, A. F. Zobaa, and G. A. Taylor, “Structural designs and forces in direct drive linear generators for marine wave power generation,” *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2012.
[20] L. Yan, L. Zhang, Z. Jiao, H. Hu, C. Chen, and I. Chen, “A tubular linear machine with dual Halbach array,” vol. 31, no. 2, pp. 177–200, 2014.
[21] K. S. R. Rao, T. Sunderan, and M. Ref, “Performance and design optimization of two model based wave energy permanent magnet linear generators,” *Renew. Energy*, vol. 101, pp. 196–203, 2017.
[22] S. R. Huang, H. T. Chen, C. H. Chung, C. Y. Chu, G. C. Li, and C. C. Wu, “Multivariable direct-drive linear generators for wave energy,” *Appl. Energy*, vol. 100, pp. 112–117, 2012.
[23] Q. Shuheng and W. Haifeng, “Simulation of Tubular Transverse Flux Permanent Magnet Linear Generator,” *ICEMS 2018 - 2018 21st Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, pp. 1766–1770, 2018.
[24] R. Vermaak and M. J. Kamper, “Construction and control of an air-cored permanent magnet linear generator for direct drive wave energy converters,” *2011 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2011*, no. Section III, pp. 1076–1081, 2011.
[25] R. Vermaak and M. J. Kamper, “Design aspects of a novel topology air-cored permanent magnet linear generator for direct drive wave energy converters,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 5, pp. 2104–2115, 2012.
[26] J. Zhu, S. Li, D. Song, Q. Han, J. Wang, and G. Li, “Multi-objective optimisation design of air-cored axial flux PM generator,” *IET Electr. Power Appl.*, vol. 12, no. 9, pp. 1390–1395, 2018.
[27] J. Bard and P. Kracht, “Linear generator systems for wave energy conversion,” *SDWED Fraunhofer IWES*, pp. 1–27, 2013.
[28] T. Xia, H. Yu, L. Huang, C. Liu, and X. Liu, “Design and optimization of a field-modulating permanent magnet tubular linear generator for direct-drive wave energy conversion,” *IEEE CEFC 2016 - 17th Bienn. Conf. Electromagn. F. Comput.*, vol. 11, no. 6, p. 1, 2017.
[29] L. Szabó, C. Oprea, I. Viorel, and K. Á. Biró, “Novel Permanent Magnet Tubular Linear Generator for Wave Energy Converters,” 2010.
[30] G. Chendong, Z. Zuo, B. Jia, Z. Ziwei, F. Huihua, and A. P. Roskilly, “Parametric analysis of a dual-piston type free-piston gasoline engine linear generator,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1431–1436, 2019.
[31] Y. Yamanaka, M. Nirei, M. Sato, H. Murata, B. Yinggang, and T. Mizuno, “Design of linear synchronous generator suitable for free-piston engine linear generator system,” *LDIA 2017 - 11th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl.*, 2017.
[32] P. Gui, F. Deng, Z. Liang, Y. Cai, and J. Chen, “Micro linear generator for harvesting mechanical energy from the human gait,” *Energy*, vol. 154, pp. 365–373, 2018.
[33] H. Chen, S. Zhao, H. Wang, and R. Nie, “A Novel Single-Phase Tubular Permanent Magnet Linear Generator,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 30, no. 4, pp. 2–6, 2020.
[34] R. Guo, H. Yu, T. A. O. Xia, Z. Shi, W. Zhong, and X. Liu, “A Simplified Subdomain Analytical Model for the Design and Analysis of a Tubular Linear Permanent Magnet Oscillation Generator,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 42355–42367, 2018.

[35] H. M. Zapata, F. A. Cabrera, M. A. Perez, C. A. Silva, and W. Jara, “Model of a permanent magnet linear generator,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.*, vol. 2019-Octob, pp. 6992–6997, 2019.
[36] H. Jing, N. Maki, T. Ida, and M. Izumi, “Electrical design of large-scale tubular PM linear generators for wave energy conversion,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 12, pp. S113–S119, 2017.
[37] R. M. Korbekandi, N. J. Baker, and D. Wu, “A study of translator length in a tubular linear electrical machine designed for use in alinear combustion joule engine,” *2019 12th Int. Symp. Linear Drives Ind. Appl. LDIA 2019*, pp. 1–6, 2019.
[38] Y. Sun, Z. Xu, Q. Zhang, J. Lu, and L. Liu, “A Tubular Single-Phase Linear Generator with an Axially Magnetized PM Mover for Free-Piston Engines,” *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 139–146, 2021.
[39] A. Musolino, R. Rizzo, and M. Raugi, “A semi-analytical model for the analysis of a Permanent Magnet tubular linear generator,” *2015 Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2015*, vol. 54, no. 1, pp. 1513–1517, 2015.
[40] J. Zhang, H. Yu, and Z. Shi, “Analysis of a PM linear generator with double translators for complementary energy generation platform,” *Energies*, vol. 12, no. 24, 2019.
[41] A. Ronañach, “Diseño de un generador síncrono de imanes permanentes para aerogeneradores en áreas marinas,” Universidad Pontificia ICAI ICADE, 2018.
[42] B. Liu, B. Yu, J. Bai, G. Liu, P. Zheng, and Y. Liu, “Analysis and Optimization of a Tubular Permanent-Magnet Linear Generator,” *2019 22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019*, pp. 0–3, 2019.
[43] J. M. Kim, M. M. Koo, J. H. Jeong, K. Hong, I. H. Cho, and J. Y. Choi, “Design and analysis of tubular permanent magnet linear generator for small-scale wave energy converter,” *AIP Adv.*, vol. 7, no. 5, 2017.
[44] B. Xu and Y. Li, “Force Analysis and Energy Harvesting for Innovative Multi-functional Shoes,” *Front. Mater.*, vol. 6, no. September, pp. 1–8, 2019.
[45] N. P. Gargov and A. F. Zobaa, “Multi-phase air-cored tubular permanent magnet linear generator for wave energy converters,” *IET Renew. Power Gener.*, vol. 6, no. 3, pp. 171–176, 2012.
[46] N. I. M. Nor, M. F. Romlie, and R. Kannan, “Comparison of tubular and planar design of a micro linear generator for vibration energy harvesting,” *2015 IEEE Conf. Energy Conversion, CENCON 2015*, pp. 233–237, 2015.
[47] S. M. Jang, J. Y. Choi, H. W. Cho, and S. H. Lee, “Thrust analysis and measurements of tubular linear actuator with cylindrical Halbach array,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 5, pp. 2028–2031, 2005.
[48] R. P. G. Mendes, M. R. A. Calado, and S. J. P. S. Mariano, “Electromagnetic design method for a TLSRG with application in ocean wave energy conversion,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, no. March, p. 106097, 2020.
[49] A. Tapia-Hernández, M. Ponce-Silva, N. Mondragón-Escamilla, and L. Hernández-González, “Impacto de la Geometría en el Efecto Fin de Generadores Lineales,” *Inf. Tecnol.*, vol. 27, no. 4, pp. 133–138, 2016.
[50] L. A. J. Friedrich, J. J. H. Paulides, and E. A. Lomonova, “Modeling and Optimization of a Tubular Generator for Vibration Energy Harvesting Application,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, pp. 1–5, 2017.

[51] B. Sugiyantoro, S. A. Rafsanjani, and W. Yusuf Susilo, “Slot-less tubular linear permanent magnet generator using halbach-array excitation,” *Proc. 2018 10th Int. Conf. Inf. Technol. Electr. Eng. Smart Technol. Better Soc. ICITEE 2018*, pp. 573–576, 2018.
[52] J. Subramanian and P. Famouri, “Analysis of Neutral position, Magnet - Spacer of Tubular Permanent Magnet Linear generator for FPE applications,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2019-June, pp. 232–237, 2019.
[53] L. Huang, J. Liu, H. Yu, R. Qu, H. Chen, and H. Fang, “Winding configuration and performance investigations of a tubular superconducting flux-switching linear generator,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, 2015.
[54] O. Yaakob, T. A. Rashid, and M. Mukti, “Prospects for ocean energy in Malaysia,” *Int. Conf. Energy Environ. 2006*, vol. 2006, no. August, pp. 1–7, 2006.
[55] M. Leijon *et al.*, “Multiphysics simulation of wave energy to electric energy conversion by permanent magnet linear generator,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, no. 1, pp. 219–224, 2005.
[56] K. Thorburn and M. Leijon, “Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters,” vol. 34, pp. 908–916, 2007.
[57] M. Leijon, O. Danielsson, M. Eriksson, K. Thorburn, and H. Bernhoff, “An electrical approach to wave energy conversion,” *Renew. Energy*, pp. 1309–1319, 2006.
[58] Z. G. Sun, N. C. Cheung, S. W. Zhao, Y. Lu, and Z. H. Shi, “Design and simulation of a linear switched reluctance generator for wave energy conversion,” *2011 4th Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl. PESA 2011*, 2011.
[59] H. Polinder, M. E. C. Damen, and F. Gardner, “Linear PM Generator System for Wave Energy Conversion in the AWS,” vol. 19, no. 3, pp. 583–589, 2004.
[60] K. M. Nor, W. Arof, and Wijono, “Design of a 5 kW Tubular Permanent Magnet Linear Generator,” *Proc. 39th Int. Univ. Power Eng. Conf. (UPEC 2004)*, pp. 528–532, 2004.
[61] C. Burbano, Santiago; Burbano, Enrique; Gracia, *Física general*. Editorial Tébar, S.L., 2013.
[62] A. N. Matveev, *Electricidad y magnetismo*. Mir, 1988.
[63] P. Tipler and M. Gene, *Física para la ciencia y la tecnología*, 2nd ed. Editorial reverté, S. A., 2000.
[64] H. Naveros, *Electrostática y magnetismo*, 3rd ed. Moshera, 2003.
[65] G. González Palomino, *Motores lineales de imanes permanentes: principios de funcionamiento y optimización*. Programa Editorial Universidad Autónoma de Occidente, 2016.
[66] F. P. Rodriguez, A. R. Torres, and H. Vacca, “STUDY WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS OF ANALOG CIRCUIT SYSTEMS IN PHYSICS,” *Rev. Visión Electron.*, vol. 6, no. 1, pp. 98–103, 2012.
[67] J. M. Fornons, *El Método de los Elementos Finitos*. Marcombo, 1982.
[68] K&J Magnetics, “RX088: Magnetic Field Visualization Single Magnet in Free Space,” 2021.
[69] J. Kim, J. Y. Kim, and J. B. Park, “Design and optimization of a 8kW linear generator for a direct-drive point absorber,” *Ocean. 2013 MTS/IEEE - San Diego An Ocean Common*, pp. 1–6, 2013.
[70] S. Arslan and S. A. Oy, “Design and optimization of tube type interior permanent magnets generator for free piston applications,” *TEM J.*, vol. 6, no. 2, pp. 214–221, 2017.

[71] H. J.R. and T. J. E. Miller, *Design of brushless permanetn magnet machines*, vol. 732, no. 1. USA: Magna physycs publishing & Oxford University Press, 2010.
[72] S. A. Nasar, "Permanent-Magnet Linear Alternators Part II: Design Guidelines," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-23, no. 1, pp. 79–82, 1987.
[73] PowerStream Technology, "Wire Gauge and Current Limits Including Skin Depth and Strength," 2021. [Online]. Available: https://www.powerstream.com/Wire_Size.htm.

10.Anexos

RX088 Specification Sheet

Product Specifications

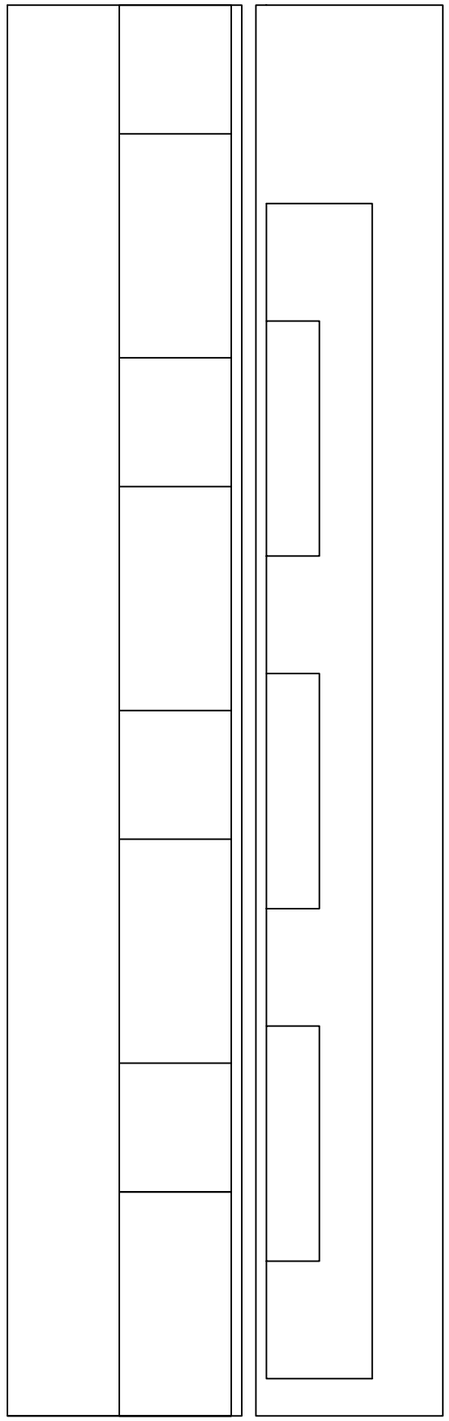


Type:	RING
Dimensions:	1 dia x 0.5 inner-dia x 0.5 thk (in)
Tolerance:	All dimensions ± 0.004 in
Material:	NdFeB, Grade N42
Plating:	NiCuNi
Max Op Temp:	176ºF (80ºC)
Br max:	13,200 Gauss
BH max:	42 MGOe

Performance Specifications

Pull Force, Case 1, Magnet to a Steel Plate:	35.86 lb

Surface Field values are derived from calculation and verification with experimental testing. These values are the field values at the surface of the magnet, centered on the axis of magnetization. Measurement of the B field with a magnetometer may yield varying results, depending on the geometry of your sensor. Pull Force values are based on extensive product testing in our laboratory. Different configurations of magnets and surrounding ferromagnetic materials may substantially alter your results.



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

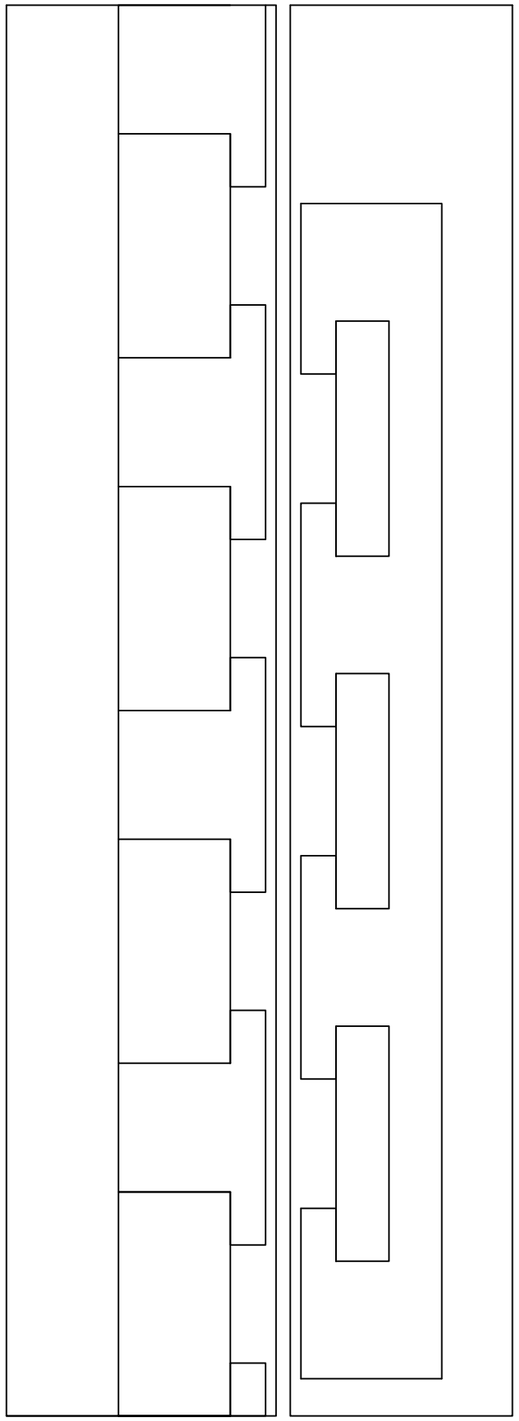
DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología base de generador lineal tubular

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–001	A&B

SCALE | SHEET

Manuel Gongora 26/05/21 Topologia Base



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

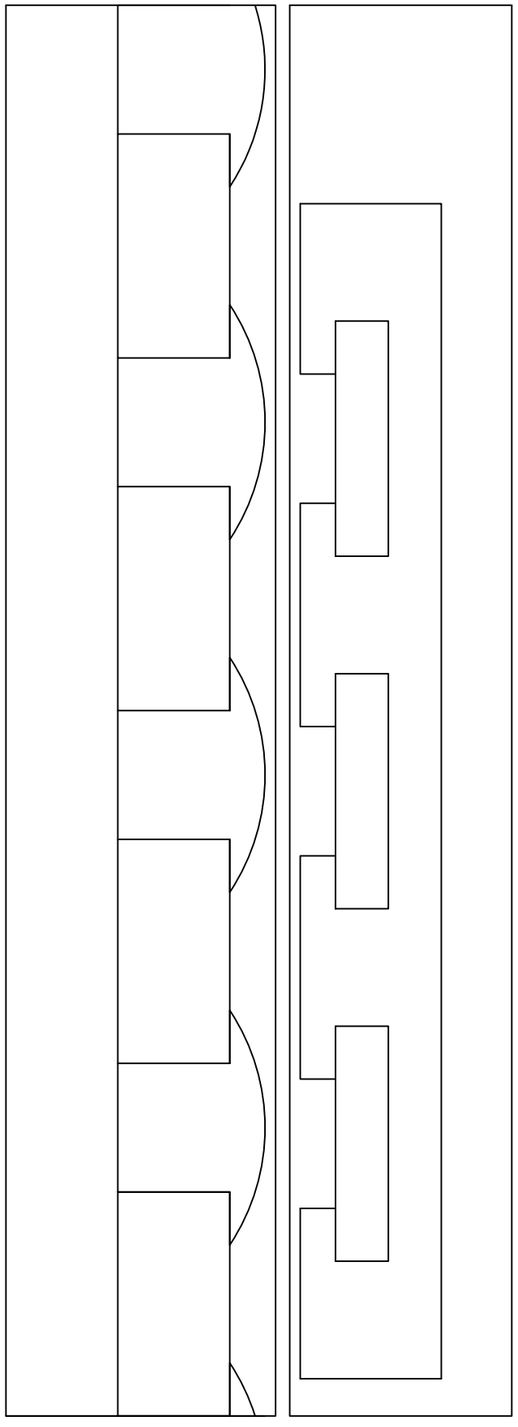
DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes tipo T

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–002	A&B

SCALE | SHEET

Manuel Gongora 26/05/21 Topologia Base



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

Topologia Base

26/05/21

Manuel Gongora

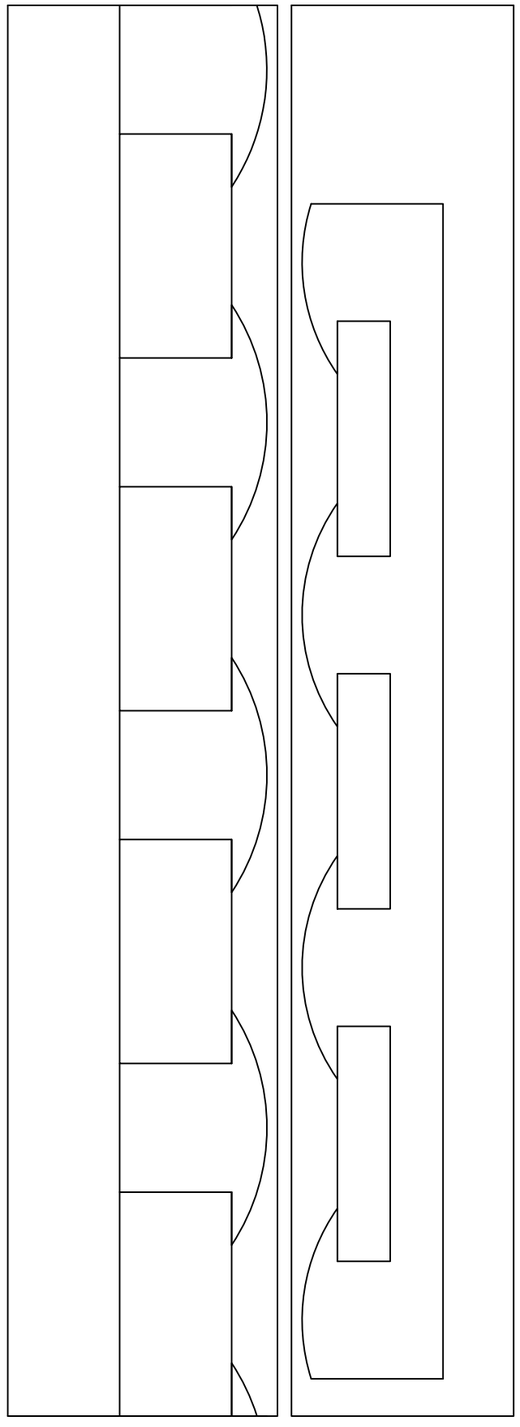
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes Concavo en trans. T en est.

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–003	A&B

SCALE		SHEET



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

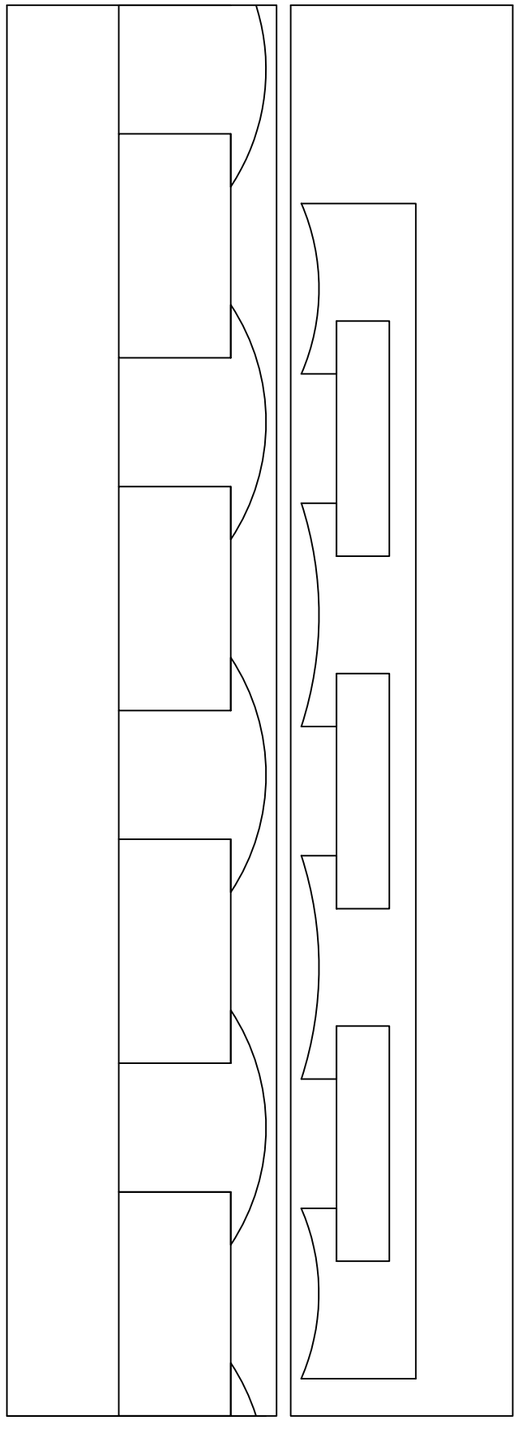
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL
USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes Concavo en trans. y en est.

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–003	A&B
SCALE		SHEET	

Manuel Gongora 26/05/21 Topologia Base



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

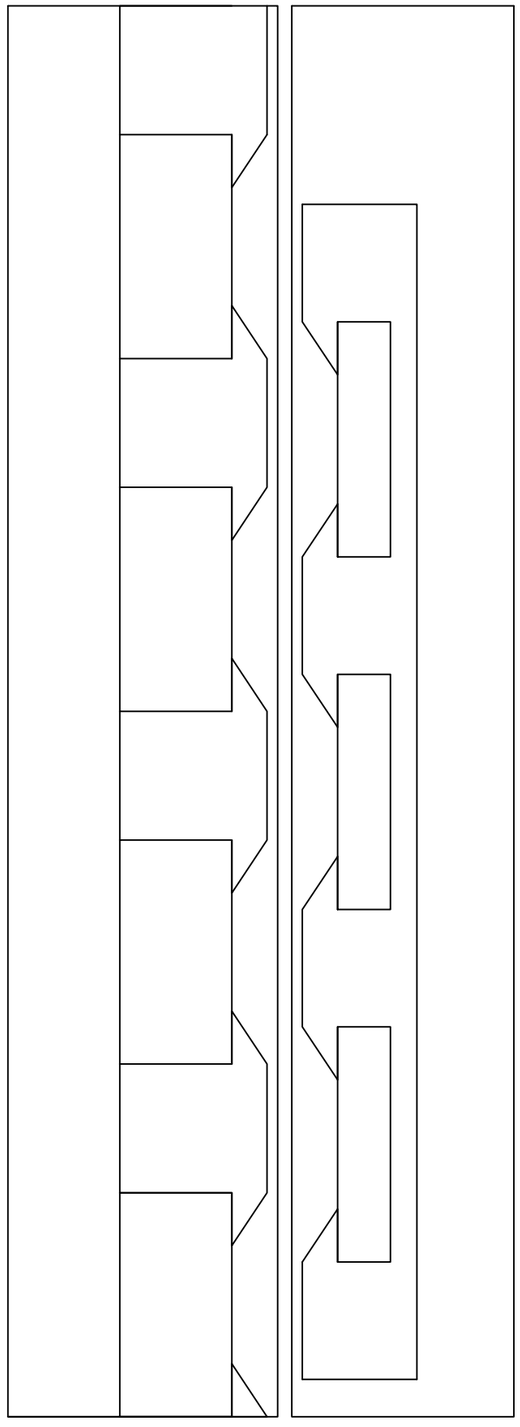
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes Concavo en trans. y Convexo en est.

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–005	A&B
SCALE		SHEET	

Manuel Gongora 26/05/21 Topologia Base



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

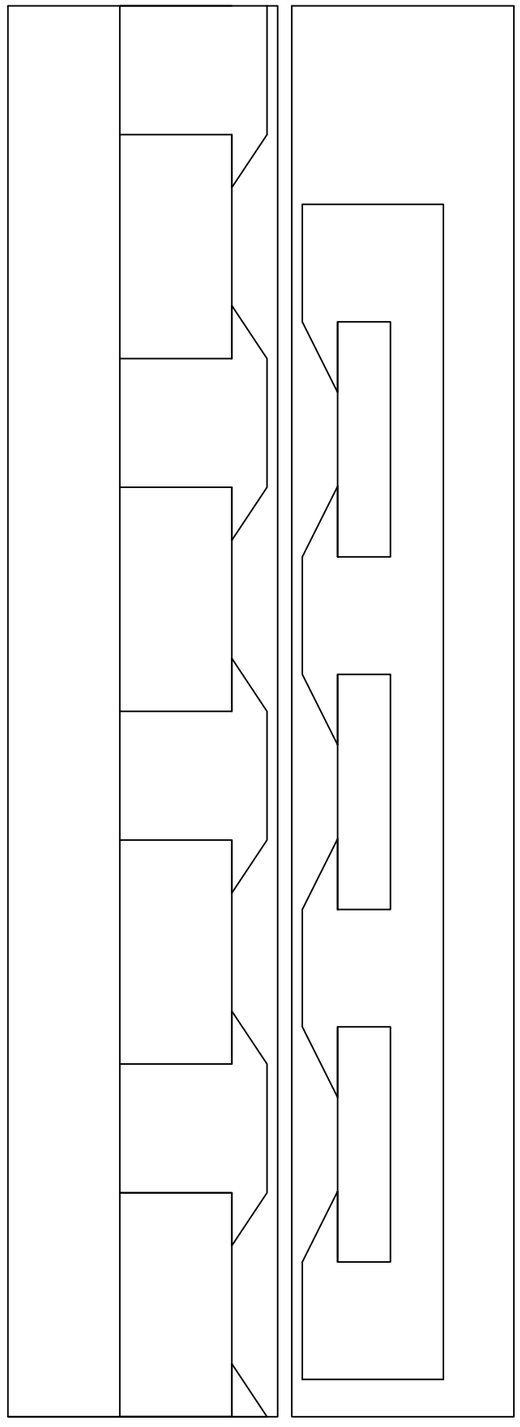
DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL
USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes trapecio en transl y est.

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–006	A&B

SCALE | SHEET

Topologia Base
26/05/21
Manuel Gongora



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

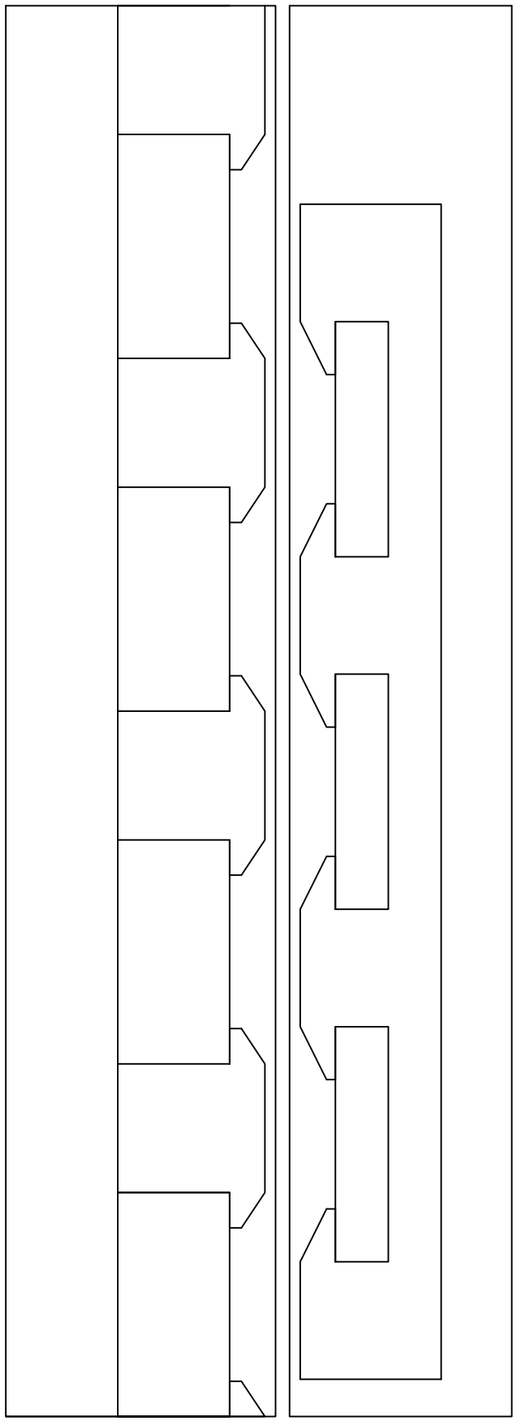
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes trapecio extendido en transl. y est.

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–007	A&B
SCALE			SHEET

Topologia Base
26/05/21
Manuel Gongora



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

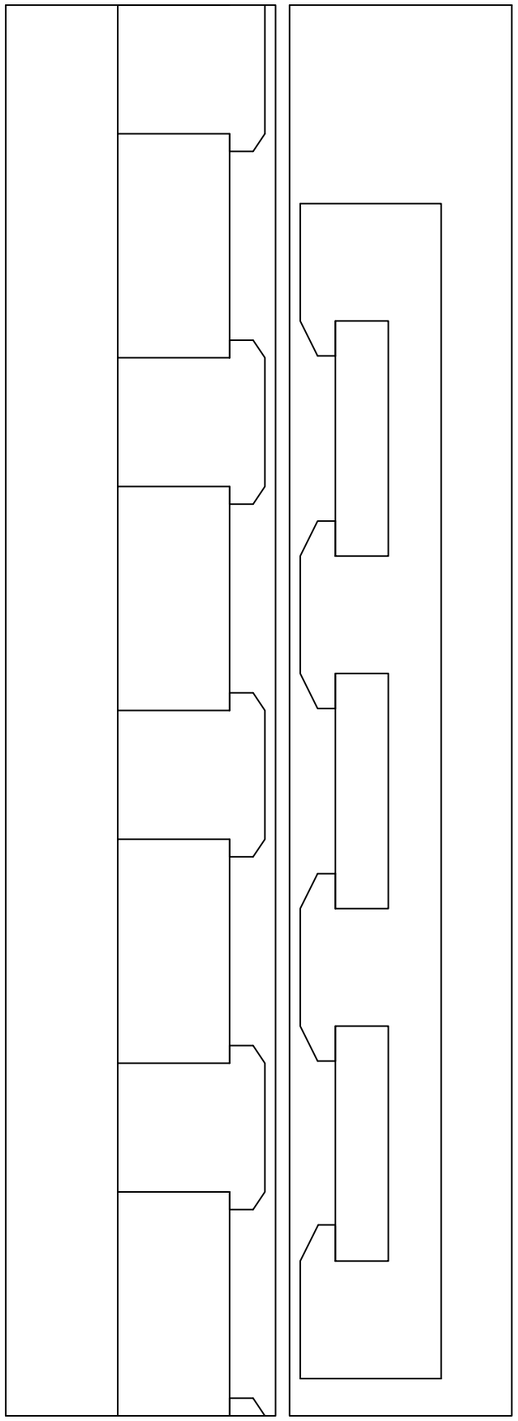
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes trapecio recortado 1 en transl. y est.

SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–008	A&B
SCALE			SHEET

Manuel Gongora 26/05/21 Topologia Base



REVISIONS				
ZONE	REV	DESCRIPTION	DATE	APPROVED

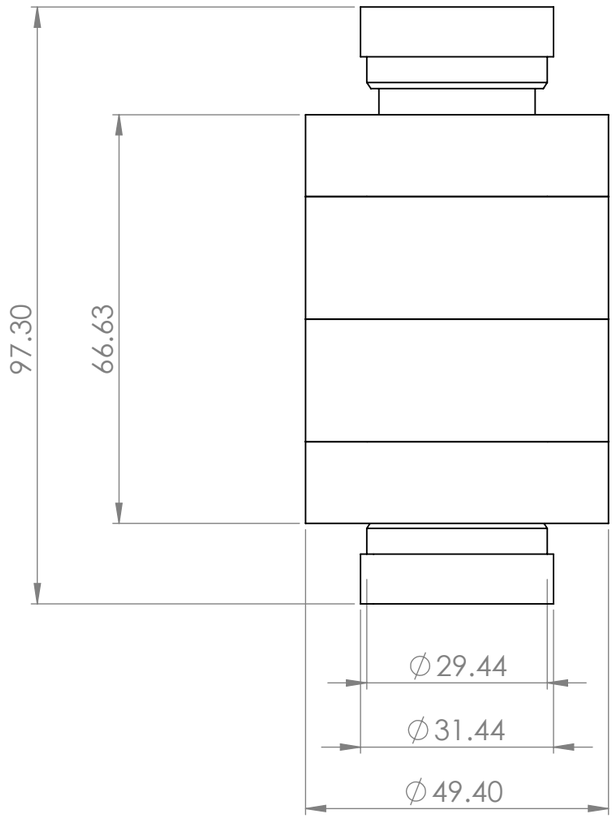
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

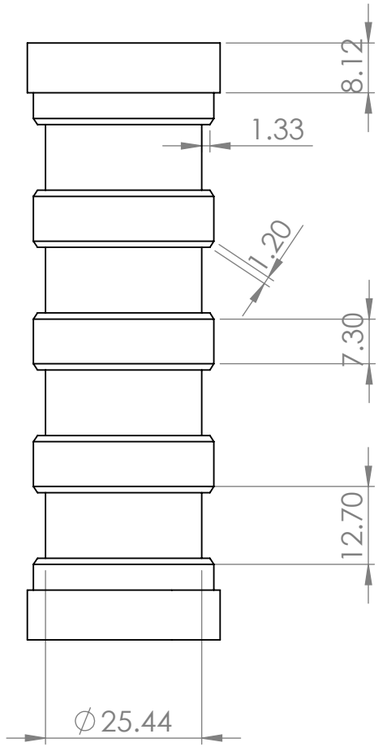
DISEÑO DE UN GENERADOR TUBULAR LINEAL USANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

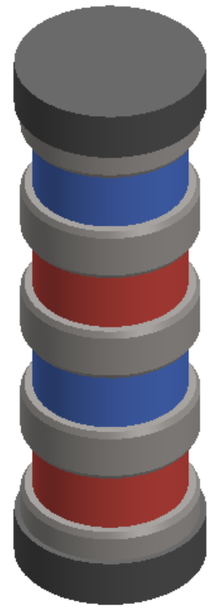
Topología de generador lineal tubular
Variacion dientes trapecio recortado 2 en transl. y est.

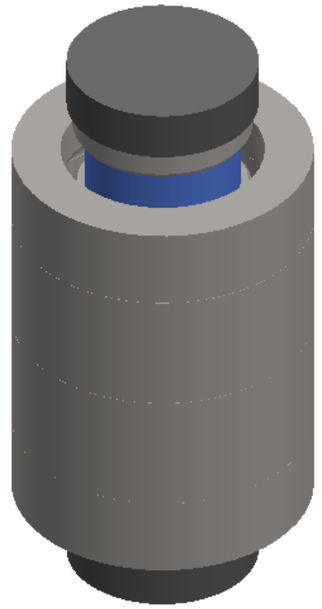
SIZE	FSCM NO.	DWG NO.	REV
		GTL–UD–ICA–009	A&B
SCALE			SHEET

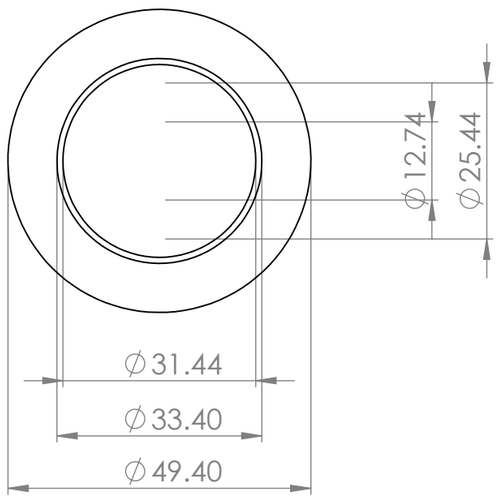
Manuel Gongora 26/05/21 Topologia Base











SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
						Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO:	
DIBUJ.	Manuel G.					Solución obtenida de Generador Tubular Lineal	
VERIF.	Manuel G.						
APROB.	Henry M.						
FABR.							
CALID.				MATERIAL:		N.° DE DIBUJO 01	A3
				PESO:		ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1

Tubular generator

Report date

Aug 16, 2021 8:57:18 PM

Contents

1. Global Definitions 3

1.1. Parameters 3

2. Component 1 4

2.1. Definitions 4

2.2. Geometry 1 6

2.3. Materials 6

2.4. Magnetic Fields 8

2.5. Moving Mesh 11

2.6. Mesh 1 12

3. Study 1 13

3.1. Stationary 13

3.2. Time Dependent 13

4. Results 15

4.1. Data Sets 15

4.2. Derived Values 17

4.3. Tables 18

4.4. Plot Groups 19

1 Global Definitions

Date	May 5, 2021 11:41:06 PM

GLOBAL SETTINGS

Name	Topologia0 1.mph
Path	C:\Users\Manuel\Documents\0Generadorlineal\Topologias\V2\Topologia0_1.mph
Version	COMSOL Multiphysics 5.5 (Build: 292)

USED PRODUCTS

COMSOL Multiphysics
AC/DC Module

1.1 PARAMETERS

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
Mg_h	12.7[mm]	0.0127 m	Magnet Height
P_P	2*Mg_h + 2*Sl_ch	0.04 m	2*Pole pitch
Frequency	speed/(P_P)	40 1/s	Frequency of oscillation
B0	1.32[T]	1.32 T	Remanent magnetic flux density
t	0[s]	0 s	Time for stationary study

2 Component 1

SETTINGS

Description	Value
Avoid inverted elements by curving interior domain elements	Off

2.1 DEFINITIONS

2.1.1 Selections

Iron

Selection type
Explicit

Selection
Domains 3, 5, 7, 9, 12

Explicit 1

Selection type
Explicit

Selection
Boundaries 3, 20, 30

Explicit 2

Selection type
Explicit

Selection
Boundaries 34, 51

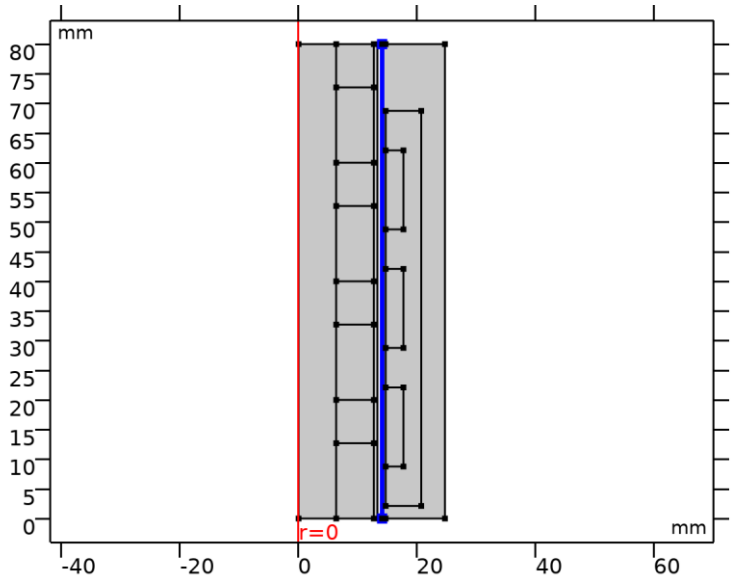
2.1.2 Nonlocal Couplings

General Extrusion 1

Coupling type	General extrusion
Operator name	genext1

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Geometry geom1: Dimension 1: Boundary 32



Selection

2.1.3 Coordinate Systems

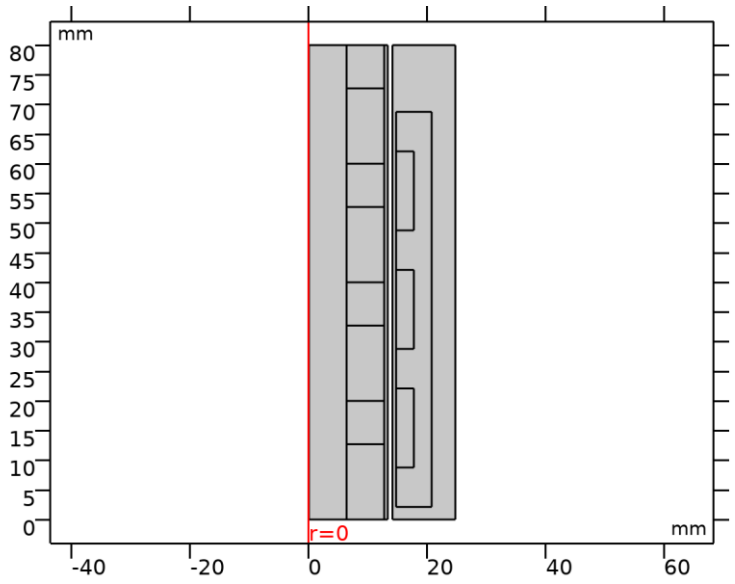
Boundary System 1

Coordinate system type	Boundary system
Tag	sys1

COORDINATE NAMES

First	Second	Third
t1	to	n

2.2 GEOMETRY 1



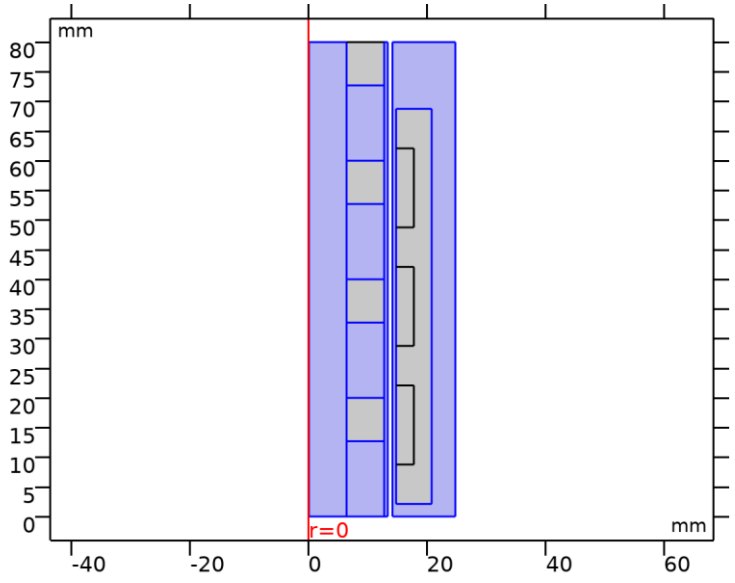
Geometry 1

UNITS

Length unit	mm
Angular unit	deg

2.3 MATERIALS

2.3.1 Air

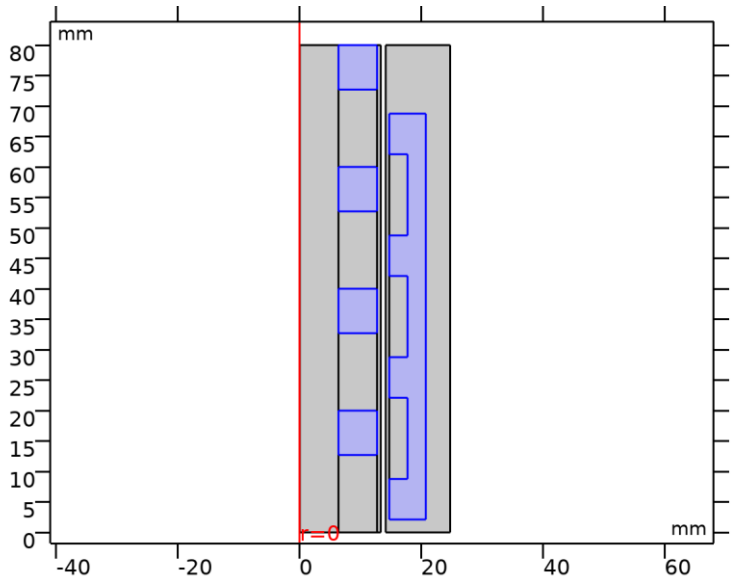


Air

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: All domains

2.3.2 Soft Iron (without losses)

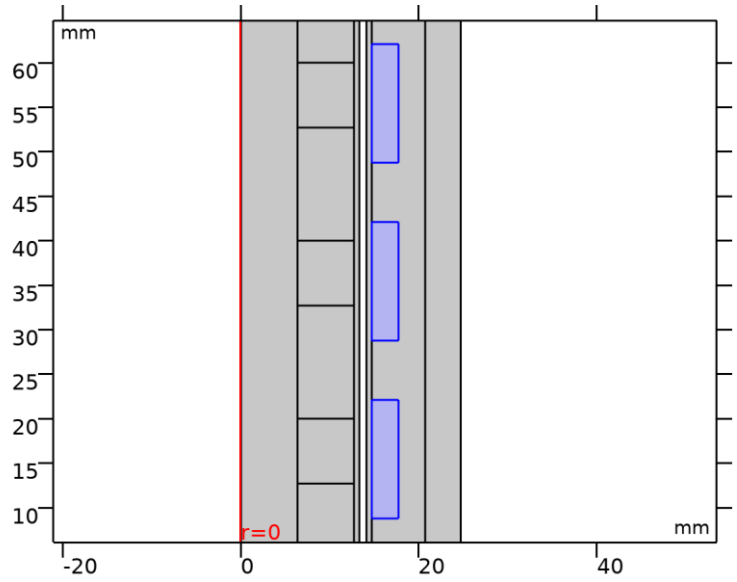


Soft Iron (without losses)

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 3, 5, 7, 9, 12

2.3.3 Copper

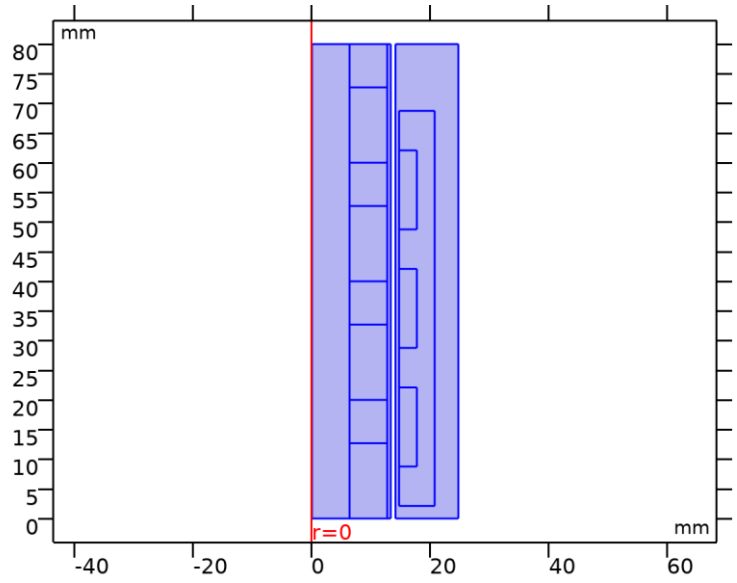


Copper

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 13–15

2.4 MAGNETIC FIELDS



Magnetic Fields

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} + \sigma\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$$

FEATURES

Ampère's Law 1
Axial Symmetry 1
Magnetic Insulation 1
Initial Values 1
Ampère's Law 2
Multi-Turn Coil 1
Multi-Turn Coil 2
Multi-Turn Coil 3
Ampère's Law 3
Ampère's Law 4
Periodic Condition 1
Periodic Condition 2
Magnetic Potential 1
Perfect Magnetic Conductor 1

2.4.1 Ampère's Law 1

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$
$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$$

2.4.2 Magnetic Insulation 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$$

2.4.3 Ampère's Law 2

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}$$

2.4.4 Multi-Turn Coil 1

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{coil}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.5 Multi-Turn Coil 2

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{coil}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.6 Multi-Turn Coil 3

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{coil}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.7 Ampère's Law 3

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.8 Ampère's Law 4

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.9 Periodic Condition 1

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{dst} = \mathbf{A}_{src}$$

2.4.10 Periodic Condition 2

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{dst} = \mathbf{A}_{src}$$

2.4.11 Magnetic Potential 1

EQUATIONS

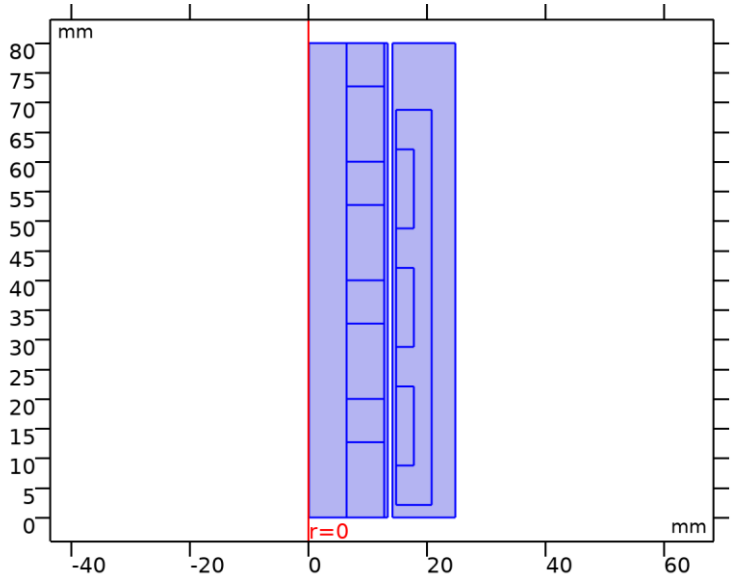
$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0$$

2.4.12 Perfect Magnetic Conductor 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = \underset{\cdot\cdot}{0}$$

2.5 MOVING MESH

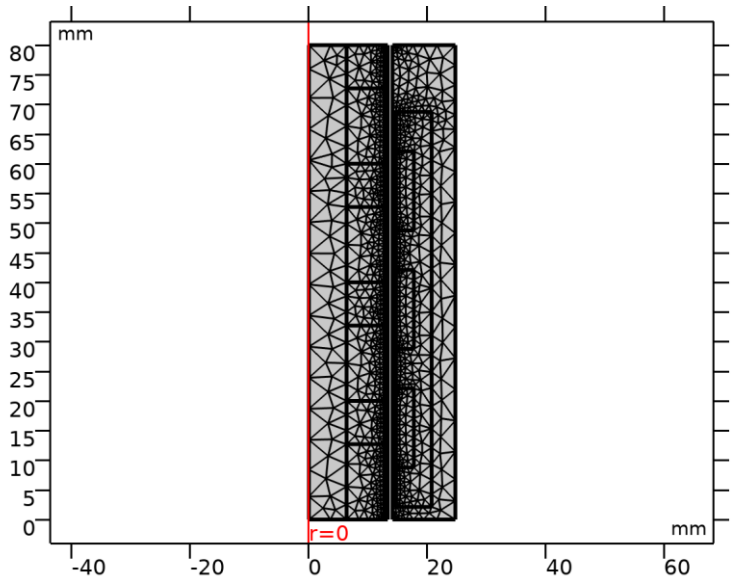


Moving Mesh

FEATURES

Fixed Mesh 1
Prescribed Mesh Displacement 1
Prescribed Deformation 1

2.6 MESH 1



Mesh 1

3 Study 1

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	1 min 21 s
CPU	Intel64 Family 6 Model 61 Stepping 4, 2 cores
Operating system	Windows 10

3.1 STATIONARY

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

3.2 TIME DEPENDENT

Times	Unit
range(0,0.001,0.035)	s

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

STUDY SETTINGS

Description	Value
Times	{0, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009000000000000001, 0.01, 0.011, 0.012, 0.013000000000000001, 0.014, 0.015, 0.016, 0.017, 0.018000000000000002, 0.019, 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024, 0.025, 0.026000000000000002, 0.027, 0.028, 0.029, 0.03, 0.031, 0.032, 0.033, 0.034, 0.035}

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

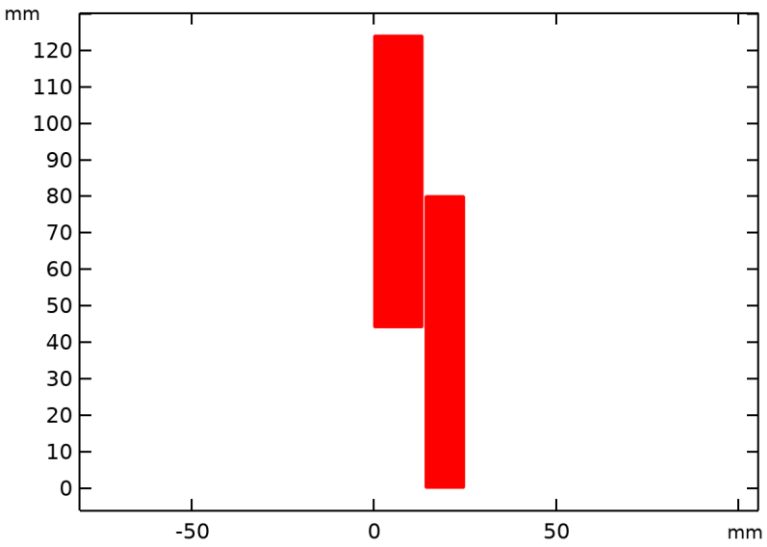
4 Results

4.1 DATA SETS

4.1.1 Solution 1

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

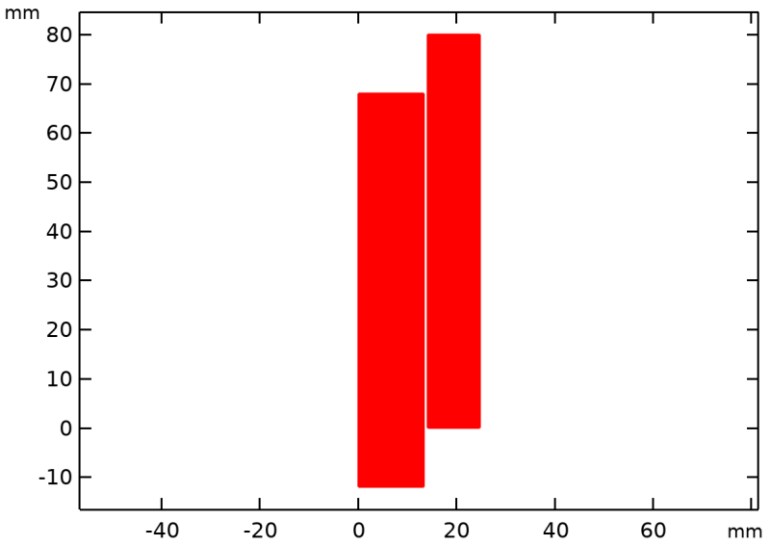


Dataset: Solution 1

4.1.2 Solution 2

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solution Store 1
Component	Save Point Geometry 1



Dataset: Solution 2

4.1.3 Revolution 2D 1

DATA

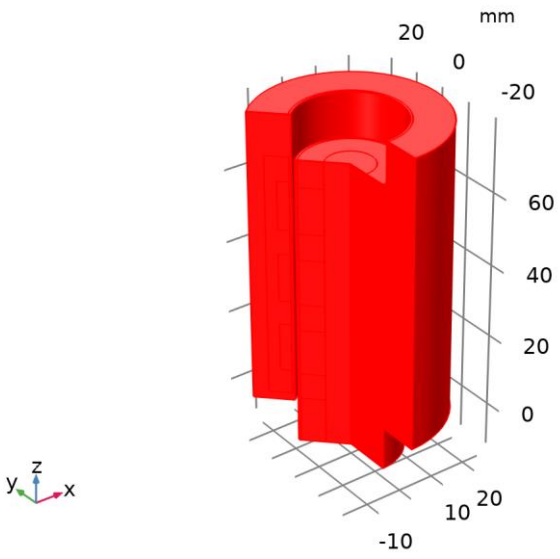
Description	Value
Dataset	Solution 2

AXIS DATA

Description	Value
Axis entry method	Two points
Points	{{0, 0}, {0, 1}}

REVOLUTION LAYERS

Description	Value
Start angle	-90
Revolution angle	225



Dataset: Revolution 2D 1

4.1.4 Solution 1.2

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: No domains

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

4.2 DERIVED VALUES

4.2.1 Global Evaluation 1

OUTPUT

Evaluated in	Table 1

DATA

Description	Value
Dataset	Solution 1

EXPRESSIONS

Expression	Unit	Description
mf.RCoil_2	Ω	Coil 1 resistance (DC)
mf.RCoil_1	Ω	Coil 2 resistance (DC)

Expression	Unit	Description
mf.RCoil_3	Ω	Coil 3 resistance (DC)

4.3 TABLES

4.3.1 Table 1

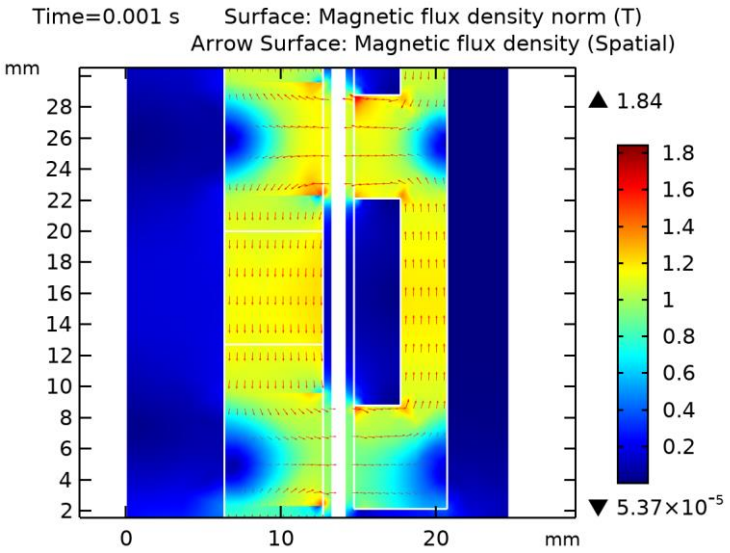
Global Evaluation 1

Time (s)	Coil 1 resistance (DC) (Ω)	Coil 2 resistance (DC) (Ω)	Coil 3 resistance (DC) (Ω)
0.0000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0010000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0020000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0030000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0040000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0050000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0060000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0070000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0080000	2.4780	2.4780	2.4780
0.0090000	2.4780	2.4780	2.4780
0.010000	2.4780	2.4780	2.4780
0.011000	2.4780	2.4780	2.4780
0.012000	2.4780	2.4780	2.4780
0.013000	2.4780	2.4780	2.4780
0.014000	2.4780	2.4780	2.4780
0.015000	2.4780	2.4780	2.4780
0.016000	2.4780	2.4780	2.4780
0.017000	2.4780	2.4780	2.4780
0.018000	2.4780	2.4780	2.4780
0.019000	2.4780	2.4780	2.4780
0.020000	2.4780	2.4780	2.4780
0.021000	2.4780	2.4780	2.4780
0.022000	2.4780	2.4780	2.4780
0.023000	2.4780	2.4780	2.4780
0.024000	2.4780	2.4780	2.4780
0.025000	2.4780	2.4780	2.4780
0.026000	2.4780	2.4780	2.4780
0.027000	2.4780	2.4780	2.4780

Time (s)	Coil 1 resistance (DC) (Ω)	Coil 2 resistance (DC) (Ω)	Coil 3 resistance (DC) (Ω)
0.028000	2.4780	2.4780	2.4780
0.029000	2.4780	2.4780	2.4780
0.030000	2.4780	2.4780	2.4780
0.031000	2.4780	2.4780	2.4780
0.032000	2.4780	2.4780	2.4780
0.033000	2.4780	2.4780	2.4780
0.034000	2.4780	2.4780	2.4780
0.035000	2.4780	2.4780	2.4780

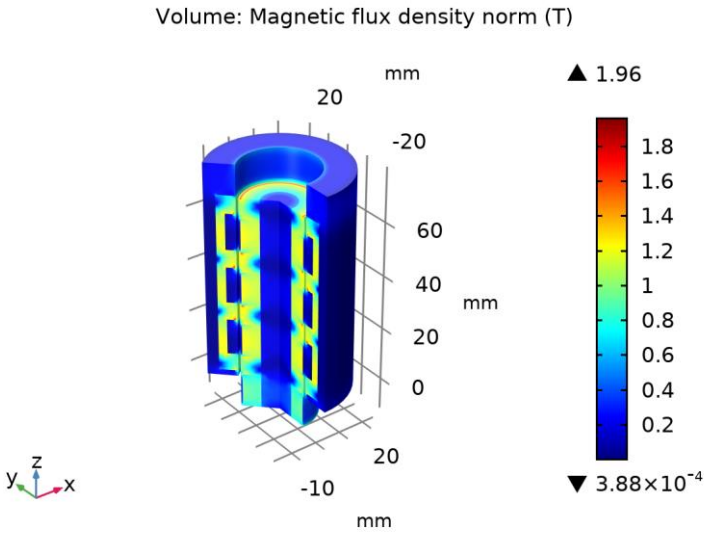
4.4 PLOT GROUPS

4.4.1 Magnetic Flux Density Norm (mf)



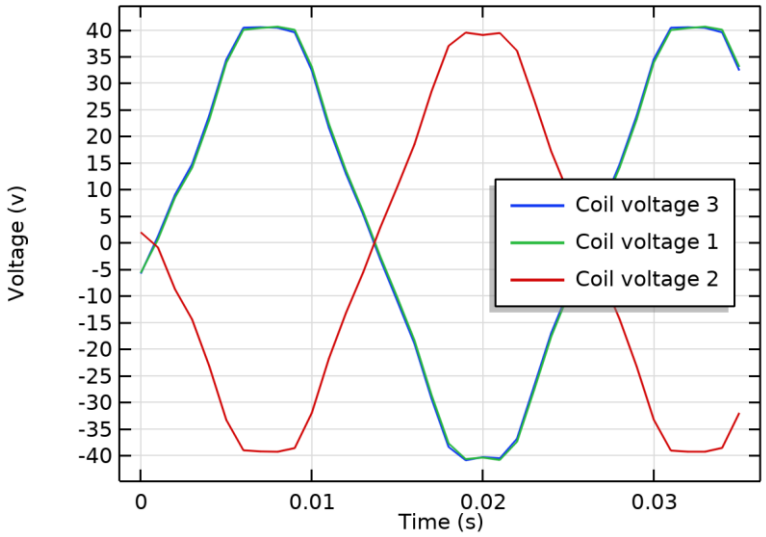
Surface: Magnetic flux density norm (T) Arrow Surface: Magnetic flux density (Spatial)

4.4.2 Magnetic Flux Density Norm 3D

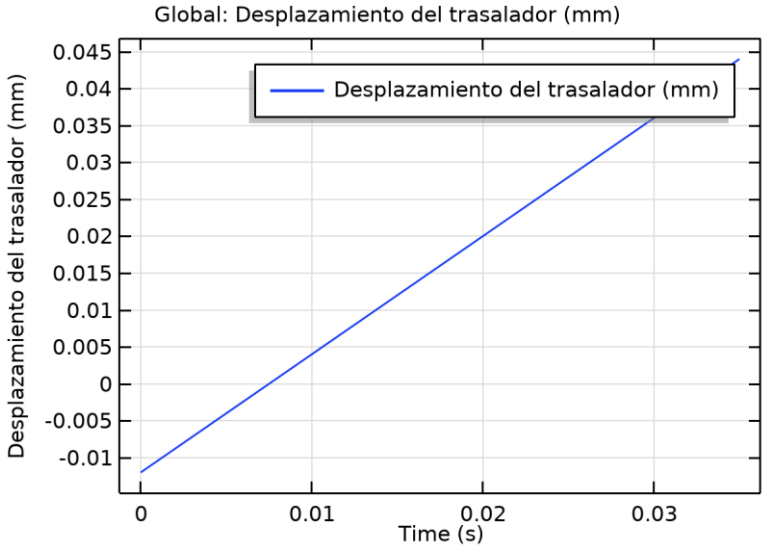


Volume: Magnetic flux density norm (T)

4.4.3 Induced Voltage

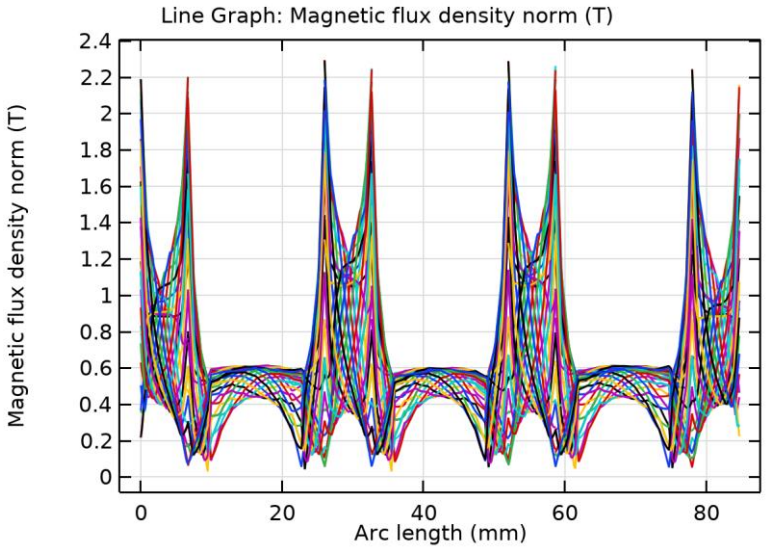


4.4.4 Mov



Global: Desplazamiento del trasalador (mm)

4.4.5 1D Plot Group 6



Line Graph: Magnetic flux density norm (T)

Tubular generator

Report date

Aug 16, 2021 10:40:47 PM

Contents

1. Global Definitions 3

1.1. Parameters 3

2. Component 1 4

2.1. Definitions 4

2.2. Geometry 1 6

2.3. Materials 6

2.4. Magnetic Fields 8

2.5. Moving Mesh 11

2.6. Electrical Circuit 11

2.7. Electrical Circuit 2 11

2.8. Electrical Circuit 3 11

2.9. Mesh 1 12

3. Study 1 13

3.1. Stationary 13

3.2. Time Dependent 13

4. Results 15

4.1. Data Sets 15

4.2. Plot Groups 18

1 Global Definitions

Date	May 19, 2021 7:23:09 PM

GLOBAL SETTINGS

Name	Topologia0 1C.mph
Path	C:\Users\Manuel\Documents\0Generadorlineal\Topologias\V2\Topologia0_1C.mph
Version	COMSOL Multiphysics 5.5 (Build: 292)

USED PRODUCTS

COMSOL Multiphysics
AC/DC Module

1.1 PARAMETERS

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
Mg_h	12.7[mm]	0.0127 m	Magnet Height
P_P	2*Mg_h + 2*Sl_ch	0.04 m	2*Pole pitch
Frequency	speed/(P_P)	40 1/s	Frequency of oscillation
B0	1.32[T]	1.32 T	Remanent magnetic flux density
t	0[s]	0 s	Time for stationary study

2 Component 1

SETTINGS

Description	Value
Avoid inverted elements by curving interior domain elements	Off

2.1 DEFINITIONS

2.1.1 Selections

Iron

Selection type
Explicit

Selection
Domains 3, 5, 7, 9, 12

Explicit 1

Selection type
Explicit

Selection
Boundaries 3, 20, 30

Explicit 2

Selection type
Explicit

Selection
Boundaries 34, 51

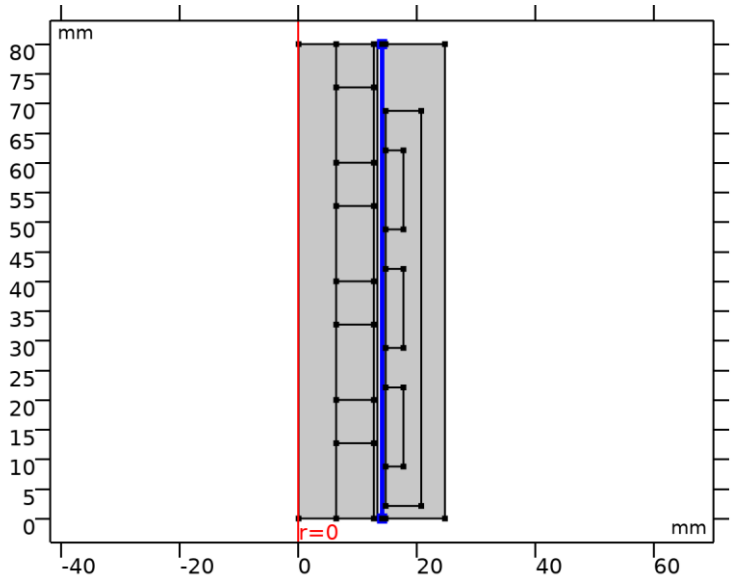
2.1.2 Nonlocal Couplings

General Extrusion 1

Coupling type	General extrusion
Operator name	genext1

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Geometry geom1: Dimension 1: Boundary 32



Selection

2.1.3 Coordinate Systems

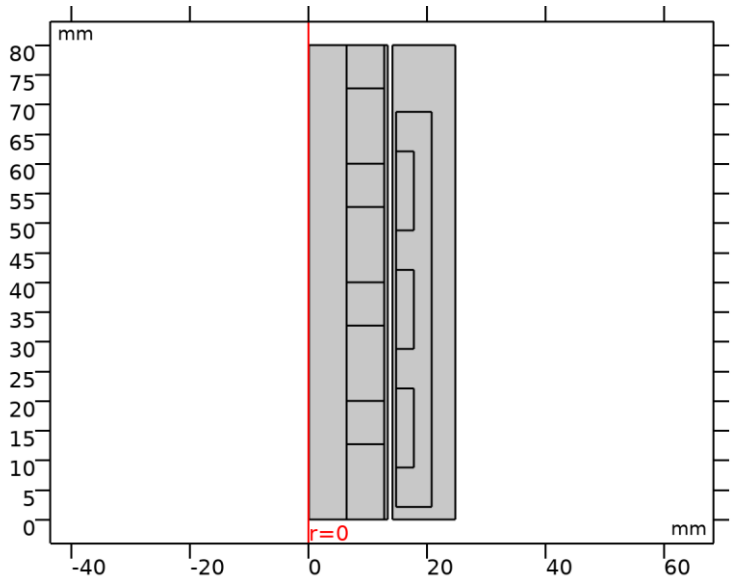
Boundary System 1

Coordinate system type	Boundary system
Tag	sys1

COORDINATE NAMES

First	Second	Third
t1	to	n

2.2 GEOMETRY 1



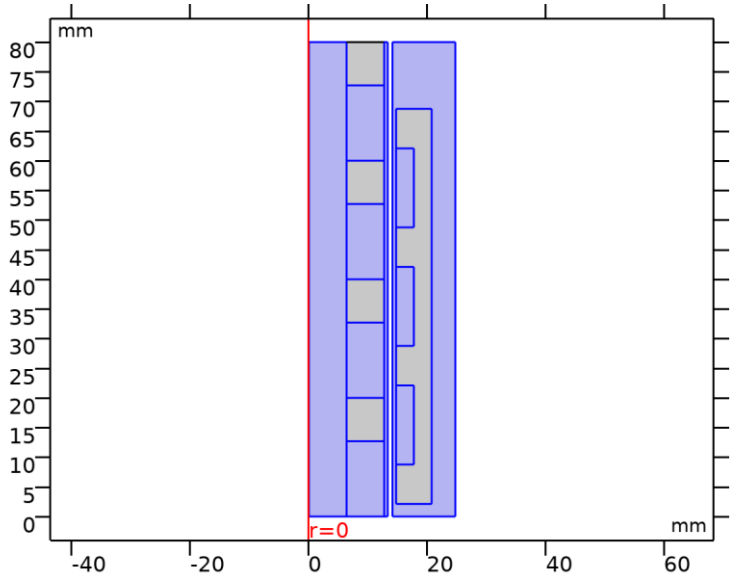
Geometry 1

UNITS

Length unit	mm
Angular unit	deg

2.3 MATERIALS

2.3.1 Air

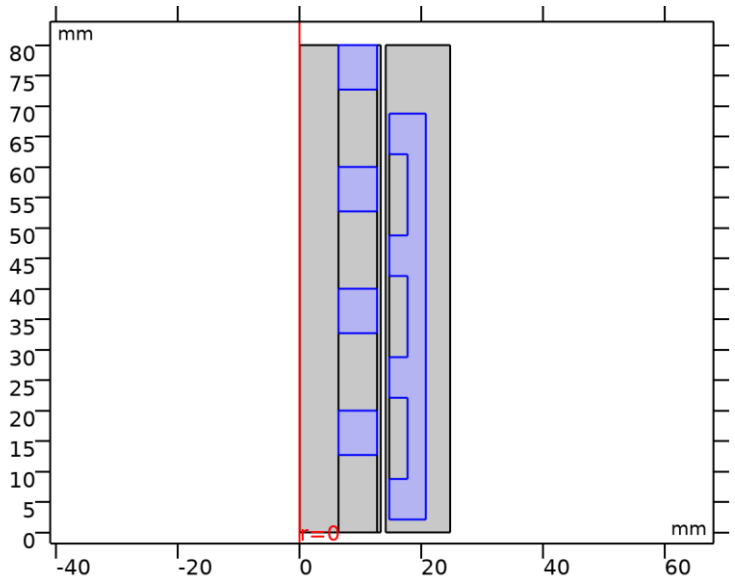


Air

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: All domains

2.3.2 Soft Iron (without losses)

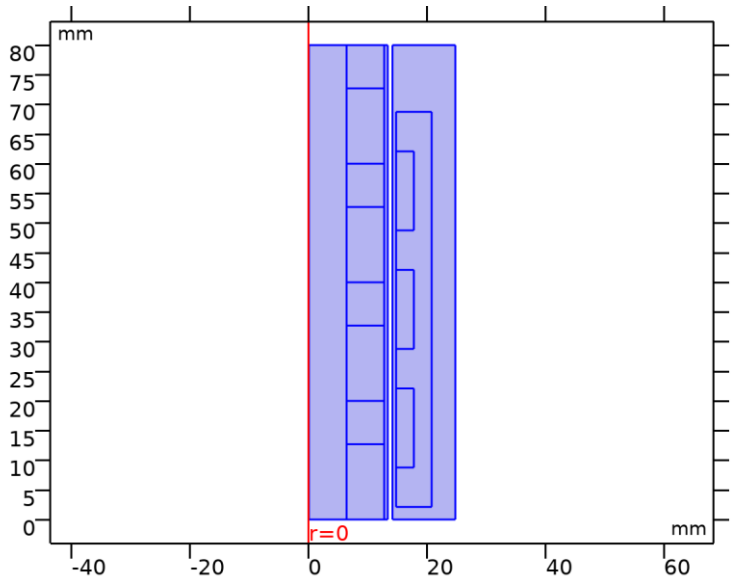


Soft Iron (without losses)

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 3, 5, 7, 9, 12

2.4 MAGNETIC FIELDS



Magnetic Fields

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$$

FEATURES

Ampère's Law 1
Axial Symmetry 1
Magnetic Insulation 1
Initial Values 1
Ampère's Law 2
Multi-Turn Coil 1
Multi-Turn Coil 2
Multi-Turn Coil 3
Ampère's Law 3
Ampère's Law 4
Periodic Condition 1
Periodic Condition 2
Magnetic Potential 1
Perfect Magnetic Conductor 1
Force Calculation 1
Force Calculation 2

2.4.1 Ampère's Law 1

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.2 Magnetic Insulation 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$$

2.4.3 Ampère's Law 2

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.4 Multi-Turn Coil 1

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{cir}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.5 Multi-Turn Coil 2

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{cir}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.6 Multi-Turn Coil 3

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{cir}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.7 Ampère's Law 3

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.8 Ampère's Law 4

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.9 Periodic Condition 1

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{\mathrm{dst}} = \mathbf{A}_{\mathrm{src}}$$

2.4.10 Periodic Condition 2

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{\mathrm{dst}} = \mathbf{A}_{\mathrm{src}}$$

2.4.11 Magnetic Potential 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0$$

2.4.12 Perfect Magnetic Conductor 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$$

2.4.13 Force Calculation 1

EQUATIONS

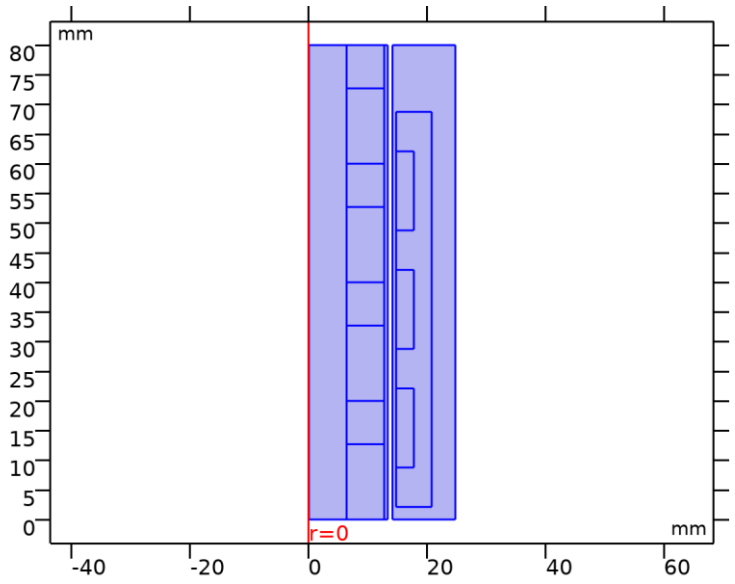
$$\mathbf{F} = \int_{\partial\Omega} 2\pi r\, \mathbf{n} T\, dS$$

2.4.14 Force Calculation 2

EQUATIONS

$$\mathbf{F} = \int_{\partial\Omega} 2\pi r\, \mathbf{n} T\, dS$$

2.5 MOVING MESH



Moving Mesh

FEATURES

Fixed Mesh 1
Prescribed Mesh Displacement 1
Prescribed Deformation 1

2.6 ELECTRICAL CIRCUIT

EQUATIONS

FEATURES

Ground Node 1
Resistor R1
External I vs. U 1

2.7 ELECTRICAL CIRCUIT 2

EQUATIONS

FEATURES

Ground Node 1
Resistor R2
External I vs. U 1

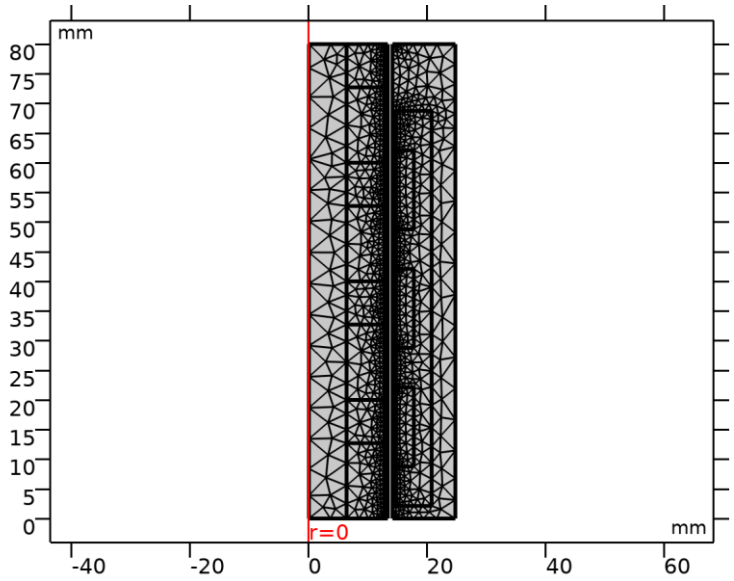
2.8 ELECTRICAL CIRCUIT 3

EQUATIONS

FEATURES

Ground Node 1
Resistor R3
External I vs. U 1

2.9 MESH 1



Mesh 1

3 Study 1

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	1 min 9 s
CPU	Intel64 Family 6 Model 61 Stepping 4, 2 cores
Operating system	Windows 10

3.1 STATIONARY

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics
Electrical Circuit (cir)	physics
Electrical Circuit 2 (cir2)	physics
Electrical Circuit 3 (cir3)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

3.2 TIME DEPENDENT

Times	Unit
range(0,0.001,0.035)	s

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

STUDY SETTINGS

Description	Value
Times	{0, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009000000000000001, 0.01, 0.011, 0.012, 0.013000000000000001, 0.014, 0.015, 0.016, 0.017, 0.018000000000000002, 0.019, 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024, 0.025, 0.026000000000000002, 0.027, 0.028, 0.029, 0.03, 0.031, 0.032, 0.033, 0.034, 0.035}

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics
Electrical Circuit (cir)	physics
Electrical Circuit 2 (cir2)	physics
Electrical Circuit 3 (cir3)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

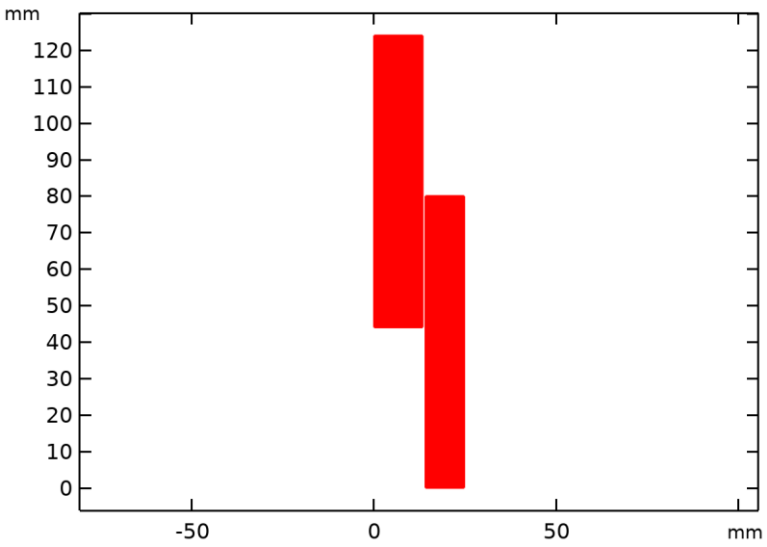
4 Results

4.1 DATA SETS

4.1.1 Solution 1

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

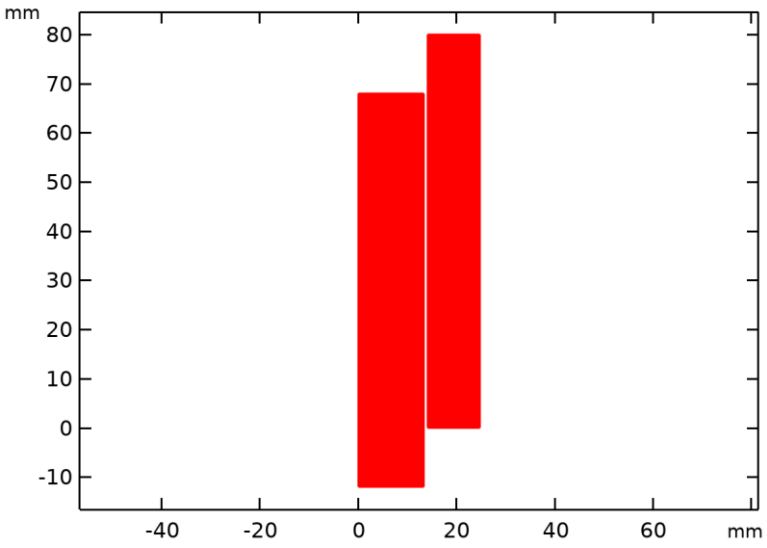


Dataset: Solution 1

4.1.2 Solution 2

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solution Store 1
Component	Save Point Geometry 1



Dataset: Solution 2

4.1.3 Revolution 2D 1

DATA

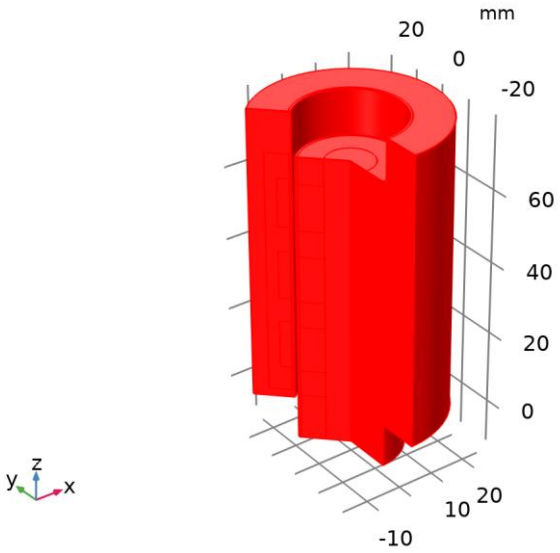
Description	Value
Dataset	Solution 2

AXIS DATA

Description	Value
Axis entry method	Two points
Points	{{0, 0}, {0, 1}}

REVOLUTION LAYERS

Description	Value
Start angle	-90
Revolution angle	225



Dataset: Revolution 2D 1

4.1.4 Solution 1.2

SELECTION

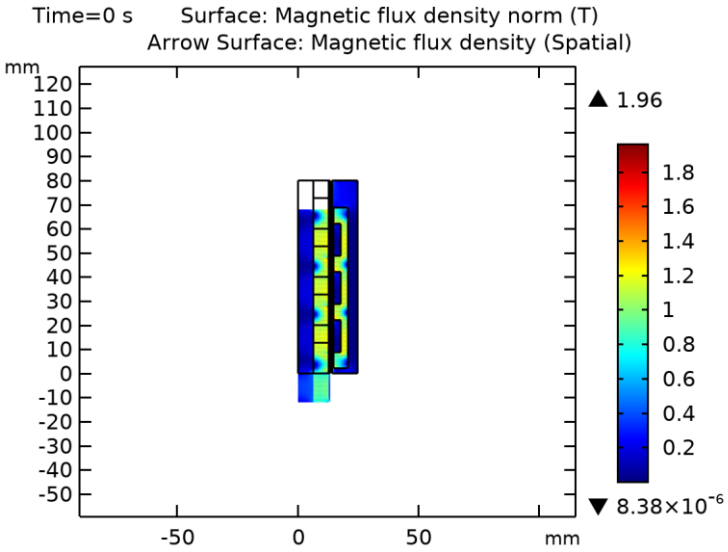
Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: No domains

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

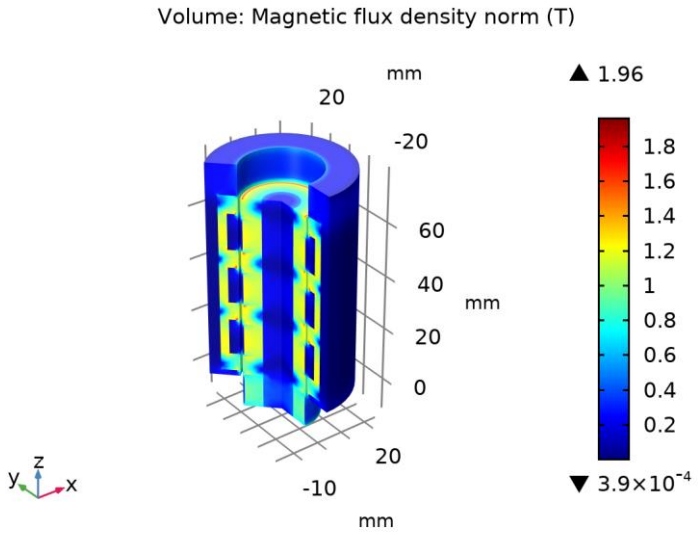
4.2 PLOT GROUPS

4.2.1 Magnetic Flux Density Norm (mf)



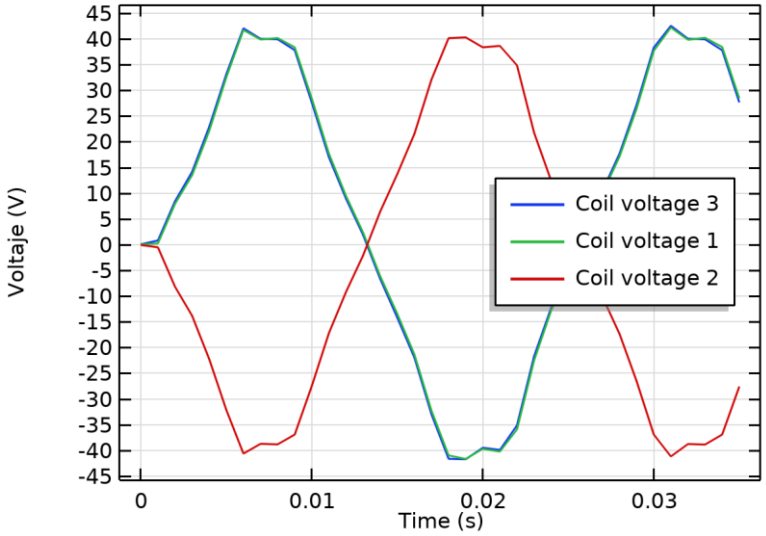
Surface: Magnetic flux density norm (T) Arrow Surface: Magnetic flux density (Spatial)

4.2.2 Magnetic Flux Density Norm 3D

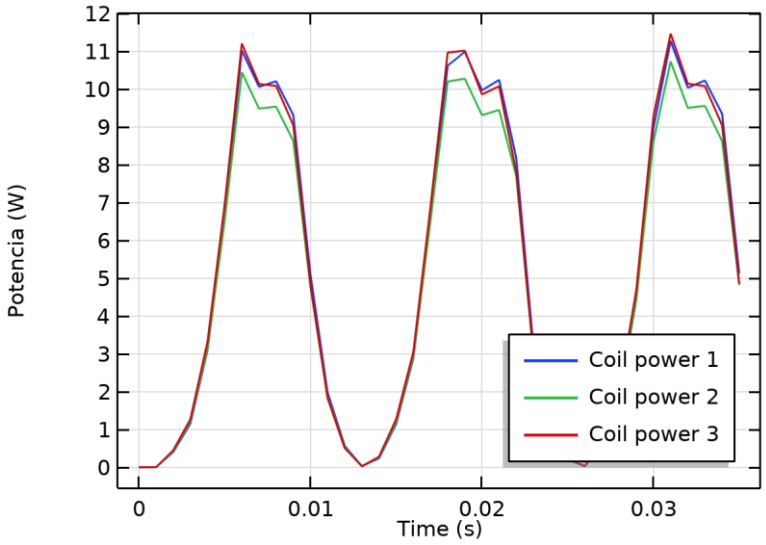


Volume: Magnetic flux density norm (T)

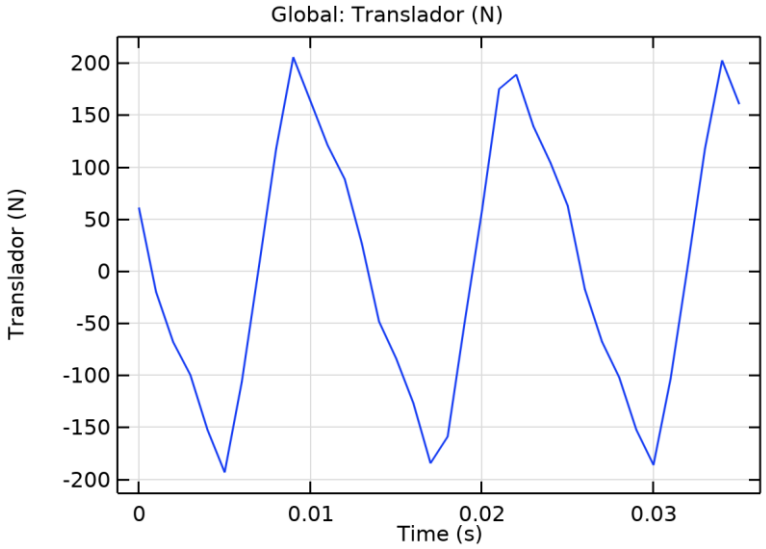
4.2.3 Induced Voltage



4.2.4 1D Plot Group 5

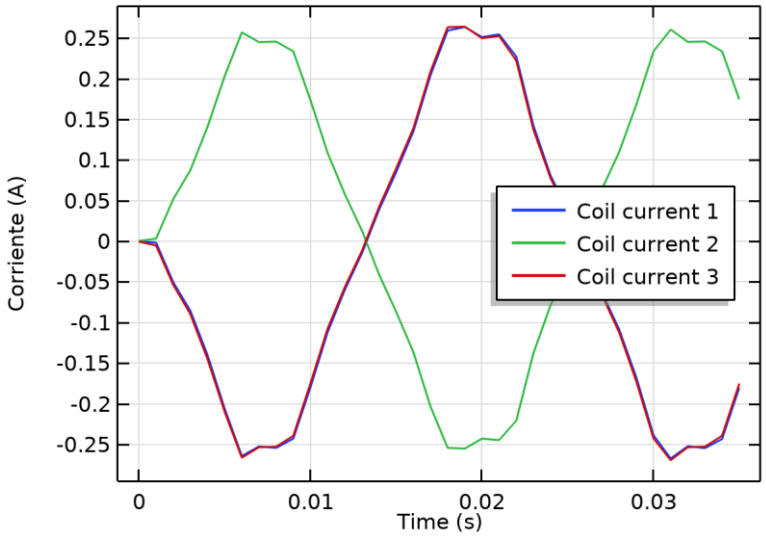


4.2.5 1D Plot Group 6



Global: Translador (N)

4.2.6 1D Plot Group 7



Tubular generator

Report date

Aug 20, 2021 8:20:38 PM

Contents

1. Global Definitions 3

1.1. Parameters 3

2. Component 1 4

2.1. Definitions 4

2.2. Geometry 1 6

2.3. Materials 6

2.4. Magnetic Fields 8

2.5. Moving Mesh 11

2.6. Mesh 1 11

3. Study 1 12

3.1. Stationary 12

3.2. Time Dependent 12

4. Results 14

4.1. Data Sets 14

4.2. Tables 16

4.3. Plot Groups 17

1 Global Definitions

Date	Jun 11, 2021 6:11:45 PM

GLOBAL SETTINGS

Name	Topologia4 6 3.mph
Path	C:\Users\Manuel\Documents\0Generadorlineal\Topologias\V2\Topologia4_6_3.mph
Version	COMSOL Multiphysics 5.5 (Build: 292)

USED PRODUCTS

COMSOL Multiphysics
AC/DC Module

1.1 PARAMETERS

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
Mg_h	12.7[mm]	0.0127 m	Magnet Height
P_P	2*Mg_h + 2*Sl_ch	0.04 m	Pole pitch
Frequency	speed/P_P	25 1/s	Frequency of oscillation
B0	1.32[T]	1.32 T	Remanent magnetic flux density
t	0[s]	0 s	Time for stationary study

2 Component 1

SETTINGS

Description	Value
Avoid inverted elements by curving interior domain elements	Off

2.1 DEFINITIONS

2.1.1 Selections

Iron

Selection type
Explicit

Selection
Domains 3, 5, 7, 9–10, 13

Explicit 1

Selection type
Explicit

Selection
No boundaries

Explicit 2

Selection type
Explicit

Selection
No boundaries

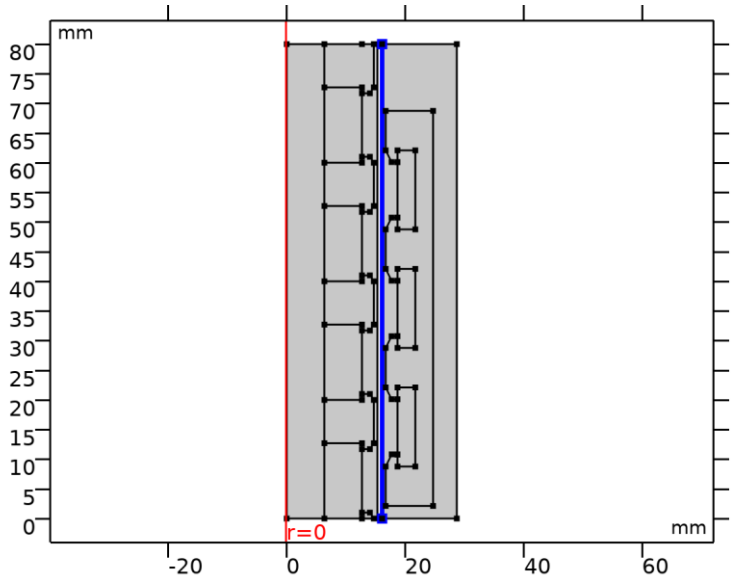
2.1.2 Nonlocal Couplings

General Extrusion 1

Coupling type	General extrusion
Operator name	genext1

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Geometry geom1: Dimension 1: Boundary 58



Selection

2.1.3 Coordinate Systems

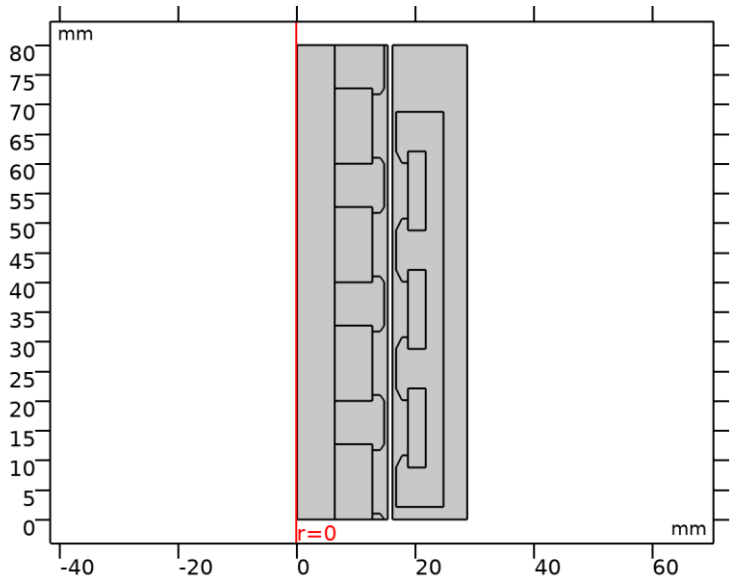
Boundary System 1

Coordinate system type	Boundary system
Tag	sys1

COORDINATE NAMES

First	Second	Third
t1	to	n

2.2 GEOMETRY 1



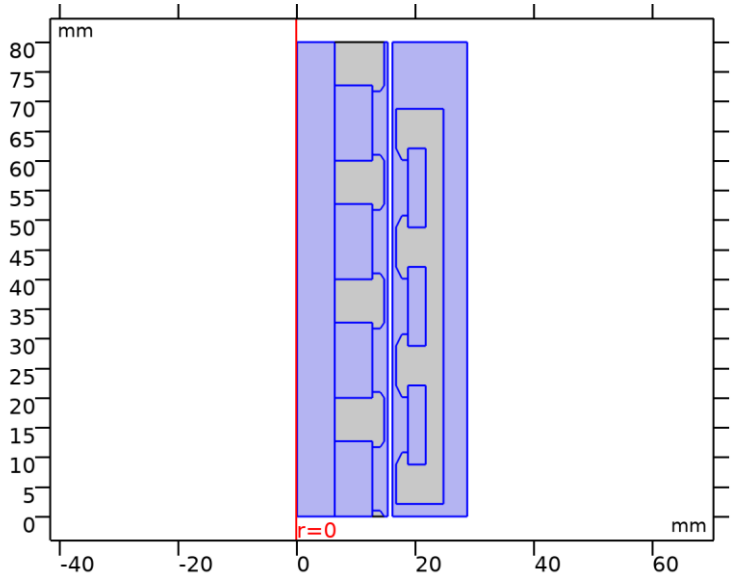
Geometry 1

UNITS

Length unit	mm
Angular unit	deg

2.3 MATERIALS

2.3.1 Air

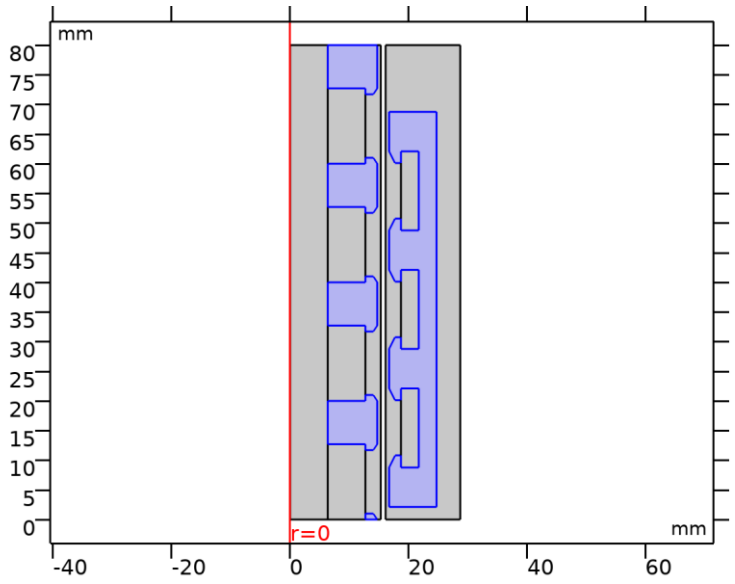


Air

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 1–2, 4, 6, 8, 11–12, 14–16

2.3.2 Soft Iron (without losses)

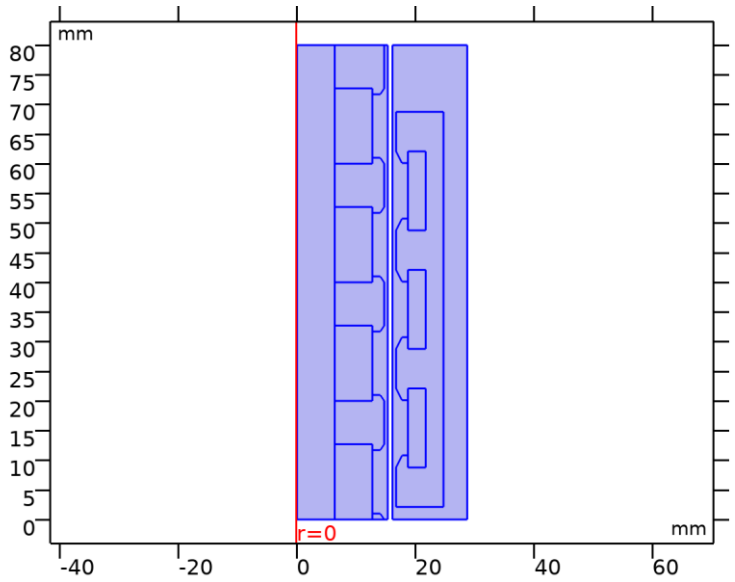


Soft Iron (without losses)

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 3, 5, 7, 9–10, 13

2.4 MAGNETIC FIELDS



Magnetic Fields

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$$

FEATURES

Ampère's Law 1
Axial Symmetry 1
Magnetic Insulation 1
Initial Values 1
Ampère's Law 2
Multi-Turn Coil 1
Multi-Turn Coil 2
Multi-Turn Coil 3
Ampère's Law 3
Ampère's Law 4
Periodic Condition 1
Periodic Condition 2
Magnetic Potential 1
Perfect Magnetic Conductor 1

2.4.1 Ampère's Law 1

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.2 Magnetic Insulation 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$$

2.4.3 Ampère's Law 2

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.4 Multi-Turn Coil 1

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{N I_{coil}}{A} \mathbf{e}_{coil}$$

2.4.5 Multi-Turn Coil 2

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{N I_{coil}}{A} \mathbf{e}_{coil}$$

2.4.6 Multi-Turn Coil 3

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{N I_{coil}}{A} \mathbf{e}_{coil}$$

2.4.7 Ampère's Law 3

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.8 Ampère's Law 4

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.9 Periodic Condition 1

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{dst} = \mathbf{A}_{src}$$

2.4.10 Periodic Condition 2

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{dst} = \mathbf{A}_{src}$$

2.4.11 Magnetic Potential 1

EQUATIONS

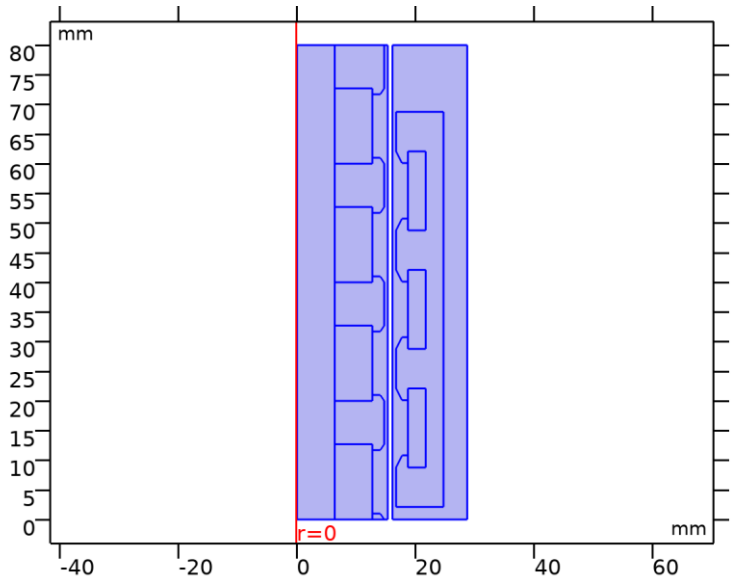
$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0$$

2.4.12 Perfect Magnetic Conductor 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$$

2.5 MOVING MESH

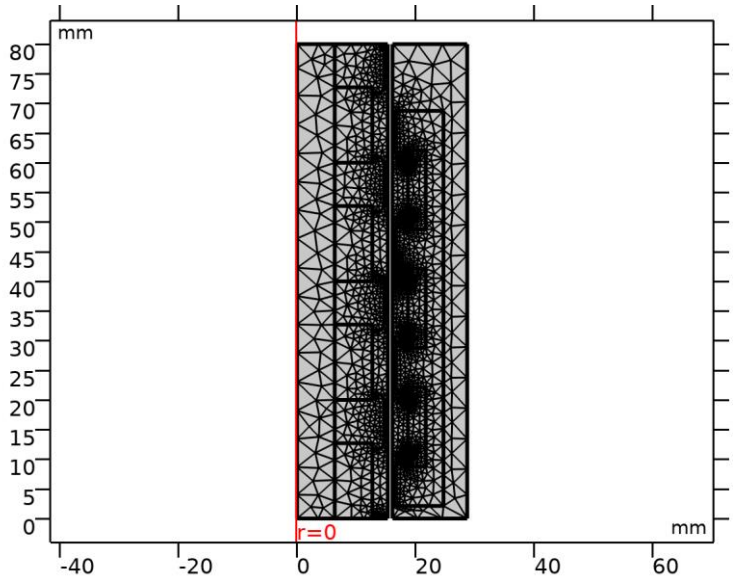


Moving Mesh

FEATURES

Fixed Mesh 1
Prescribed Mesh Displacement 1
Prescribed Deformation 1

2.6 MESH 1



Mesh 1

3 Study 1

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	1 min 11 s
CPU	Intel64 Family 6 Model 61 Stepping 4, 2 cores
Operating system	Windows 10

3.1 STATIONARY

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

3.2 TIME DEPENDENT

Times	Unit
range(0,0.001,0.035)	s

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

STUDY SETTINGS

Description	Value
Times	{0, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009000000000000001, 0.01, 0.011, 0.012, 0.013000000000000001, 0.014, 0.015, 0.016, 0.017, 0.018000000000000002, 0.019, 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024, 0.025, 0.026000000000000002, 0.027, 0.028, 0.029, 0.03, 0.031, 0.032, 0.033, 0.034, 0.035}

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

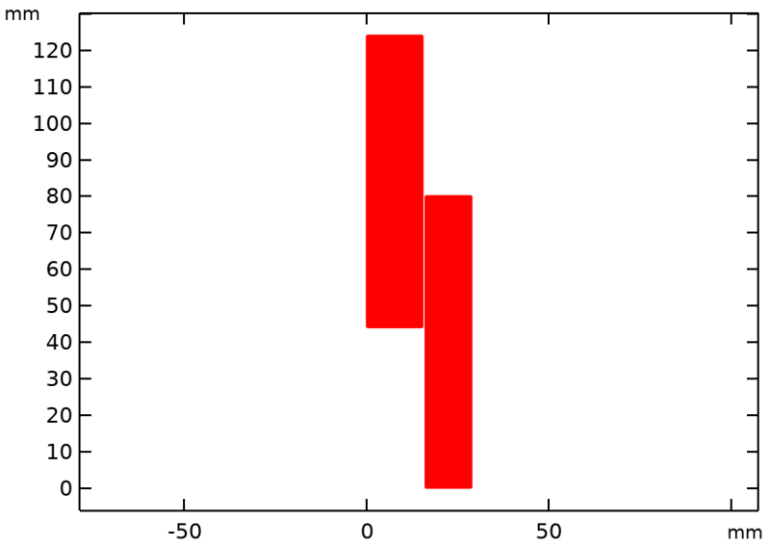
4 Results

4.1 DATA SETS

4.1.1 Solution 1

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

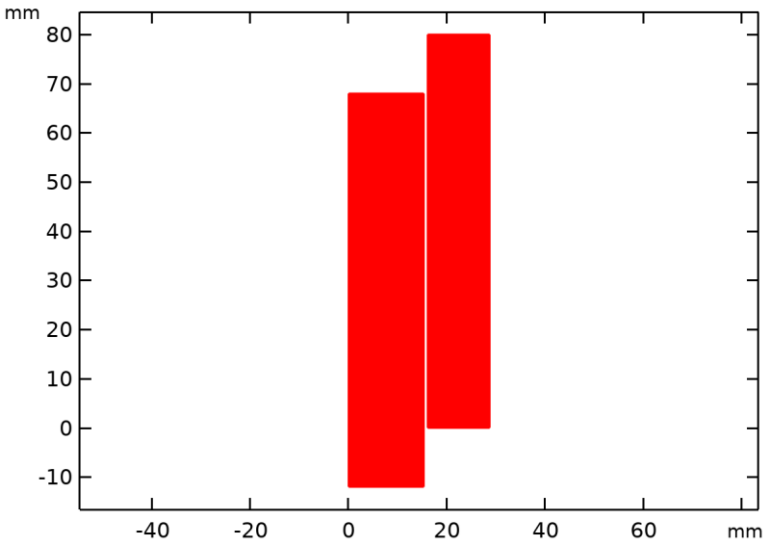


Dataset: Solution 1

4.1.2 Solution 2

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solution Store 1
Component	Save Point Geometry 1



Dataset: Solution 2

4.1.3 Revolution 2D 1

DATA

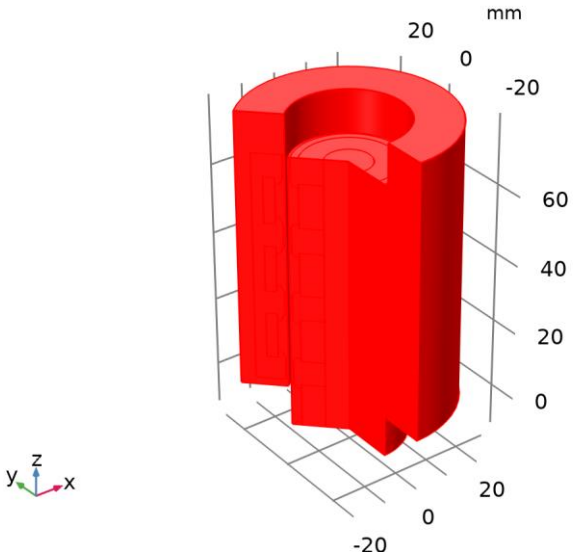
Description	Value
Dataset	Solution 2

AXIS DATA

Description	Value
Axis entry method	Two points
Points	{{0, 0}, {0, 1}}

REVOLUTION LAYERS

Description	Value
Start angle	-90
Revolution angle	225



Dataset: Revolution 2D 1

4.1.4 Solution 1.2

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: No domains

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

4.2 TABLES

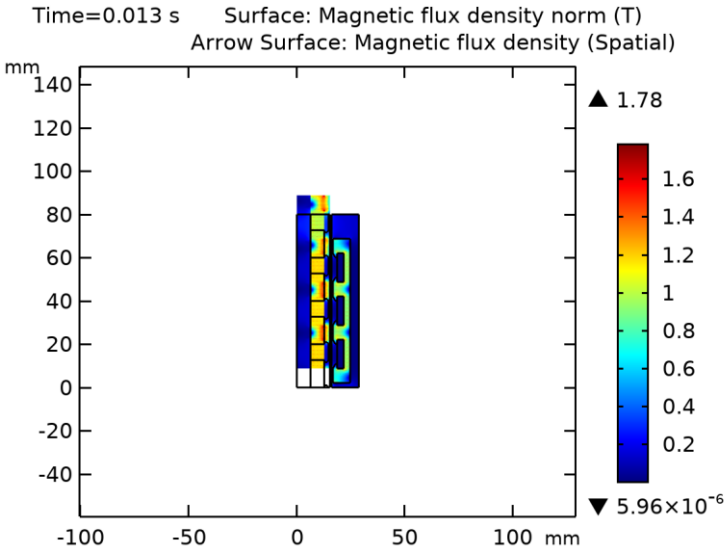
4.2.1 Evaluation 2D

Interactive 2D values

x	y	Value
17.180	27.661	0.91427
23.515	38.047	0.59311
10.575	28.828	1.2148

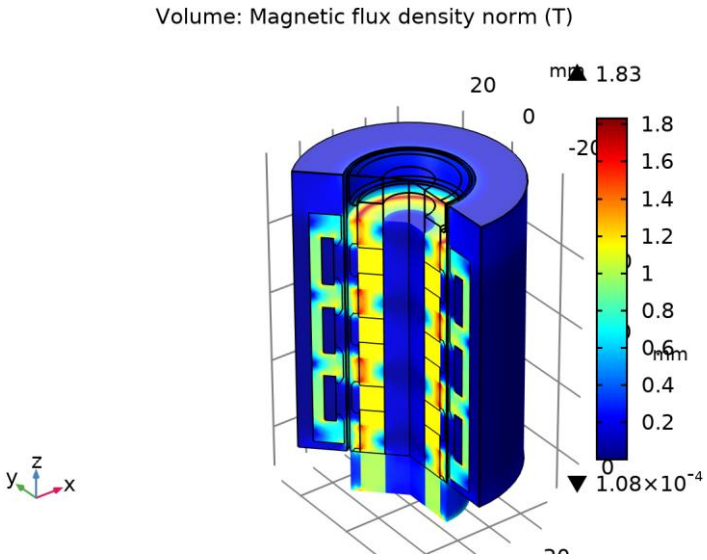
4.3 PLOT GROUPS

4.3.1 Magnetic Flux Density Norm (mf)



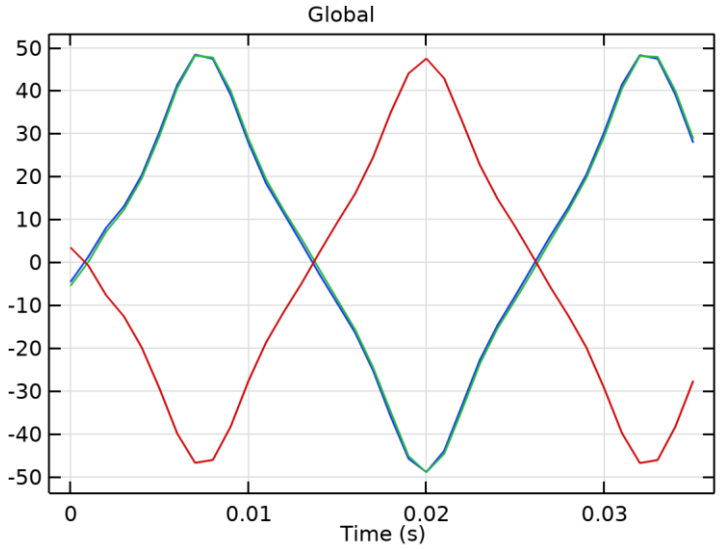
Surface: Magnetic flux density norm (T) Arrow Surface: Magnetic flux density (Spatial)

4.3.2 Magnetic Flux Density Norm 3D



Volume: Magnetic flux density norm (T)

4.3.3 Induced Voltage



Global

Tubular generator

Report date

Aug 20, 2021 8:16:34 PM

Contents

1. Global Definitions 3

1.1. Parameters 3

2. Component 1 4

2.1. Definitions 4

2.2. Geometry 1 6

2.3. Materials 6

2.4. Magnetic Fields 8

2.5. Moving Mesh 11

2.6. Electrical Circuit 11

2.7. Electrical Circuit 2 11

2.8. Electrical Circuit 3 11

2.9. Mesh 1 12

3. Study 1 13

3.1. Stationary 13

3.2. Time Dependent 13

4. Results 15

4.1. Data Sets 15

4.2. Tables 17

4.3. Plot Groups 18

1 Global Definitions

Date	Jul 13, 2021 1:44:44 AM

GLOBAL SETTINGS

Name	Topologia4 6 3C.mph
Path	C:\Users\Manuel\Documents\0Generadorlineal\Topologias\V2\Topologia4_6_3C.mph
Version	COMSOL Multiphysics 5.5 (Build: 292)

USED PRODUCTS

COMSOL Multiphysics
AC/DC Module

1.1 PARAMETERS

PARAMETERS 1

Name	Expression	Value	Description
Mg_h	12.7[mm]	0.0127 m	Magnet Height
P_P	2*Mg_h + 2*Sl_ch	0.04 m	Pole pitch
Frequency	speed/P_P	25 1/s	Frequency of oscillation
B0	1.32[T]	1.32 T	Remanent magnetic flux density
t	0[s]	0 s	Time for stationary study

2 Component 1

SETTINGS

Description	Value
Avoid inverted elements by curving interior domain elements	Off

2.1 DEFINITIONS

2.1.1 Selections

Iron

Selection type
Explicit

Selection
Domains 3, 5, 7, 9–10, 13

Explicit 1

Selection type
Explicit

Selection
No boundaries

Explicit 2

Selection type
Explicit

Selection
No boundaries

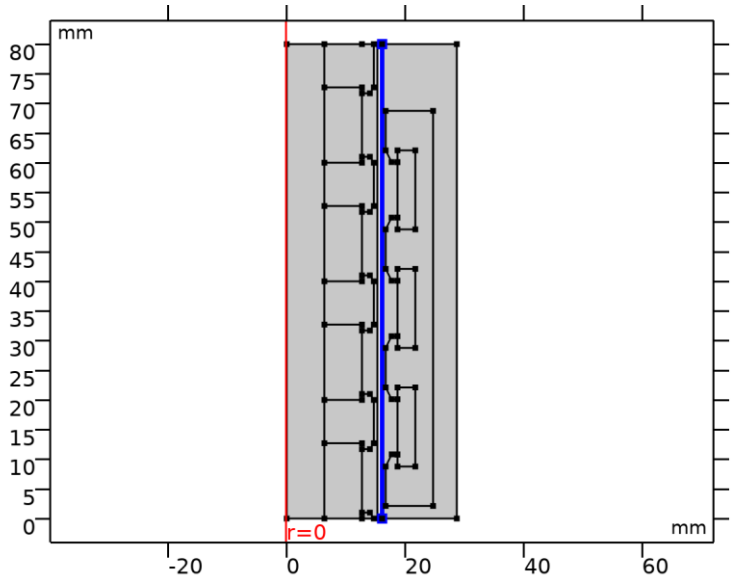
2.1.2 Nonlocal Couplings

General Extrusion 1

Coupling type	General extrusion
Operator name	genext1

SELECTION

Geometric entity level	Boundary
Selection	Geometry geom1: Dimension 1: Boundary 58



Selection

2.1.3 Coordinate Systems

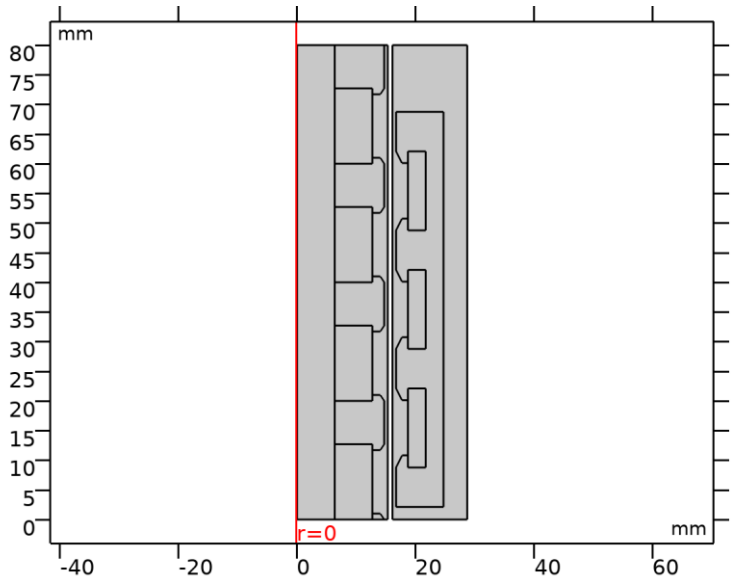
Boundary System 1

Coordinate system type	Boundary system
Tag	sys1

COORDINATE NAMES

First	Second	Third
t1	to	n

2.2 GEOMETRY 1



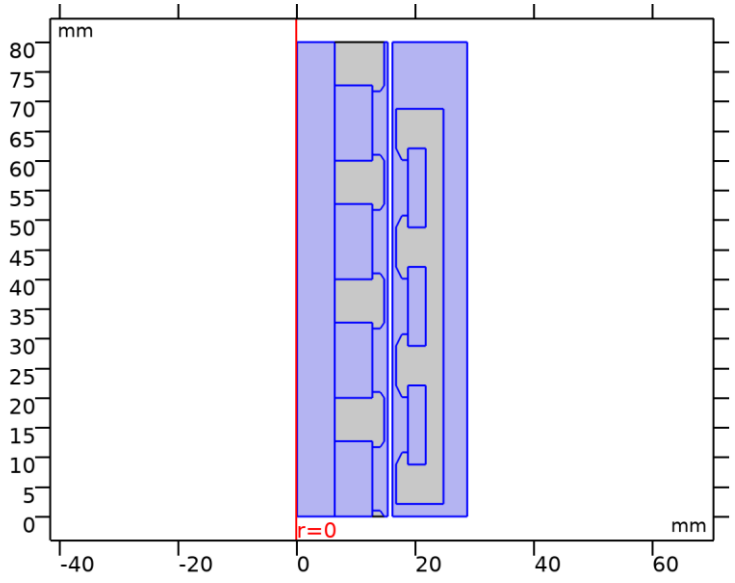
Geometry 1

UNITS

Length unit	mm
Angular unit	deg

2.3 MATERIALS

2.3.1 Air

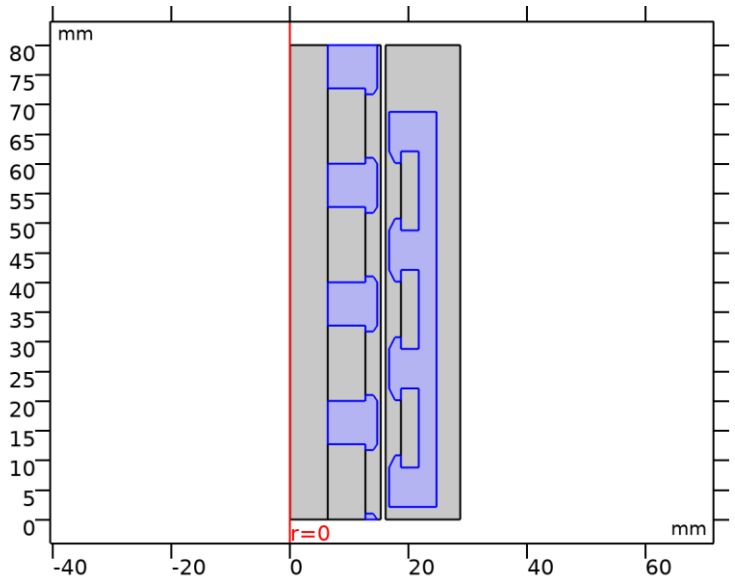


Air

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 1–2, 4, 6, 8, 11–12, 14–16

2.3.2 Soft Iron (without losses)

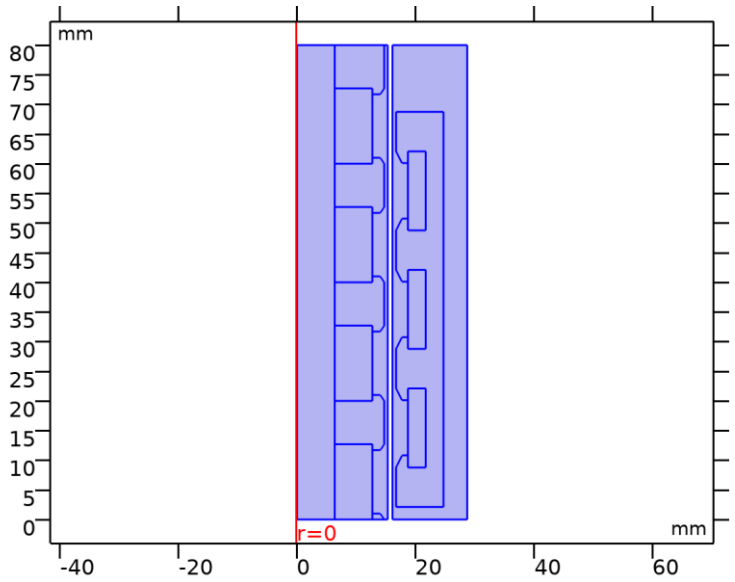


Soft Iron (without losses)

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: Domains 3, 5, 7, 9–10, 13

2.4 MAGNETIC FIELDS



Magnetic Fields

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e$$

FEATURES

Ampère's Law 1
Axial Symmetry 1
Magnetic Insulation 1
Initial Values 1
Ampère's Law 2
Multi-Turn Coil 1
Multi-Turn Coil 2
Multi-Turn Coil 3
Ampère's Law 3
Ampère's Law 4
Periodic Condition 1
Periodic Condition 2
Magnetic Potential 1
Perfect Magnetic Conductor 1

2.4.1 Ampère's Law 1

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.2 Magnetic Insulation 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$$

2.4.3 Ampère's Law 2

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.4 Multi-Turn Coil 1

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{cir}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.5 Multi-Turn Coil 2

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{cir}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.6 Multi-Turn Coil 3

EQUATIONS

$$\mathbf{J}_e = \frac{NI_{cir}}{A}\mathbf{e}_{coil}$$

2.4.7 Ampère's Law 3

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.8 Ampère's Law 4

EQUATIONS

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$
$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

2.4.9 Periodic Condition 1

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{dst} = \mathbf{A}_{src}$$

2.4.10 Periodic Condition 2

EQUATIONS

$$\mathbf{A}_{dst} = \mathbf{A}_{src}$$

2.4.11 Magnetic Potential 1

EQUATIONS

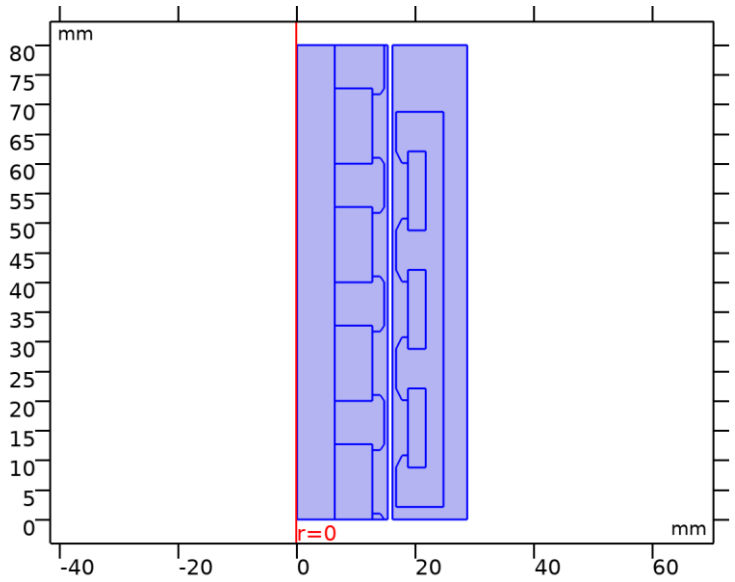
$$\mathbf{n} \times \mathbf{A} = \mathbf{n} \times \mathbf{A}_0$$

2.4.12 Perfect Magnetic Conductor 1

EQUATIONS

$$\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$$

2.5 MOVING MESH



Moving Mesh

FEATURES

Fixed Mesh 1
Prescribed Mesh Displacement 1
Prescribed Deformation 1

2.6 ELECTRICAL CIRCUIT

EQUATIONS

FEATURES

Ground Node 1
Resistor R1
External I vs. U 1

2.7 ELECTRICAL CIRCUIT 2

EQUATIONS

FEATURES

Ground Node 1
Resistor R1
External I vs. U 1

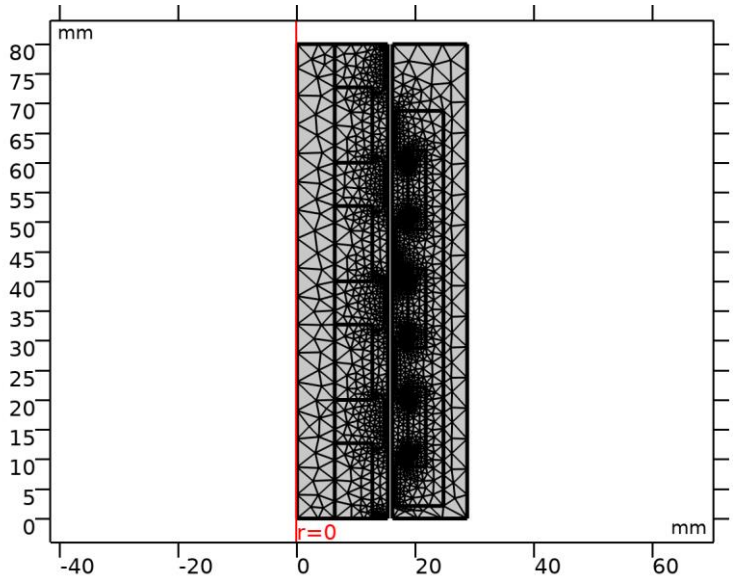
2.8 ELECTRICAL CIRCUIT 3

EQUATIONS

FEATURES

Ground Node 1
Resistor R1
External I vs. U 1

2.9 MESH 1



Mesh 1

3 Study 1

COMPUTATION INFORMATION

Computation time	1 min 19 s
CPU	Intel64 Family 6 Model 61 Stepping 4, 2 cores
Operating system	Windows 10

3.1 STATIONARY

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics
Electrical Circuit (cir)	physics
Electrical Circuit 2 (cir2)	physics
Electrical Circuit 3 (cir3)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

3.2 TIME DEPENDENT

Times	Unit
range(0,0.001,0.035)	s

STUDY SETTINGS

Description	Value
Include geometric nonlinearity	Off

STUDY SETTINGS

Description	Value
Times	{0, 0.001, 0.002, 0.003, 0.004, 0.005, 0.006, 0.007, 0.008, 0.009000000000000001, 0.01, 0.011, 0.012, 0.013000000000000001, 0.014, 0.015, 0.016, 0.017, 0.018000000000000002, 0.019, 0.02, 0.021, 0.022, 0.023, 0.024, 0.025, 0.026000000000000002, 0.027, 0.028, 0.029, 0.03, 0.031, 0.032, 0.033, 0.034, 0.035}

PHYSICS AND VARIABLES SELECTION

Physics interface	Discretization
Magnetic Fields (mf)	physics
Moving Mesh (ale)	physics
Electrical Circuit (cir)	physics
Electrical Circuit 2 (cir2)	physics
Electrical Circuit 3 (cir3)	physics

MESH SELECTION

Geometry	Mesh
Geometry 1 (geom1)	mesh1

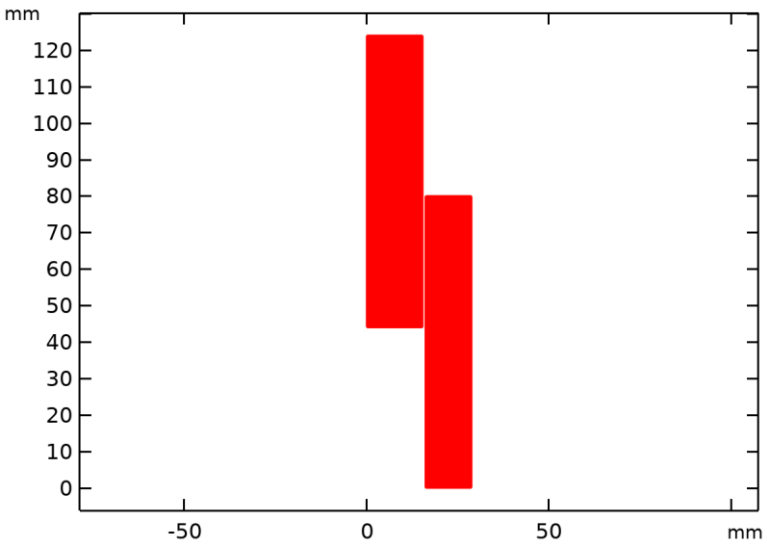
4 Results

4.1 DATA SETS

4.1.1 Solution 1

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

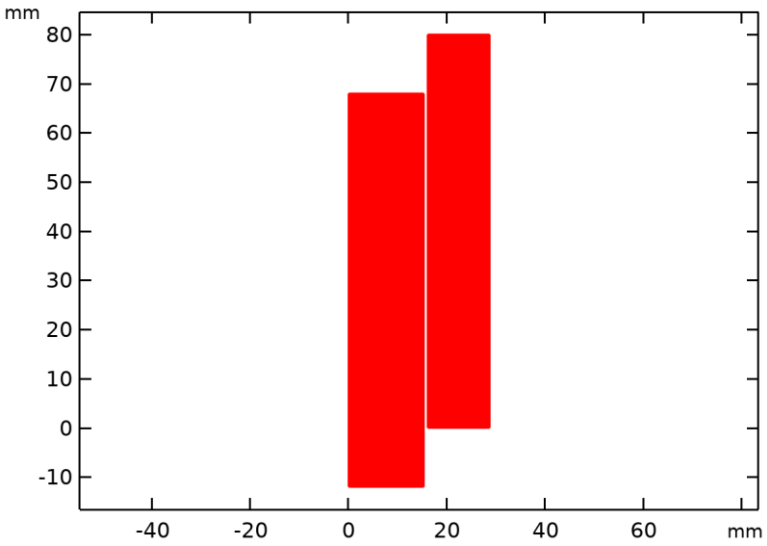


Dataset: Solution 1

4.1.2 Solution 2

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solution Store 1
Component	Save Point Geometry 1



Dataset: Solution 2

4.1.3 Revolution 2D 1

DATA

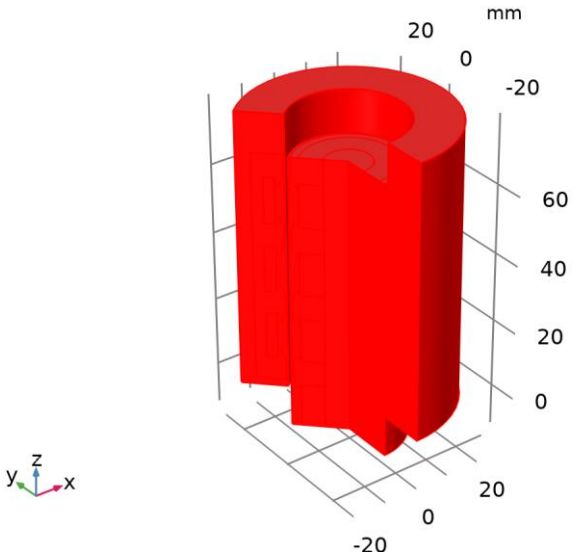
Description	Value
Dataset	Solution 2

AXIS DATA

Description	Value
Axis entry method	Two points
Points	{{0, 0}, {0, 1}}

REVOLUTION LAYERS

Description	Value
Start angle	-90
Revolution angle	225



Dataset: Revolution 2D 1

4.1.4 Solution 1.2

SELECTION

Geometric entity level	Domain
Selection	Geometry geom1: Dimension 2: No domains

SOLUTION

Description	Value
Solution	Solver 1
Component	Save Point Geometry 1

4.2 TABLES

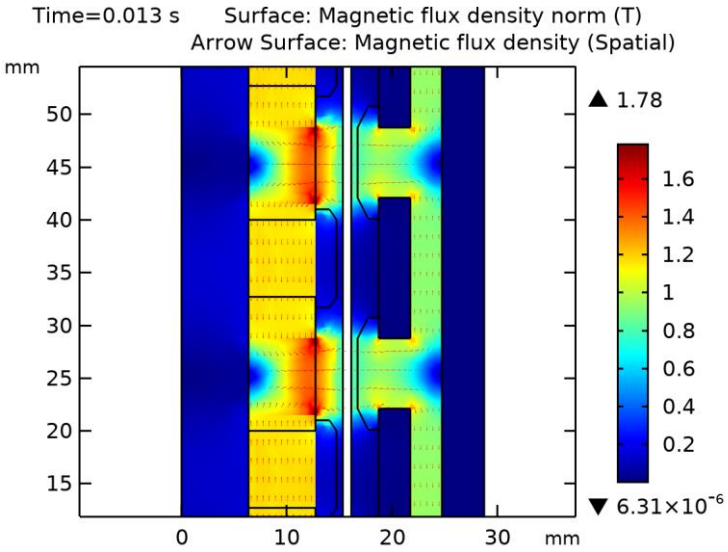
4.2.1 Evaluation 2D

Interactive 2D values

x	y	Value
17.180	27.661	0.91427
23.515	38.047	0.59311
10.575	28.828	1.2148

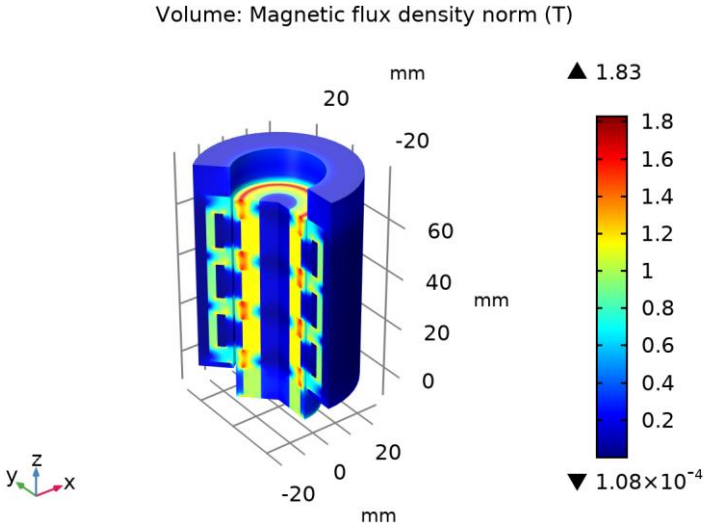
4.3 PLOT GROUPS

4.3.1 Magnetic Flux Density Norm (mf)



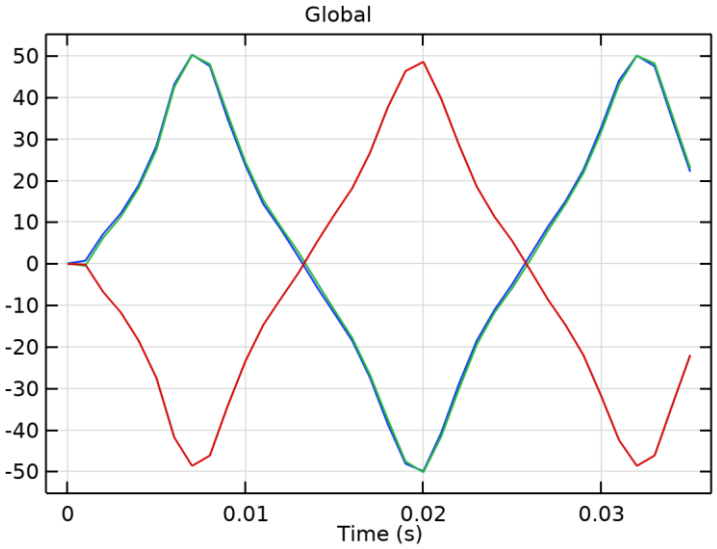
Surface: Magnetic flux density norm (T) Arrow Surface: Magnetic flux density (Spatial)

4.3.2 Magnetic Flux Density Norm 3D



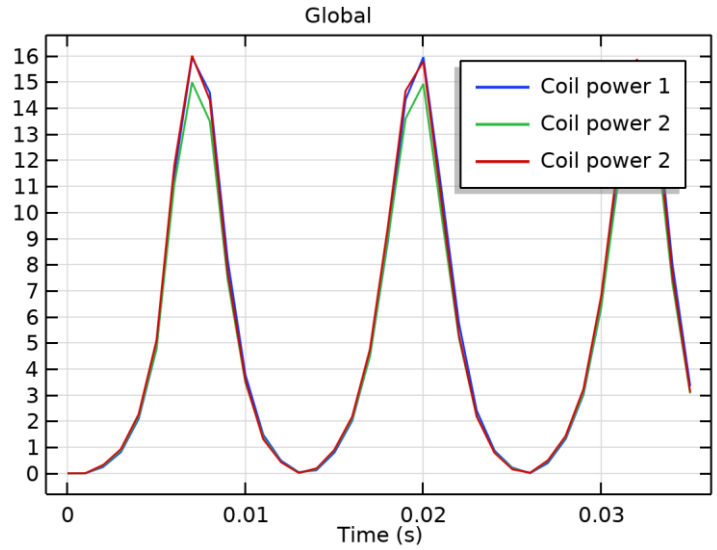
Volume: Magnetic flux density norm (T)

4.3.3 Induced Voltage



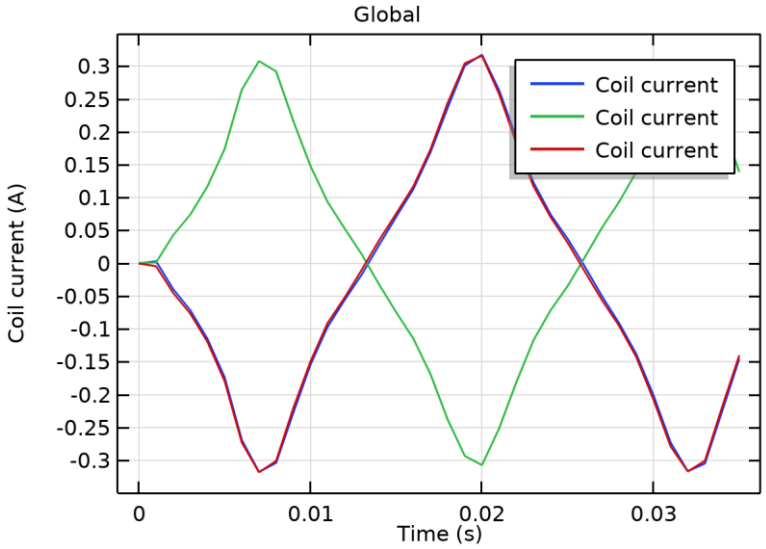
Global

4.3.4 Power



Global

4.3.5 Current



Global