UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

TESIS

ESTUDIOS ELECTROMAGNÉTICOS Y TÉRMICOS EN BOBINAS DE COBRE PARA SISTEMAS MAGNÉTICOS TOROIDALES

Por:

EMILIO CHAPA VILLARREAL

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

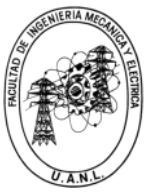
CON ORIENTACIÓN EN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

DICIEMBRE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIOS ELECTROMAGNÉTICOS Y TÉRMICOS
EN BOBINAS DE COBRE PARA
SISTEMAS MAGNÉTICOS TOROIDALES

POR

Emilio Chapa Villarreal, Fís.

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLES

DICIEMBRE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Estudios electromagnéticos y térmicos en bobinas de cobre para sistemas magnéticos toroidales", realizada por el estudiante Emilio Chapa Villarreal, con número de matrícula 1622700, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Max Salvador Hernández
Director

Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz
Co-Director

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Revisor

Dr. Héctor Daniel García Lara
Revisor

Dr. José Rubén Morones Ibarra
Revisor

Vo.Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4020

Ciudad Universitaria, a 07 de abril de 2022.

Antes disfrutaba ignorante el café
recién servido en mi taza una buena mañana,
ahora, gracias a mis profesores,
analizo la transferencia de calor
en sus átomos hasta vaciar la taza.

Dedicado a mi pareja: Christian Angelica Reyes Estrada, a mi familia, amigos y todo aquel que brindó su apoyo.

Índice general

Resumen **1**

1. Introducción **3**

1.1. Hipótesis en la presente tesis . . . 3

1.2. Objetivos . . . 3

1.2.1. Objetivo general . . . 3

1.2.2. Objetivos específicos . . . 3

1.3. Planteamiento de la tesis . . . 4

1.4. Motivación . . . 5

1.5. Antecedentes . . . 6

1.6. Reproduciendo la energía de las estrellas . . . 7

1.7. Fusión por confinamiento magnético: Tokamak . . . 9

1.8. Tokamak de Baja Razon de Aspecto "T" . . . 12

1.8.1. Métodos que se emplean para el calentamiento del plasma . . . 12

1.8.2. Características tecnológicas en el Tokamak . . . 14

1.9. ITER . . . 15

1.10. Elementos de los sistemas electromagnéticos: Tokamak "T" . . . 20

1.11. Generalidades sobre los campos magnéticos: Tokamak en el confinamiento . . . 20

2. Sistema Toroidal **26**

2.1. El Sistema Magnético Toroidal . . . 27

2.1.1. Ripple y dispersión poloidal 32
2.1.2. Embobinado 33
2.2. Mecanismos de transferencia de calor 34
2.2.1. Conducción 34
2.2.2. Convección 36
2.2.3. Radiación 36
2.2.4. Generación de calor 37
2.2.5. Consideraciones para el conductor de cobre de las bobinas 37
2.2.6. Perfil "D-shaped" de la bobina 41
2.3. Aspecto electromagnético 44
2.4. Efecto Joule en un conductor "D-shaped" aislado térmicamente 46
2.5. Enfriamiento de las bobinas 48

3. Resultados **53**

3.1. Estudio electromagnético de las bobinas "D-shaped" 54
3.1.1. Resultados del estudio en un conductor aislado 59
3.2. Estudio de enfriamiento sobre las bobinas "D-shaped" 61
3.2.1. Un conductor en la bobina toroidal 63
3.2.2. 8 conductores en la bobina toroidal 65
3.2.3. 16 conductores en la bobina toroidal 67
3.2.4. 24 conductores en la bobina toroidal 70

Bibliografía **83**

Índice de figuras

1.1. Diagramas esquemáticos de Fisión y Fusión 7

1.2. El sol, las reacciones termonucleares se realizan en el interior de la estrella debido a la inmensa gravedad que confina al combustible nuclear. 8

1.3. El sol, el reactor termonuclear con mayor tiempo de operación en nuestro sistema. 8

1.4. Plasmas diversos tipos, diferentes temperaturas y diferentes densidades 9

1.5. Esquema del ciclo de conversión de energía en Fusión 10

1.6. Diferentes configuraciones magnéticas: a la izquierda **Tokamak**, al centro *stellarator*, a la derecha **Esfero Tokamak ó Tokamak Esférico** 10

1.7. Vista de la cámara de reacción del Joint European Torus (JET), en el Centro de Ciencias de Culham, Inglaterra, el JET es una instalación experimental de fusión por confinamiento magnético *Tokamak*, en dicho dispositivo de fusión, se demostró por primera vez una ganancia de energía (Q) con un factor de 0.15, en 1991. 11

1.8. Ignición, el mayor objetivo de la investigación de la fusión nuclear, se aprecian los diferentes nombres de los dispositivos de confinamiento magnético comparándose entre sí, según el criterio de Lawson ($n\ \tau$) y la temperatura, así como también las fechas en las que se han generado estos datos. 13

1.9. Esquema del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional**,(**ITER**) con un costo estimado de 15 000 millones de euro, se desarrolla del primer reactor que aplique a la fusión termonuclear controlada, un reto científico-tecnológico que promete impactar en la sociedad del siglo XXI al tener en explotación una fuente de energía limpia, económica, segura, potente y abundante. *Foto, cortesía ITER* 16

1.10. Esquema del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional**,(**ITER**), en la imagen se aprecia la columna de plasma dentro del reactor. *Foto, cortesía ITER* 17

1.11. Esquema del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional**,(**ITER**), en la imagen se aprecia el corte transversal del reactor, en color naranja se aprecia la cámara de vacío, en gris al centro el solenoide central, en azul las bobinas toroidales. *Foto, cortesía ITER* . . 17

1.12. Campo magnético toroidal, se aprecia que es una curva, el campo que interesa siempre estará al centro en el Radio Menor de la cámara. 21

1.13. Esquema de la distribución de las bobinas toroidales de un Tokamak 22

1.14. Configuraciones axisimétricas, entre ellas destacan los Toroides Esféricos, los Esferomaks y los Tokamaks, se aprecian los valores de: **Razón de Aspecto "A"**, **Factor de Seguridad "q"** y de β. 24

2.1. Traslape matemático de elementos conduciendo corriente de tensión constante, generado por "n" bobinas discretas. FileA, FileB, Raeder76 29

2.2. Fuerzas actuando sobre una bobina, [Dolan00] 30

2.3. Campo magnético de las diferentes bobinas d-shaped desarrolladas para el JET del Centro de Ciencias de Culham (izquierda) y SNUT-79 de Corea (derecha). 31

2.4. Las gráficas izquierda y derecha, corresponden a los estudios realizados con la Ec.2.9, siendo la gráfica izquierda determinada para el HL-2M Tokamak [Yongxing] y la segunda muestra el resultado de un código, para material superconductor en una bobina *D-shaped*, llamado SCONE [Utoh10]. 32

2.5. Bobinas ejemplos señadala como a) Sección de conductor hueco, b) Tapa de cinta, c) Disco, [Dolan00] 33
2.6. Variación de la conductividad térmica para diversos sólidos, gases y líquidos con la temperatura. 35
2.7. Gráfica de el tiempo de corto circuito, tiempo y área del conductor 38
2.8. Gráfica de tiempos de corto circuito 40
2.9. Metodología para la D-shaped 41
2.10. Perfiles D-shaped 42
2.11. a) 1 conductor y b) 24 conductores en una bobina 'D-shaped' 42
2.12. a) 1 bobina 'D-shaped', b) configuración final del arreglo toroidal del Tokamak "T" . 43
2.13. Plano en la bobina toroidal. 45
2.14. Dirección del paso de la corrriente 45
2.15. a) Mallado en el volumen completo, b) mallado en el arreglo toroidal 46
2.16. a) bloque para corte del perfil, b) dirección de la corriente 47
2.17. N-conductores en una bobina con corte transversal 49

3.1. Simulación electromagnética del arreglo toroidal horizontal en el Tokamak de Baja Razón de Aspecto "T" 54
3.2. Simulación electromagnética del arreglo toroidal en el Tokamak de Baja Razón de Aspecto "T" 55
3.3. Distribución del campo magnético en el sistema de bobinas toroidales del Tokamak de Baja Razón de Aspecto "T" 56
3.4. Línea para evaluar el campo magnético perpendicular 56
3.5. Campo magnético vs. distancia radial en la constitución de la cámara de vacío del Tokamak "T" Grupo de Investigación en Fusión FIME-UANL 57
3.6. Ripple en el sistema toroidal de la cofiguración de 12 bobinas toroidales en el Tokamak de Baja Razón de Aspecto "T" 58

3.7. Temperaturas en el conductor a 0.2 y 0.3 segundos, siguiendo la geometría “D-shaped” 59
3.8. Temperaturas máximas en los rangos de operación de corto circuito 60
3.9. Sección transversal del ducto establecido para un conductor 64
3.10. El coeficiente de convección para 1 conductor en la bobina para distintas velocidades. 64
3.11. La potencia de la bomba para 1 conductor en la bobina 64
3.12. Sección transversal del ducto establecido para 8×1 conductores 65
3.13. Sección transversal del ducto establecido para 4x2 conductores 66
3.14. El coeficiente de convección para los arreglo de 8 conductores en la bobina para distintas velocidades. 66
3.15. La potencia de la bomba para 8 conductores en la bobina 67
3.16. Sección transversal del ducto establecido para 16×1 conductores 67
3.17. Sección transversal del ducto establecido para 8×2 conductores 68
3.18. Sección transversal del ducto establecido para 4×4 conductores 69
3.19. El coeficiente de convección para los arreglo de 16 conductores en la bobina para distintas velocidades. 69
3.20. La potencia de la bomba para 16 conductores en la bobina 70
3.21. Sección transversal del ducto establecido para 24×1 conductores 70
3.22. Sección transversal del ducto establecido para 12×2 conductores 71
3.23. Sección transversal del ducto establecido para 8×3 conductores 71
3.24. Sección transversal del ducto establecido para 6×4 conductores 72
3.25. El coeficiente de convección para los arreglo de 24 conductores en la bobina para distintas velocidades. 72
3.26. La potencia de la bomba para 24 conductores en la bobina 73
3.27. Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 1 conductor en el proceso transitorio 74
3.28. Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 8 conductores en el proceso transitorio 74

3.29. Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 16 conductores en el proceso transitorio 75
3.30. Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 24 conductores en el proceso transitorio 75
3.31. Potencia de bomba necesaria para los arreglos de 1, 8, 16 y 24 conductores 76
3.32. Coeficiente de convección (h) para cada arreglo de conductores 76
3.33. El Número de Reynolds en el fluido y su relación con las temperaturas máximas en los conductores al final del proceso transitorio (0.7 s) para las distintas velocidades. . 77
3.34. Las temperaturas máximas en las distintas cantidades de conductores para cada velocidad en el proceso transitorio 78

Índice de tablas

1.1. Tokamaks, se menciona: R, como el Radio mayor del plasma; a, Radio menor; I_P, Corriente del plasma; B_T, Campo toroidal; τ_{pulso}, Tiempo de confinamiento 15

1.2. Características nominales del **ITER**, la fase de diseño ha concluido con éxito, sigue la fase de su construcción en Cadarache, Francia. 19

1.3. Valores aproximados de I_T, B_T y R (Radio Mayor); I_P (Corriente del plasma); B_T, (Campo toroidal). 22

2.1. Parámetros geométricos del Tokamak "T" 43

2.2. Parámetros simulación de un conductor aislado 48

3.1. Densidad de flujo magnético en ciertos puntos de interés 57

3.2. Densidad de la disipación de potencia eléctrica en el tiempo de simulación 61

3.3. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para 1 conductor. 63

3.4. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 8×1 conductores. . 65

3.5. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 4×2 conductores. . 66

3.6. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 1×16 conductores. 68

3.7. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 2×8 conductores. . 68

3.8. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 4×4 conductores. . 69

3.9. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 1×24 conductores. 70

3.10. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 2×12 conductores. 71

3.11. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 3×8 conductores. . 71

3.12. Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 4×6 conductores. . 72

Resumen

Emilio Chapa Villarreal, Fis.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovables

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Título del estudio: Estudios electromagnéticos y térmicos de bobinas de cobre para sistemas magnéticos toroidales.

Número de páginas: 100

OBJETIVO Y MÉTODO DE ESTUDIO:

La presente tesis entonces tiene como objetivo, participar en el desarrollo del confinamiento magnético a través del desarrollo de un sitema magnético toroidal. Desarrollar la comprensión del comportamiento del refrigerante sobre el sistema magnético, determinando sus características (diámetro hidráulico, caudal de refrigeración, caída de presión) para mantener y optimizar la operatividad de las bobinas, apoyándonos con la programación de lenguaje de alto nivel y simulaciones de Elemento Finito (electromagnéticas y térmicas) y su diseño 3D-CAD respectivamente.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:

Los dispositivos de confinamiento magnético como Tokamaks, Tokamaks de baja relación de aspecto, Tokamaks esféricos, necesitan parámetros mejorados de bienes que involucran consideraciones como: relación de aspecto, alargamiento, triangularidad, densidad del plasma, con el objetivo de obtener valores altos deseables de β, aumento del tiempo de descarga de plasma y comprensión de la física sobre el comportamiento del plasma, en cuanto a la geometría y el diseño de la bobina toroidal presentada, se han presentado aspectos de ingeniería que involucran problemas eléctricos, definiendo el desarrollo futuro de las cajas toroidales refrigeradas, y la resistencia a esfuerzos mecánicos, estas consideraciones permiten reconocer la importancia de los materiales superconductores avanzados. En este trabajo se ha presentado un resumen de la metodología de diseño a partir

del análisis en forma de D, desarrollando algoritmos para generar formas interesantes utilizadas en la bobina toroidal, se han obtenido distribuciones analíticas del campo magnético toroidal con una geometría determinada, el uso de elemento finito Se han presentado métodos (FEM) a través del software COMSOL Multiphysics empleando un módulo de campo magnético en estudio estacionario, esto proporciona una vista 3D del comportamiento de la densidad de flujo magnético a través de un sistema de disposición toroidal.

Los resultados de la simulación electromagnética en la configuración toroidal al establecer el número de vueltas y el perfil de la bobina (D-shaped) además de la corriente eléctrica para obtener el campo magnético deseado dentro del toroide, fueron publicados en un artículo en la 28va Conferencia de Energía por Fusión (FEC 2020) organizada por la Agencia de Energía Atómica Internacional (IAEA por sus siglas en inglés).

Estos resultados de la simulación de transferencia de calor de un conductor de cobre que sigue el perfil 'D-shaped' en una instalación de reactores nucleares de fusión (Tokamak) ocasionado por el efecto Joule al estar aislado térmicamente fueron publicados en el Congreso XXVII Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM).

Capítulo 1

Introducción

Este capítulo abarca la motivación del tema elegido para la tesis, los antecedentes confinamiento magnético en instalaciones experimentales en la fusión nuclear, los conceptos más destacables y características tecnológicas en los Tokamak's que se necesitarán para abordar adecuadamente los estudios de esta investigación y la descripción de la instalación ITER que es una máquina promete conseguir energía renovable gracias a la fusión nuclear. Por último, mencionaremos la hipótesis, los objetivos generales y específicos del mismo, englobando de manera general la justificación de la presente investigación en la rama de fusión nuclear.

1.1. Hipótesis en la presente tesis

El rendimiento del sistema de refrigeración dependerá de tener un buen sistema magnético que genere el campo magnético necesario y sobre todo que se evacue el calor generado por la corriente y beneficie consumo de energía y otorgue operatividad. Comprender y desarrollar una distribución eficiente en el enfriamiento de la bobina toroidal es importante así como proponer el mejor esquema para lograr la operatividad del sistema en condiciones de alta corriente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

La presente tesis entonces tiene como objetivo, participar en el desarrollo del confinamiento magnético a través del desarrollo de un sitema magnético toroidal. Desarrollar la comprensión del comportamiento del refrigerante sobre el sistema magnético, determinando sus características (diámetro hidráulico, caudal de refrigeración, caída de presión) para mantener y optimizar la operatividad de las bobinas, apoyándonos con la programación de lenguaje de alto nivel y simulaciones de Elemento Finito (electromagnéticas y térmicas) y su diseño 3D-CAD respectivamente.

1.2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo del presente trabajo, se definen los siguientes objetivos específicos:

- **Determinar el área eficaz del conductor de cobre en tiempos de corto circuito.**
- **Dibujar en 3D la superficie del conductor siguiendo la parametrización matemática de la ecuación diferencial que define el perfil.**
- **Realizar las simulaciones electromagnéticas y comparar el comportamiento del campo magnético en la bobina de cobre con el modelo analítico.**
- **Simular el efecto Joule de un conductor "D-shaped" aislado térmicamente, es decir, con una transferencia de calor únicamente por conducción**
- **Emplear simulaciones térmicas agregando la convección a los distintos arreglos de conductores y diferentes velocidades del refrigerante**

1.3. Planteamiento de la tesis

Determinar el área más eficaz de los conductores de cobre que estarán en una carcasa de acero inoxidable operando en un rango de tiempos de corto circuito respetando la cantidad de vueltas, amperaje. Para el perfil de la bobina óptimo se resolvera la ecuación diferencial que propone File y que él mismo parametriza para obtener la superficie de la bobina "D-shaped" solucionada por medio de un lenguaje de programación en un código de Fortran, después hacer la pieza en 3D con el software SolidWorks y así conocer el campo magnético generado por las mismas bobinas en un arreglo toroidal para reactores nucleares de fusión (TOKAMAK), analizar el comportamiento del "ripple"debido al espaciado entre las bobinas. Por último, es de suma importancia simular el efecto Joule con ayuda del software COMSOL Multiphysics y el módulo transferencia de calor en sólidos y electromagnético, con estos resultados serán de gran utilidad para realizar simulaciones de enfriamiento de estos conductores de cobre y así evitar un valor crítico que derrita el cable conductor.

1.4. Motivación

En el actual siglo XXI las condiciones inherentes al cambio climático han originado la necesidad del hombre por generar energías con características renovables y ecológicas, considerando mantener el delicado equilibrio que impera en el medio ambiente, en un entorno social en crecimiento, una de las fuentes que cumple por la forma de generación para establecer este balance en la generación y consumo de energía fue propuesta a mediados del siglo pasado por investigadores soviéticos [Sakharov58, Azizov12A] y es: la fusión nuclear en su configuración Tokamak (***TOroidalnaya KAmera MAgnitnymi Katushkami***, en ruso). El proceso de fusión nuclear es antiguo en el universo y es el origen de las demás formas de energía renovables sobre la faz de la Tierra, pues ocurre en todo momento en los núcleos de las estrellas, donde la misma gravedad confina a la masa estableciendo un balance entre la fuerza de las reacciones nucleares de fusión y la compresión por la gravedad. Sobre la Tierra, esfuerzos científico - tecnológicos se desarrollan para reproducir en instalaciones experimentales la fusión nuclear controlada.

Los intentos del ser humano en pos de realizar esta hazaña, se identifican en dos sentidos: la fusión por confinamiento inercial (ICF, siglas en inglés) y la fusión por confinamiento magnético (MCF, siglas en inglés). El procedimiento para efectuar el confinamiento inercial, es iluminar a través del empleo de haces de iones pesados o ligeros, cápsulas de combustible termonuclear (Deuterio y Tritio) para establecer, a través de la conversión de radiación X, condiciones adecuadas de compresión, creando sobre la superficie de la cápsula, una corona de plasma de tal densidad que la radiación sea reflejada al interior y pueda comprimir a la materia cumpliendo con los criterios de densidad, temperatura y tiempo de confimiento (η_e, T y τ, respectivamente) para generar las reacciones de fusión nuclear.

La Fusión por Confinamiento Magnético utiliza altos campos magnéticos para confinar y comprimir a un plasma, el concepto fue desarrollado por la Unión Soviética en los años 50 del siglo pasado, y aunque existen varias configuraciones magnéticas desarrolladas para este fin, destacan las conocidas como *Tokamaks* y *Stellarator* que, a través de los sistemas mangnéticos confinan a un plasma de alta temperatura dentro de una cámara de reacción y a través del ciclo de conversión de energía (nuclear, cinética, térmica, mecánica y eléctrica) se obtiene el beneficio buscado en la generación de energía. Actualmente varias naciones cuentan con Instalaciones Experimentales de Investigación, entre ellas destaca el Tokamak ITER construyéndose actualmente en Francia, y es el segundo Proyecto Internacional más grande después de la Estación Espacial Internacional, se tiene contemplado en las próximas decadas contar con plantas generadoras de energía eléctrica que cuenten con instalaciones de confinamiento magnético.

Es de reconocer el enorme campo y su complejidad en cada uno de los sistemas que conforman estas instalaciones que deben ser abordados por físicos e ingenieros, para conseguir los objetivos deseados además de que una vez llegado a este punto, buscar optimizar los procesos y diseñar máquinas con constante mejoría. El campo de oportunidades en los Tokamaks ha crecido enormemente en la fusión nuclear pues desarrollos respecto a superconductividad, materiales, aceleradores de partículas, control, electrónica, etc. han permitido la evolución de grandes dispositivos a dispositivos compactos que aprovechan las variaciones geométricas que pueden definir mejor las condiciones del plasma para su confinamiento y calentamiento, entre otras elementos que hacen de una instala-

ción de fusión una atractiva fuente de energía.

México no se puede quedar atrás en este esfuerzo por desarrollar un dispositivo que permita investigación sobre el confinamiento y control de plasmas para lograr una fusión estable, debido a ello, la presente tesis propone un estudio sobre el arreglo magnético toroidal, que a través del establecimiento y la comprensión de la energía electromagnética y térmica y el correcto empleo de simulaciones, genere sistemas que permitan a nuestro país participar en pos de la fusión nuclear, permitiendo así cubrir aspectos energéticos primordiales con soluciones directas para disminuir el uso de combustibles fósiles.

El interés de esta tesis entonces parte del diseño de un sistema magnético toroidal y con la aplicación de los estudios electromagnéticos y térmicos comprender la generación de campo magnético y su temperatura de operación para optimizar, controlar y evacuar correctamente el calor de la bobina toroidal beneficiando así su explotación en una instalación de confinamiento, y con el apoyo de programas de diseño en 3D CAD como SolidWorks y de elemento finito como COMSOL Multiphysics, justificar las condiciones de diseño de las bobinas toroidales para el diseño del Tokamak de Baja Razón de Aspecto "T", los resultados respaldarán y ayudarán a cimentar la construcción de un dispositivo de confinamiento de mediano tamaño como lo es el Tokamak "T".

1.5. Antecedentes

Acuerdo de París.- Ha entrado en vigor al unirse la mayoría de los países que producen CO_2, la Federación Rusa lo ratifico en el año 2019 (EE.UU. y China en este 2021 han acordado implementar estrategias para reducir sus emisiones de carbono) este acuerdo trata de regir exhaustivamente la emisión de gases que son producto del petróleo, carbón y gas. La quema de combustibles fósiles son miles de millones de toneladas que se emiten anualmente, [Oceana] estima que liberamos más de 42,000 millones de toneladas de CO_2 equivalente (77 % de CO_2, 14 % CH4, 8 % N_2O y 1 % otros), siendo los EE.UU., China, India, los países que más emisión de gases emiten, afectando la temperatura media de la atmósfera la cual podría aumentar de 1.9° a 3.9°, y con ello alterar el ecosistema global de la Tierra.

Una comparación entre combustibles fósiles y fusión se puede describir como sigue: para explotar una planta de 1000 MWe que puede sostener una población de 1 millón de habitantes en EE.UU., para un año de operación se necesitan 20,000 vagones de carbón o 10 supertanques de pétroleo, en cambio para fusión, la cantidad de deuterio y tritio necesarios en un planta de 1000 MWe por un año podría ser entregada en una camioneta, 0.6 ton [IAEA95].

El crecimiento ecónomico del planeta se encuentra fuertemente ligado al consumo de energía, y debido a la explotación de los combustibles fósiles en su forma convencional, estos, han generado: el *efecto invernadero* que afecta y envuelve a la Tierra, a su vez, esta situación ha reavivado el interés por la energía que se puede obtener a través de las reacciones nucleares, perfilándose excelentes para generar y sostener el crecimiento ecónomico, pues la emisión de gases que se producen por su uso directo es prácticamente de 0 gramos; contribuyendo así enormemente a permitir la regeneración natural de la Tierra. Existiendo dos formas para aprovechar a la energía nuclear: las reacciones de Fisión y de Fusión.

1.6. Reproduciendo la energía de las estrellas

Existen 2 tipos de reacciones para aprovechar la energía del átomo: la primera de ellas, la *fisión nuclear*, supone la ruptura del átomo y el concepto de reacción nuclear en cadena: liberación de energía. La *Fusión Termonuclear* concibe la unión de elementos ligeros, isótopos del Hidrógeno (deuterio y tritio) empero, para unir estos elementos se tiene que vencer la repulsión por carga y para lograr esto, se necesita darle al sistema energía, bien comprimiéndole con radiación X (fusión inercial) bien con campos magnéticos, pero no sólo eso, se tiene que obtener una elevada densidad $\eta_e \times 10^{20} m^{-3}$, temperatura ($T_e$ 10 keV, millones de celsius) y un tiempo de confinamiento para lograr la generación de la reacción de fusión de 1 segundo, estos 3 conforman el criterio de Lawson.

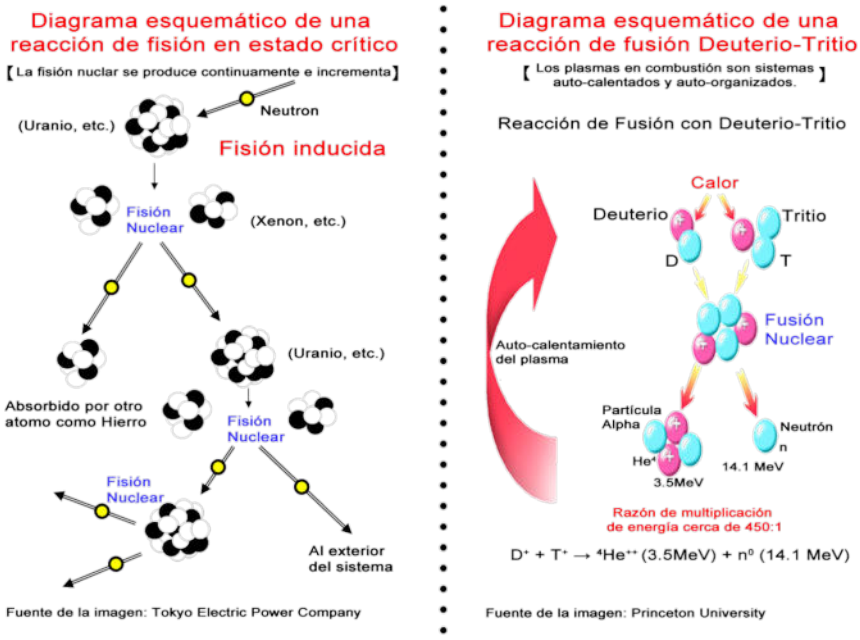


Figura 1.1: Diagramas esquemáticos de Fisión y Fusión

La fisión nuclear se puede lograr a temperatura ambiente; fusión: no. Las condiciones para generar y sostener el plasma son interesantes y desde los años 50 del siglo pasado la fusión no-controlada se logró, es el proceso de una bomba termonuclear, el objetivo es reproducirla y sostenerla en un dispositivo para fines de generación de energía.

Existe un inconveniente tecnológico acentuado en la **fisión**, más que en fusión y es: la activación y transmutación de los materiales que rodean a la fuente de radiación. En el caso de la *fisión* el tema tiene mayor fuerza pues el mayor componente de los residuos radioactivos en el ciclo nuclear es el propio combustible. En fusión no, sólo los elementos de la cámara de reacción y para ambas existen investigaciones sobre nuevos materiales que se activen y transmuten lo menos posible.

En esta tercera década del siglo XXI, las opciones energéticas deben cubrir aspectos tales como: continuidad de generación, impacto ambiental, economía y seguridad. La *Fusión Termonuclear* controlada, constituye una opción asequible: es completamente limpia, segura en su operación, posee

un costo de producción de energía aceptable contando con reservas de combustible suficientes, es una energía concentrada no difusa, y respecto a la fisión es 4 veces más poderosa.

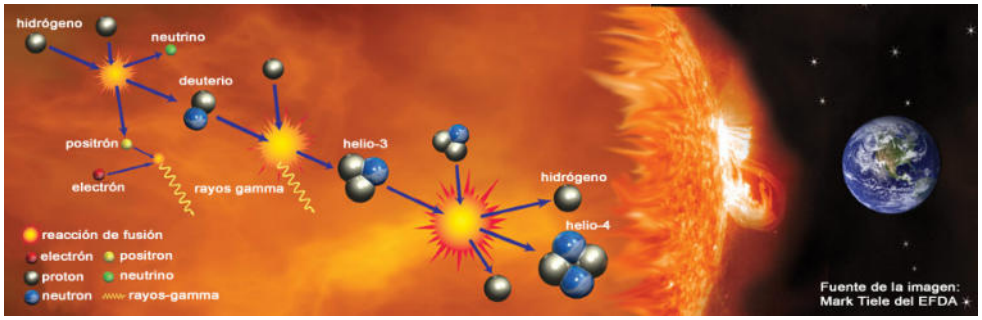


Figura 1.2: El sol, las reacciones termonucleares se realizan en el interior de la estrella debido a la inmensa gravedad que confina al combustible nuclear.

Los isótopos del Hidrógeno (deuterio y tritio) tienen en consideración reservas de combustible prácticamente inagotables pues el deuterio, forma parte del agua de mares y océanos su concentración en la corteza terrestre se ha calculado en 0.015 %, es estable y su obtención puede generarse por la electrolísis del agua pesada o por destilación diferencial del hidrógeno líquido (destilación fraccionada del hidrógeno) [Kecebas19] y el tritio se puede reproducir a partir del litio en la cámara de reacción, en el llamado manto fértil. El litio, es un material abundante en la corteza terrestre, ambos son isótopos del Hidrógeno.

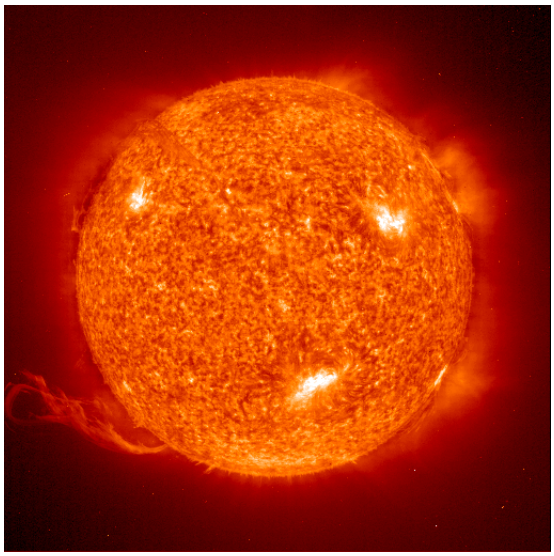


Figura 1.3: El sol, el reactor termonuclear con mayor tiempo de operación en nuestro sistema.

El ciclo de conversión de energía en un reactor de fusión nuclear está presente en la *fusión termonuclear*, se origina desde que las partículas y la *radiación* nacen de la reacción nuclear (neutrones y las partículas α), los primeros impactan sobre el interior de la cámara de reacción depositando su

energía cinética, los choques elásticos de los iones incidentes interactuan con la estructura cristalina del material de la cámara de reacción originando *grosso modo* las cascadas de desplazamientos, y dando origen a la primera fase de daño por irradiación, los átomos debido a la vibración fonónica de los retículos cristalinos, y a la generación de defectos nativos y con carga, se difunden en el material durante la fase de la espiga térmica en un tiempo de difusión de ($\times 10^{-15}$ segundos, los defectos con el tiempo, generarán agrupaciones de defectos y en condiciones de operación extremas en el reactor, las tensiones termoelásticas en la cámara, permitirán la evolución de los defectos (dinámica de dislocaciones, inicio de grietas, transmutación, generación de burbujas de Helio, etc.) debido a toda esta manifestación de energía las paredes se calientan y esa energía es entonces recogida por un sistema de refrigeración (sobre la cámara y sobre las bobinas para mantener el confinamiento magnético) y ese calor evacuado por el refrigerante va hacia arreglos de intercambiadores de calor o directamente a la turbina, de energía térmica a mecánica (ciclo clásico turbina-generador) para así pasar después al sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica (conversión mecánica a eléctrica).

Figura 1.4: Plasmas diversos tipos, diferentes temperaturas y diferentes densidades

1.7. Fusión por confinamiento magnético: Tokamak

Como se ha mencionado con anterioridad, en la *fusión termonuclear*, para vencer la repulsión electrostática entre los núcleos que se quieren fusionar, es necesario otorgar mucha energía a todo el sistema; es decir, se necesita calentar la materia a muy elevadas temperaturas. Con estas condiciones, llegamos pues así a conducir a nuestra materia al estado de plasma.

En confinamiento magnético los campo generados deben ser capaces de controlar los efectos colectivos presentes en el plasma, el confinamiento es parte de un sistema complejo que incluye calentamiento, pues los electrones e iones del plasma pueden ser beneficiados con deposición de radiación de microondas, por inyección de partículas neutras, calentamiento de ondas Alfvén, en

un Tokamak el calentamiento óhmico, etc.

La densidad del plasma debe ser alta y encontrarse a alta temperatura, los fuertes campos magnéticos entonces se generarán por medio de bobinas externas (toroidales, poloidales y aquellas que permiten corregir al plasma) que permiten la compresión del plasma y también equilibrarlo pues el plasma puede dañar la cámara de reacción y generar (en el *argot* de la *fusión termonuclear*) una disrupción.

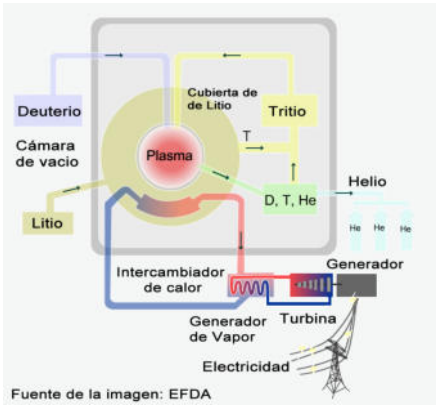


Figura 1.5: Esquema del ciclo de conversión de energía en Fusión

Por este motivo los campos magnéticos de las diversas configuraciones deben generar líneas de inducción toroidales y helicoidales beneficiándose de la forma toroidal ver Fig. 1.6. Es aquí donde el *Tokamak*, ver Fig. 1.7, tuvo su impacto, fueron las primeras configuraciones desarrolladas en la **Unión Soviética**, esta configuración es la que más se ha desarrollado y ha sido la configuración en la que se ha logrado obtener un factor de ganancia, el **Reactor Termonuclear Experimental Internacional** (**ITER**), es precisamente un *Tokamak*, y representa el ínteres científico-tecnológico más importante, en la búsqueda de nuevas fuentes de energía.

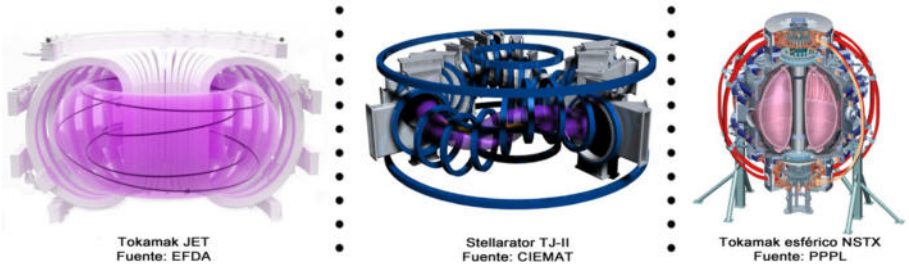


Figura 1.6: Diferentes configuraciones magnéticas: a la izquierda **Tokamak**, al centro *stellarator*, a la derecha **Esfero Tokamak ó Tokamak Esférico**

El *Tokamak* se caracteriza por su forma clásica axisimétrica de *dona* (geométricamente llamada toro), como podemos observar en las Fig. 1.7, 1.9 y 1.11 y en trabajo de [Ludwig03], dando origen en la correspondiente evolución Tokamak a dispositivos conocidos como: Esferomaks, Tokamaks Esféricos, Configuración de Campo Reversible (FRC, siglas en inglés), Constricción de Campo

Reversible (RFP, siglas en inglés), de Alta Razón de Aspecto, de Baja Razón de Aspecto. El beneficio de la forma con una sección transversal en forma de *D*, fue desarrollado en el Princeton Plasma Physics Laboratory, EE.UU. la cual es determinada así por la geometría de la bobina toroidal y los beneficios reportados en la distribución de fuerzas. (en la siguiente subsección 1.9.2., describiremos *grosso modo* la física Tokamak).

La dirección del campo magnético toroidal se denota con el simbolo (ϕ) es originado por la corriente que fluye sobre las bobinas de campo toroidal, a su vez la dirección poloidal que se le denomina con el simbolo (θ), gira envolviendo a la columna de plasma *la dona* en un plano perpendicular a la dirección toroidal, el plasma se comporta como un superconductor y genera este campo por la corriente que existe en el plasma, ambos forman un campo helicoidal resultante que es el que confina.

Esta configuración magnética *Tokamak* consta de: un solenoide central, un conjunto de bobinas de campo toroidal, bobinas de equilibrio conocidas también como poloidales, bobinas de campo vertical o de divertor y cámara de vacío.

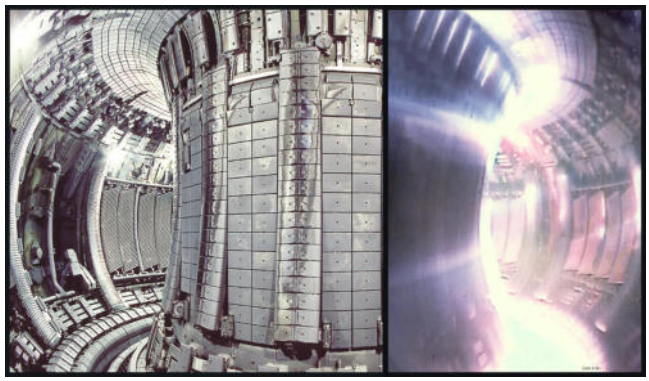


Figura 1.7: Vista de la cámara de reacción del Joint European Torus (JET), en el Centro de Ciencias de Culham, Inglaterra, el JET es una instalación experimental de fusión por confinamiento magnético *Tokamak*, en dicho dispositivo de fusión, se demostró por primera vez una ganancia de energía (Q) con un factor de 0.15, en 1991.

En la Fig. 1.7, apreciamos la cámara de reacción del Tokamak JET, en esta estación se obtuvo en noviembre de 1991 la ignición temporal de un plasma en una reacción de (D-T), produciéndose 2 MJ de energía de forma controlada, en el lado derecho de la fotografía podemos observar al plasma encendido, y en el lado izquierdo podemos apreciar a la cámara de reacción sin este plasma. Sin embargo, la instalación que logró obtener 10 MW de energía en un plasma de deuterio-tritio fue el Tokamak Fusion Test Reactor del Princeton Plasma Physics Laboratory, EE.UU., ambos dispositivos reforzaron la física e ingeniería de los Tokamaks y permitieron el fortalecimiento de otras configuraciones como los Tokamak Esféricos y el objetivo de ITER.

La otra configuración magnética existente es el Stellarator (ver Fig. 1.6), a esta concepción magnética pertenece el Heliac Flexible Stellarator TJ-II del Laboratorio Nacional de Fusión del Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) de España, en colaboración con el laboratorio de Oak-Ridge National Laboratory (ORNL) de los EE.UU. y

el Instituto de Física de Plasma (Institut für Plasma Physik, IPP; por sus siglas en alemán) de Garching en Alemania. La diferencia de una configuración respecto a otra es que no existe un solenoide central para calentamiento óhmico en la fase inicial en un Stellarator y el calentamiento en el plasma en la fase inicial de esta última, se logra por medios externos, además de un razonable valor de β.

En instalaciones de generación y potencia, para ambas configuraciones se vislumbra la necesidad de métodos externos de calentamiento sobre el plasma tanto para ayudar al calentamiento óhmico en los Tokamak como para calentar a todo el plasma en los Stellarator ya que carecen de él.

1.8. Tokamak de Baja Razon de Aspecto “T”

Una instalación experimental de fusión por confinamiento magnético tipo Tokamak con una configuración de Baja Razón de Aspecto y de mediano tamaño, es lo que se ha desarrollado para el Tokamak “T”, objetivo de la presente tesis en el sistema magnético toroidal.

- El Tokamak “T” es de Baja Razón de Aspecto, se encuentra en el rango de las instalaciones medianas.
- En el Tokamak “T” no se manejarán plasmas radioactivos (con liberación de neutrones) sino aquellos plasmas que nos permitan comprender lo mejor y más adecuadamente posible, el confinamiento magnético, tanto en la ciencia envuelta dentro de la fusión como en la tecnología para generar las condiciones propicias para generarla.
- Una de las cuestiones vitales para el Tokamak “T”, es la operación de las bobinas toroidales pues ellas son la principal causante de la trayectoria circular que sigue el plasma, es el encargado de confinarlo en dirección transversal, y que junto a la combinación del campo poloidal creado por (θ), dan lugar a un campo total cuyas líneas son espirales que se enrollan alrededor de la columna de plasma. Para evitar inestabilidades se deben atender las condiciones de equilibrio apoyándose todo el campo helicoidal resultante con el campo generado por las bobinas poloidales o también llamadas bobinas de campo vertical.

1.8.1. Métodos que se emplean para el calentamiento del plasma

Por efecto óhmico.- Al emplear un solenoide central lo que se consigue es una inducción de corriente en el plasma (I_P) que, al momento de generar campo magnético confinante, los electrones comienzan a moverse en el mismo sentido de las líneas de campo, generándose así un flujo de electrones. La resistencia del plasma se origina cuando los electrones e iones del plasma colisionan entre sí, es dato conocido que la resistividad del material es directamente proporcional a la tasa de colisiones, en otras palabras, en Tokamak el plasma se calienta inicialmente por el efecto Joule (la inducción de corriente en el plasma). Este efecto de calentamiento óhmico sólo es posible en los Tokamak pues en un stellarator, la corriente que aparece en el plasma es prácticamente despreciable.

Hay que tener en cuenta que por un lado, el plasma tendrá límites para su generación la vida útil de su energía aumenta al incrementarse las dimensiones y la corriente del plasma y por otro

lado existen razones de estabilidad, la resistividad del plasma disminuye al aumentar la temperatura [Mineev06], por estas razones, llegará un momento en el que el Tokamak necesitará métodos de calentamiento auxiliares para alcanzar las temperaturas de ignición estos métodos han sido establecidos como auxiliares para los Tokamaks, pero en cambio son los únicos métodos de posible aplicación para los stellarators, pues en estos dispositivos no se podrá dar nunca el calentamiento óhmico. Se mencionan algunas técnicas de calentamiento:

Emisiones de radiofrecuencia.- Esta técnica se basa en el uso de ondas electromagnéticas a la frecuencia ciclotrónica de los iones, que, acopladas con las frecuencias del plasma, logran la transmisión de energía a través de la resonancia de las partículas.

Por emisiones de microondas.- Es un método similar al anterior, sólo que emplea microondas para el calentamiento del plasma y se desenvuelve en los electrones, se emplea para pre-ionizar, pre-calentar al plasma, al inicio de la descarga, para eliminación de islas magnéticas y para calentar el plasma.

Por inyección de partículas neutras.- Esta es una técnica donde iones se aceleran para posteriormente dirigirse a un intercambiador de carga, y se convierten en partículas neutras, se eliminan iones con carga aún existentes en deflectores de partículas cargadas, asegurándose átomos neutros, dichas partículas se introducen por último en el reactor y al chocar con el plasma le ceden toda su energía y se logra el calentamiento del mismo.

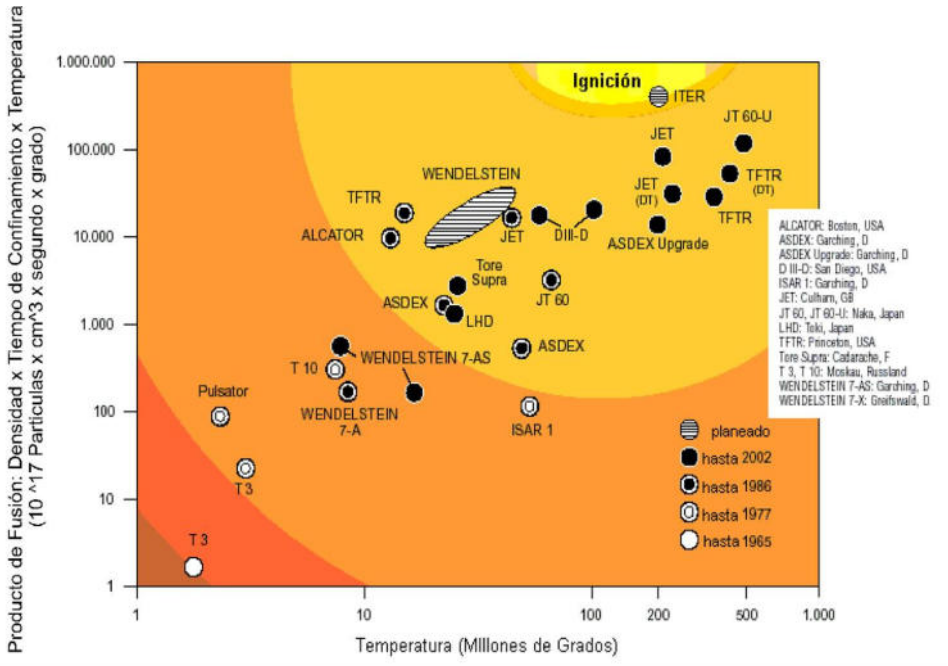


Figura 1.8: Ignición, el mayor objetivo de la investigación de la fusión nuclear, se aprecian los diferentes nombres de los dispositivos de confinamiento magnético comparándose entre sí, según el criterio de Lawson ($n\ \tau$) y la temperatura, así como también las fechas en las que se han generado estos datos.

En la Fig. 1.8, podemos observar el criterio de Lawson de diferentes máquinas de fusión por

confinamiento magnético desarrolladas en Europa, América y Asia, desde la mediación de la década de los años 60 hasta el año 2002; por parte de los europeos observamos a los Tokamaks T3 y T10 de la antigua Unión Soviética; de los alemanes los *Tokamaks* **ISAR 1**, **ASDEX** y **ASDEX Upgrade**; de los franceses el *Tokamak* **TORE SUPRA**; de los ingleses el ya citado *Tokamak* **JET**; por parte de los Estados Unidos de América, los *Tokamaks* **ALCATOR**, **D III- D** y el **TFTR**, y por parte de Japón el *Tokamak* **JT 60** y **JT 60-U**. Cada una de estas máquinas ha realizado una gran contribución dentro del campo de la investigación nuclear en fusión por confinamiento magnético [DENIM89], notamos en la gráfica que el objetivo final se halla localizado en **ITER**, y se encuentra localizado en la parte superior de la Fig. 1.8, señalando la *ignición* dentro de la instalación.

Algunas de éstas máquinas han sido mejoradas en la ingeniería aplicada en su constitución para optimizar aún más el régimen de confinamiento, por eso es que se citan con el mismo nombre, otras, han pasado a utilizar directamente plasmas radioactivos una vez acabado el período previo de investigación con plasmas no radioactivos, como ejemplo de esto podemos citar a los *Tokamaks* más importantes en los cuales el régimen de confinamiento reportó en definitiva mayores logros en camino a la ignición: **ASDEX Upgrade**, **TFTR**, **JT 60-U**, y el **JET**.

También en la Fig. 1.8 podemos apreciar a los *stellarators* del Instituto Max Planck de Física de Plasmas de Garching y Greifswald, Alemania; los *Wendelstein 7-AS, Wendelstein 7-X* que notablemente se les reconoce dentro del esfuerzo de fusión por confinamiento magnético, observamos en la gráfica que se ha podido obtener un aceptable criterio de Lawson por parte del *Wendelstein 7-X*. Dentro de las demás máquinas *Tokamak*, se tiene que hace mención que la diferencia sustancial no radica en el confinamiento magnético para el plasma, sino en la forma en la que el plasma puede alcanzar la temperatura adecuada.

1.8.2. Características tecnológicas en el Tokamak

En este punto se tiene que aceptar la evolución de la configuración Tokamak que en los primeros años de investigación y desarrollo, emplearon bobinas circulares y cuadradas. También eran de Alta Razón de Aspecto, con el transcurso de los años esta configuración evolucionó hacia Tokamaks de Baja Razón de Aspecto y después a Tokamak Esféricos.

En común estas configuraciones tienen la facilidad en el diseño de las bobinas y su distribución espacial es sencilla, en comparación con el stellarator. Las disrupciones son mayores pues existe una corriente de plasma que se induce por el solenoide central. Los Tokamak son dispositivos pulsados, esto debido al consumo de flujo magnético en el mismo solenoide, y respecto al plasma éste tiene una conductividad eléctrica muy grande bastaría una ligera variación de flujo magnética para mantenerla.

Los Tokamak convencionales tienen baja eficiencia, sin embargo las configuraciones Tokamak Esféricas tiene un gran índice β además de generar un campo compacto por ende mejora las condiciones del plasma. El Tokamak "T" es un Tokamak cercano a esa esfericidad por ende es un Tokamak de Baja Razón de Aspecto.

β entonces es una medida de la eficiencia del dispositivo, por ende el desarrollo de esta tesis pretende definir la gestación de un campo magnético toroidal fuerte con una Baja Razón de Aspecto, desarrollando la comprensión sobre dicho campo y la corriente que circula por la bobina toroidal y

su enfriamiento con el objetivo de definir bien su operatividad.

El Tokamak "T" se encuentra en el rango de los medianos Tokamak como se muestra en la Tabla 1.1 [Smtoks05], y que de acuerdo a la idea de TORE-SUPRA [DENIM89], de poseer campos magnéticos fuertes sobre Tokamaks pequeños, es que se ha procedido a diseñar esta instalación.

País	Máquina	R (m)	a (m)	I_P (kA)	B_T (T)	τ_{pulso} (ms)
Rusia:	Globus-M	0.36	0.24	350/500	0.5/0.62	300/500
Rusia:	TUMAN-3M	0.55	0.24	180	1.0/3.0	150
Inglaterra:	Compass-D	0.557	0.232	350	2.1	1s
Japón:	TS4	0.55	0.45	300	0.5	5s
España:	TJ-I	0.30	0.10	30	1.0-1.4	30

Tabla 1.1: Tokamaks, se menciona: R, como el Radio mayor del plasma; a, Radio menor; I_P, Corriente del plasma; B_T, Campo toroidal; τ_{pulso}, Tiempo de confinamiento

Empero, para resolver y determinar el uso -en el área de la generación de energía- de la fusión por confinamiento magnético, se tienen que afrontar algunos *retos* de la ciencia y tecnología para la fusión nuclear, como son: temperatura del plasma, densidad del plasma, tiempo de confinamiento, estabilidad y eficiencia del plasma, impurezas, diseño de cámaras de reacción, materiales para fusión, diseño de bobinas y modelización de campos magnéticos, estudios de interacción entre campos magnéticos y plasmas, tecnología aplicada de cada uno de los sistemas de control, diagnosis y análisis, etc.

Estos retos son importantes y la mayoría de la comunidad científica en fusión espera que en el confinamiento magnético, los *Tokamaks* como **ITER**, puedan desarrollar, demostrar y probar de forma fiable e integrada, cada sistema y sus componentes, sobre todo interesa que se cumpla el objetivo máximo en la fusión: producir energía limpia, segura, abundante, económica y poderosa como es lo que promete, se puede considerar que en la construcción de **ITER**, la etapa de generación de energía por medio de la fusión por confinamiento magnético se encuentra lista.

De ambas formas para obtener la *fusión termonuclear* en las instalaciones experimentales de la Tierra, la que más se ha desarrollado en la fusión por confinamiento magnético es el **Tokamak** desde entonces diversos laboratorios de investigación han desarrollado sus propios *Tokamaks*, la otra forma de confinamiento, la de la fusión por confinamiento inercial (**FCI**) no se ha quedado a la zaga, ella también presenta instalaciones interesantes desde el punto de vista para la generación de energía, más sin embargo por el área delicada en la que esta se desenvuelve, un porcentaje de dicha investigación se encuentra bajo control militar (tanto en los EE.UU. como en Francia).

1.9. ITER

El segundo proyecto más importante después de la Instalación Espacial Internacional es el Reactor Termonulcear Experimental Internacional (ITER) la Unión Europea, Japón, la Federación Rusa, así como la China, la India y Corea del Sur, Canadá y los Estados Unidos de América, están trabajando actualmente en colaboraciones internacionales de enorme magnitud: grandes proyectos que representan el origen de todo el desarrollo científico, tecnológico e industrial que estos países están dispuestos a mantener, cubriendo a la perfección, la amplia gama de disciplinas de la ciencia,

como son las Tecnologías de la Información, Biotecnología, Investigación Espacial, e Investigación sobre la Generación de Energía (la **Estación Espacial Internacional** y el proyecto del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional - ITER**, son los desafíos que en estas dos últimas colaboraciones se están desarrollando actualmente).

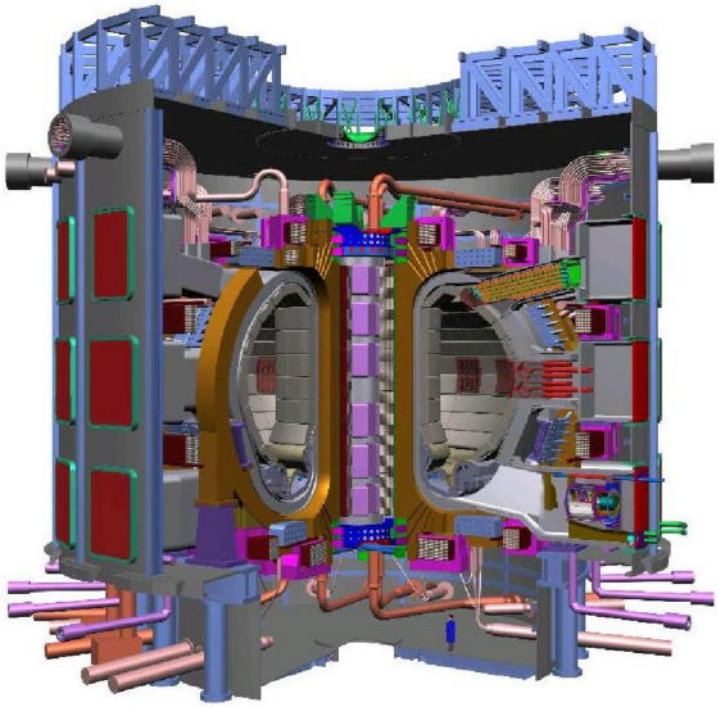


Figura 1.9: Esquema del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional**,(**ITER**) con un costo estimado de 15 000 millones de euro, se desarrolla del primer reactor que aplique a la fusión termonuclear controlada, un reto científico-tecnológico que promete impactar en la sociedad del siglo XXI al tener en explotación una fuente de energía limpia, económica, segura, potente y abundante. *Foto, cortesía ITER*

El Proyecto hoy en día más importante y prometedor en esta línea de investigación para la generación de energía a través de la fusión termonuclear controlada mediante el confinamiento magnético es el: **International Thermonuclear Experimental Reactor**, **ITER** (ver Figura 1.9), el cual podría ser, si se desease conectar una turbina y un generador: un sistema de potencia de aproximadamente 1000 Mwatts, ésto no será así pues el objetivo de **ITER** es probar cada uno de los sistemas inherentes a la máquina, así como comprender aún más el fenómeno de la fusión termonuclear controlada, se le considera como un proyecto de alta Ingeniería.

¿Cómo se encuentra constituído un reactor termonuclear como **ITER**? ¿cuáles son las dimensiones? estas dos cuestiones se técnicas se explican *grosso modo* a continuación, el principio de operación y funcionamiento en una instalación muy grande como lo es **ITER** no cambia respecto a un pequeño *Tokamak* como el que proponemos en este proyecto, lo que si cambia es que el primero: podrá generar potencia, el segundo, servirá para comprender y poseer tanto el conocimiento de la fusión como el cuadro de personal científico-técnico inmerso [**TAC16**].

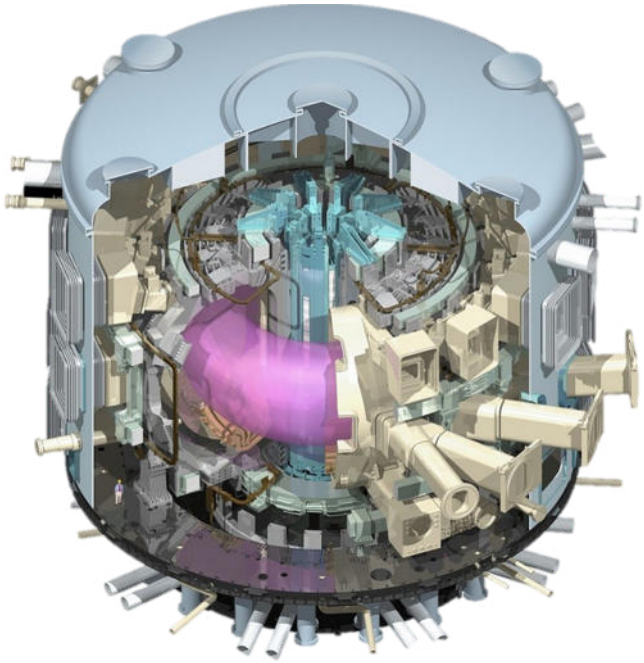


Figura 1.10: Esquema del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional**,(**ITER**), en la imagen se aprecia la columna de plasma dentro del reactor. *Foto, cortesía ITER*

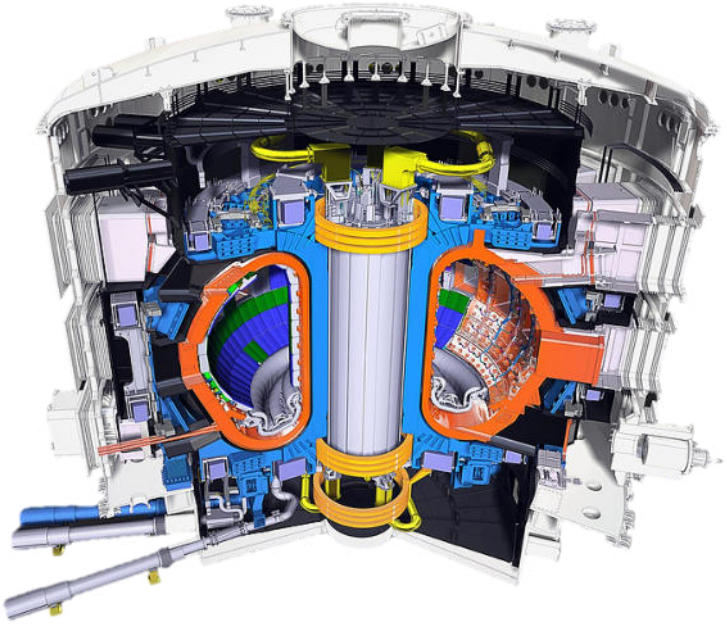


Figura 1.11: Esquema del **Reactor Termonuclear Experimental Internacional**,(**ITER**), en la imagen se aprecia el corte transversal del reactor, en color naranja se aprecia la cámara de vacío, en gris al centro el solenoide central, en azul las bobinas toroidales. *Foto, cortesía ITER*

Bobinas superconductoras toroidales (TF).- Las bobinas superconductoras del campo toroidal que son las que se encargan de confinar y estabilizar dicho campo magnético son 18, cada una pesa aproximadamente 290 toneladas y mide 14 metros de altura por 9 de ancho, el material superconductor de las bobinas, lo constituyen láminas radiales de (Nb_3Sn) envueltas en acero inoxidable (SS), el campo magnético que se genera, es de 11.8 Tesla.

Solenoide central (CS).- El solenoide central superconductor induce la corriente en el plasma de ITER, la bobina del solenoide pesa aproximadamente 840 toneladas y mide 12 metros de altura y 4 metros de díametro, el material superconductor es el mismo que el que posee la bobina superconductora toroidal (Nb_3Sn), la estructura se encuentra segmentada en seis módulos independientes y el campo magnético que se genera es de 13.5 Tesla.

Cámara de vacío.- Este recipiente proporciona un límite de alto vacío para el plasma y la primera línea de confinamiento contra las pérdidas radioactivas dentro del recipiente, se encuentra divida en 9 sectores, los materiales que componen dicha estructura son aceros inoxidables SS 316 LN, SS 304 con 2 % de armazón de boro y SS 430, ésta es una estructura soldada con una capa protectora de pared doble, la anchura media de la estructura posee entre 0.3 y 0.8 metros, la temperatura normal de operación se encuentra en un margen de $120 - 200°$C.

Blanket.- Así se le conoce a la formación de materiales de primera pared de la cámara de reacción, sus principales funciones son tres: eliminar la energía del neutrón y de las partículas generadas por el plasma, proporcionar protección a la estructura de la cámara de vacío y a las bobinas superconductoras, y contribuir a la estabilización pasiva del plasma, el *blanket* está constituido por módulos reemplazables que se encuentran unidos a la cámara de vacío, los materiales que lo constituyen son: una aleación de cobre (como óptimo material para la conductividad térmica), acero inoxidable (material estructural) berilio (armadura frente al plasma). El refrigerante que se empleará es agua que en promedio oscilará con una temperatura de 100 a 240°C y una presión de 3 a 5.7 MPa.

Divertor.- Este es un aparato que se encarga de la descarga del flujo de energía de las partículas cargadas producidas en las reacciones de fusión y que elimina al Helio y otras impurezas resultantes de las reacciones, además de aquellas que se originen por la interacción de las partículas del plasma con las paredes del material; el divertor consta de 54 módulos (reemplazables) y se encuentra situado en la parte inferior de la cámara de vacío, los materiales que lo constituyen son aleaciones de Volframio (W) y Carbono (C) para las partes que están en contacto con el plasma, aleaciones de cobre (por la misma razón que se usa en el *blanket*) y acero inoxidable SS 316 LN (como estructura), el refrigerante que se utiliza es agua con una temperatura de 100 a 240°C y una presión de 4.3 a 4.5 MPa.

Criostato.- Este dispositivo mantiene a los imanes aislados térmicamente y sirve como segunda barrera de confinamiento después de la cámara de vacío, consta de una sección cilíndrica unida a los cabezales superiores e inferiores, las dimensiones máximas del criostato son de 28 metros de díametro y 24 metros de longitud, la anchura de las paredes es de 50 milímetros, el material del que está formado es acero inoxidable SS 304 LN.

Sistema de enfriamento de agua.- Este sistema elimina el calor depositado por los neutrones y por la radiación en los materiales que rodean al plasma el calor desprendido en el *Tokamak* durante la operación de pulsado nominal es de 750 MW a 3 y 4.2 MPa de presión de vapor con una

temperatura de 120°C.

Crioplanta.- La planta de criogenia mantiene a los imanes a temperaturas adecuadas para la superconductividad (alrededor de 4 K) y mantiene las condiciones de criogenia en los escudos térmicos además del criostato, la capacidad de refrigeración de los escudos térmicos es a 80 K es de 660 kW.

Calor adicional y haz de corriente.- La función principal que nos otorga el *calor adicional* y el *haz de corriente* es incrementar la temperatura del plasma mientras aumenta la densidad para llegar a la potencia de fusión requerida, otra de sus funciones importantes es la de suprimir inestabilidades, y esto se logra con una potencia inyectada de 73 MW inicialmente y hasta 110 MW como máximo, los sistemas que pueden ser utilizados son por citar algunos: el ciclotrón de electrones o el de iones.

Suplemento de potencia eléctrica.- La potencia total/reactiva pulsada por la red es de 500 MW, la potencia total activa/reactiva del estado estacionario es de 110 MW.

Una vez elegido el emplazamiento de **ITER** en Cadarache, Francia, y que finalice su construcción, se esperan obtener los primeros plasmas en el primer año, a esta etapa se le conoce como la *Fase H*, esta será un fase *no* nuclear usando Hidrógeno y plasmas de Helio para completar y probar todos los sistemas del *Tokamak* en un ambiente *no* nuclear, y donde el reemplazamiento de piezas puede ser realizado sin necesidad de robots, existiendo dos fases más que si contemplan plasmas radioactivos en la instalación **ITER**.

En ITER existirán 3 fases para la experimentación, en la *fase H* se simularán los escenarios para las fases siguientes: la *Fase D* y la *Fase DT*, en la *Fase H*, el comportamiento del plasma respecto a su flujo de calor pico sobre el divertor será igual que en la última fase (*Fase DT*), las características de las cargas magnéticas debidas a las disrupciones y los eventos verticales de desplazamientos del plasma, además de las cargas de calor debidas a los electrones serán básicamente iguales a las de la *Fase DT*.

La siguiente tabla, muestra las características nominales que el Rector Termonuclear Experimental Internacional poseerá:

Características de ITER	
Potencia total de fusión:	500 MW (700 MW*)
Promedio de carga de neutrones 14 MeV:	0.57 MW/m^2 (0.8M W/m^{2*})
Tiempo de quemado del plasma	$\geq$ 400 s
Mayor radio del plasma:	6.2 m
Menor radio del plasma:	2.0 m
Corriente del plasma:	15 MA (17 MA*)
Campo magnético toroidal:	5.3 T
Volumen del plasma:	837 m^3
Superficie del plasma:	678 m^2

La máquina será capaz de alcanzar la corriente de 17 MA con los demás parámetros en paréntesis

Tabla 1.2: Características nominales del **ITER**, la fase de diseño ha concluido con éxito, sigue la fase de su construcción en Cadarache, Francia.

Debido a que las reacciones tecnológicamente más alcanzables son las que tienen deuterio y

tritio, éstas liberarán neutrones producto de las reacciones de fusión nuclear que tendrán como energía media 14 MeV, los cuáles generarán una carga sobre la primera pared de ≥ 0.5 MW/m^2 y con un promedio de 0.77 MW/m^2 en la línea ecuatorial del *Tokamak*, se espera que las reacciones de fusión lleguen a producirse de forma continua en **ITER** (ver Tabla 1.2) conforme aumente el conocimiento del plasma en el reactor, durante todo el tiempo de confinamiento, para esto, se encuentran en estudio materiales de baja activación como el carburo de silicio, β-SiC, siendo que la parte más importante de la radiación producida por la reacción de fusión, está compuesta de neutrones, y estos depositarán su energía en la cámara de reacción.

En dichas paredes de la envoltura de la cámara de reacción, la energía de los neutrones es capturada en forma de energía térmica y por medio de un circuito refrigerante este calor, se llevará a un generador de vapor, donde este vapor producido, será conducido a un sistema turbina-generador para la generación de energía eléctrica. Esto último se realizará, cuando ya se hayan establecido todas las condiciones científico-tecnológicas para la puesta en servicio de reactores comerciales.

En resumen podemos afirmar que el objetivo principal de **ITER** (ver Tabla 1.2), es demostrar la viabilidad de la Generación de Energía por medio de las Reacciones de Fusión Nuclear, para fines enteramente pacíficos en estos principios del siglo XXI, en **ITER**.

1.10. Elementos de los sistemas electromagnéticos: Tokamak "T"

Las interacciones de campo en su conjunto generan el cizallamiento (campo magnético helicoidal resultante) y sus funciones pueden clasificarse como: control, estabilidad, confinamiento, a saber: el Sistema de Campo Toroidal (el que nos atañe para su estudio en la presente tesis), el Sistema de Campo Poloidal (compuesto por los sub-sistemas de campos del calentamiento óhmico del Solenoide Central (SC), Bobinas de Equilibrio (BE), y Bobinas del Divertor (BD) [**Mineev06**]). Iniciaré entonces con las consideraciones de Física e Ingeniería dentro de la interacción de los campos magnéticos.

Las consideraciones *grosso modo* a tomar en cuenta se relacionan con: la *corriente* que *circulará por las bobinas*, la *relación geométrica*, la *corriente de plasma que se induce*, la *relación de los campos magnéticos*, la *presión para confinar al plasma*, *calentamiento y equilibrio* cumpliendo el *criterio de Lawson* sobre *densidad*, *temperatura* y *tiempo de confinamiento*, siendo así consideraremos la siguiente sección.

1.11. Generalidades sobre los campos magnéticos: Tokamak en el confinamiento

La generación de un campo magnético toroidal (B_T) a una distancia del eje toroidal (R), que en un Tokamak corresponde al centro del toro, es constante para cualquier sección transversal, y como veremos en la sección correspondiente al ánalisis magnético de la bobina toroidal, la variación del campo magnético toroidal es inversamente proporcional a la razón de aspecto (A) de un Tokamak, y que relaciona a la razón del Radio Mayor y el Radio Menor [ver Ec. 1.4], estableciendo:

$$B_T \; R = \;\; const \tag{1.1}$$

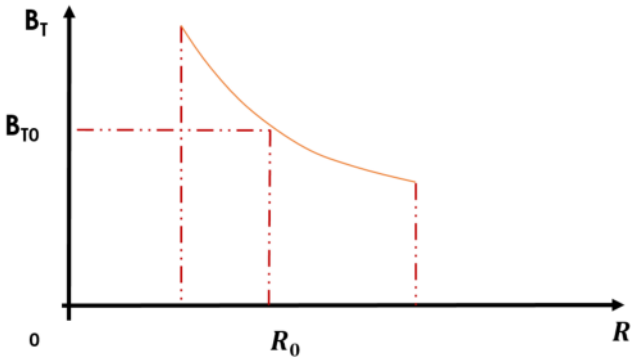


Figura 1.12: Campo magnético toroidal, se aprecia que es una curva, el campo que interesa siempre estará al centro en el Radio Menor de la cámara.

El desarrollo del sistema magnético toroidal en el Tokamak "T" inicia con la *corriente* (I) que *circula por las bobinas toroidales* que generan a uno de los principales campos para el confinamiento del plasma: el *campo toroidal*, ya que dependiendo de la geometría de la bobina, embobinado, aislamiento, generación de campo, alimentación y la distribución de cargas (magnéticas, térmicas, eléctricas), es que podremos definir el tipo de material a emplear, área y mecanizado del conductor, almacenamiento de la energía que alimenta a dichas bobinas y el tiempo de operación de la bobina, protegiéndole de sus propias cargas, se puede definir entonces, la *cantidad total de corriente* (I_T) que circulará por las bobinas toroidales a través de la siguiente ecuación 1.2 [Mineev97, DFTR91, Altovskii]:

$$I_T = 5 B_T \; R \;\; [MA, T, m] \tag{1.2}$$

Pudiendo establecer el *número de bobinas toroidales* (N) que pueden existir en un diseño Tokamak, calculando así la corriente a través de cada bobina toroidal ($I_{T.B.}$) y un promedio sobre la densidad de corriente en cada bobina toroidal ($\vec{j}$):

$$I_{T.B.} = \frac{I_T}{N} \quad \vec{j} \simeq \frac{I_T}{2\pi r_i d_i} \tag{1.3}$$

Estableciendo así, una aproximación para el diseño de las bobinas toroidales, su corriente y el número de ellas, siendo (d_i) y (r_i) la anchura de la bobina y el radio hasta el centro de esa anchura partiendo del eje del toro hacia la bobina (ver Fig. 1.13).

Entonces para el Tokamak "T", se ha considerado el estudio sobre un campo magnético toroidal de 1.6 a 1.3 T, con un Radio Mayor (R) de 0.41 m, los valores máximos de I_T usando la Ec. 1.2 son

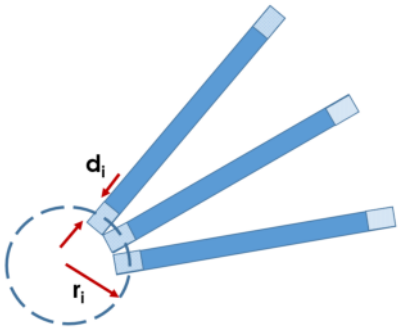


Figura 1.13: Esquema de la distribución de las bobinas toroidales de un Tokamak

de 3.28 a 2.665 MA, respectivamente. Se ha realizado un análisis para 12, 14 y 16 bobinas toroidales en el Tokamak "T", y se ha determinado a través de la ecuaciones de $I_{T.B.}$ y $\vec{j}$, los siguientes valores:

I_T R= 0.41 m		$I_{T.B.}$ (MA)	$\vec{j}$ (MA/cm^2)	$\vec{j}$ (A/mm^2)
B_T= 1.6 T	N = 12	0.2733		
I_T= 3.28 MA	N = 14	0.2342	0.0026101	26.101
	N = 16	0.205		
B_T= 1.3 T	N = 12	0.2220		
I_T= 2.665 MA	N = 14	0.1903	0.0021207	21.20
	N = 16	0.1665		

Tabla 1.3: Valores aproximados de I_T, B_T y R (Radio Mayor); I_P (Corriente del plasma); B_T, (Campo toroidal).

Las corrientes para cada bobina son de: 0.2733, 0.2342 y 0.205 MA para 1.6 T y de 0.220, 0.1903 y 0.1665 MA para 1.3 T, con la respectiva variación de número de vueltas (N) (ver Tabla 1.3), la densidad de corriente en cada bobina es de: 26.1013 A/mm^2 para 1.6 T y de 21.20 A/mm^2 para 1.3 T (un material superconductor de baja temperatura como el $Bi-2212$ posee una densidad crítica de corriente de más de 1000 A/mm^2 [Utoh10]). Entonces, estas serían las consideraciones dentro de la corriente circulante en la bobina de campo toroidal, sin embargo, *este campo va hacia un plasma*, se *induce una corriente en él* y *tiene límites*, veamos entonces los párrafos siguientes.

Una máquina de confinamiento magnético *Tokamak involucra una explotación exhaustiva de la geometría*, en este caso del toro, añadimos entonces la definición de la **Razón de Aspecto** (**A**) la cual representa al cociente entre el *Radio Mayor* (**R**) de la instalación y el *Radio Menor* (**a**) del plasma en la sección toroidal [Glosario02, Neumeyer00], y viene dada por la siguiente relación:

$$A = \frac{R}{a} \tag{1.4}$$

Los datos establecidos en la geometría de nuestro *Tokamak* y que determinan nuestra *Razón de Aspecto* (**A**) son: *radio mayor* **R** de 41 cms., *radio menor* del plasma (**a**) de 18.5 cms., esto nos

otorga un valor de (**A**) de: 2.216216216 dentro de la Ec. 1.4, cercano el valor a un 2, *casi baja razón de aspecto*, empero, como ahondaré en capítulo 2, el plasma de un *Tokamak* depende también de algo conocido como (q), es una capa límite máxima dentro de la *columna de plasma* en la cual puedes mejorar la calidad de confinamiento, el tiempo de vida del plasma y controlar eficientemente su expansión.

Debido a que existe una corriente en la columna de plasma, para la determinación del *Factor de Seguridad* (**q**) tenemos que éste relaciona el número de vueltas que las líneas de campo magnético helicoidales dan en dirección toroidal por cada vuelta en dirección poloidal [Glosario02, Rodríguez94], y viene dada por la ecuación siguiente:

$$q = \frac{aB_T}{RB_p} \tag{1.5}$$

Donde B_T y B_p son los campos toroidal y poloidal respectivamente, para que no existan inestabilidades magnetohidrodinámicas (MHD), el factor de seguridad se desea sea superior a 1, en este caso el valor que se ha determinado en la Ec. 1.5 es de: 1.955284553.

En un *Tokamak* el campo toroidal debe de ser mucho mayor que el campo poloidal ($B_T \gg B_p$), un factor importante para el confinamiento, es entonces la *determinación de la corriente máxima en el plasma*, para ello se ha empleado la Ecuación 1.6 la cual establece una relación con el *Radio Mayor* (**R**), el *Radio Menor* del plasma (**a**), el campo toroidal (B_T), el *factor de seguridad* (**q**), y la permeabilidad del vacío (μ_0, $4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2}$), la ecuación es la siguiente:

$$I_p < \frac{2\pi a^2 B_T}{\mu_0 q R} \tag{1.6}$$

Aplicando la Ec. 1.6 se ha encontrado el siguiente valor para la *corriente máxima del plasma* (I_p) de: 277 kA, el valor del campo poloidal (B_p) depende en gran medida de la corriente del plasma (I_p), como bien se deduce de la Ec. 1.7, que toma en cuenta el campo poloidal en el borde del plasma:

$$B_p(a) = \frac{I_p}{5\, a\, k^{1/2}} \tag{1.7}$$

Otorgando para este análisis el valor de B_p de: 0.1775 T. En el desarrollo de nuestra instalación experimental de confinamiento magnético *Tokamak* "T", se ha considerado iniciar con el valor máximo de campo toroidal de 1.3 T, con ello el cizallamiento esperado sería de 1.6 T. En un *Tokamak* existe la relación entre la presión del plasma (**p**) y el valor de la presión del campo magnético, al que se le conoce como β [Rodríguez94].

$$\beta = \frac{p}{B^2/2\mu_0} \tag{1.8}$$

El cual es proporcional al cociente entre la energía térmica y la energía magnética del plasma [Glosario02], y donde (β) de la ecuación 1.8 será poloidal, toroidal o total en función de la componente del campo magnético que se considere [Rodríguez94].

Existe una comparación de los parámetros que he determinado para la presente propuesta de diseño de nuestro *Tokamak*: Razón de Aspecto "A" (2.2162), Factor de Seguridad "q" de (1.9522)

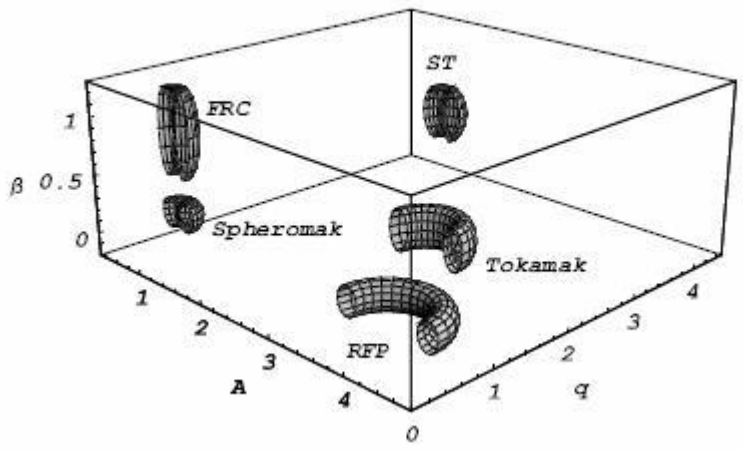


Figura 1.14: Configuraciones axisimétricas, entre ellas destacan los Toroides Esféricos, los Esferomaks y los Tokamaks, se aprecian los valores de: **Razón de Aspecto "A"**, **Factor de Seguridad "q"** y de β.

y un valor β_T de (0.05326), estos parámetros podemos situarlos en la Fig. 2.9, las configuraciones que allí se presentan son axisimétricas destacando entre ellas a los esferomaks, los toroides esféricos y los *Tokamaks* entre otros, siendo así, podemos observar que nos localizamos en la región que corresponde en cierta medida al de los *Tokamaks* [Ludwig03].

Se puede entender mejor el concepto de $\langle p \rangle$, si analizamos en un *lazo* de plasma las Leyes de Equilibrio, las cuales actúan a lo largo de los radios mayor y menor, siendo el equilibrio para el radio menor, descrito por la siguiente ecuación:

$$\langle p \rangle = \frac{B_p^2(a)}{2\mu_0} + \frac{B_{Tex.}^2 - B_{Tin.}^2}{2\mu_0} \tag{1.9}$$

Y en donde $\langle p \rangle$ es la presión cinética del plasma promediada sobre su sección transversal, $B_p(a)$ es la fuerza del campo poloidal sobre la frontera del plasma, $B_{Tex.}$ y $B_{Tin.}$ son los campos sobre el eje toroidal externo e interno. El equilibrio a lo largo del radio mayor es mantenido usando el campo magnético transversal ($B_\perp$), el cual es creado por las bobinas del campo poloidal (CP), dando origen a la siguiente ecuación [Mineev06]:

$$B_\perp = \frac{\mu_0 I_p}{4\,\pi\,R} \cdot \left\{ ln \frac{8\,R}{a k^{1/2}} - \frac{3}{2} + \frac{\ell_i}{2} + \beta_p \right\} \tag{1.10}$$

Nota: La fuerza resultante $J \times B$ actúa sobre el plasma en la dirección opuesta a estas fuerzas: 1.- El gradiente de presión del plasma, 2.- Interacción del B_T y la corriente poloidal $I_{poloidal}$ y 3.- Interacción del B_P y la corriente del plasma I_P. Todas las ecuaciones descritas en esta sección se abordarán con mayor profundidad en las secciones siguientes, pues lo aquí escrito es el punto de vista *general implicado* en el confinamiento magnético: Tokamak.

Varios investigadores y centros han desarrollado en el transcurso del tiempo máquinas de confinamiento, entre ellos están el TJ-I del CIEMAT, el Compass-D, el Globus-M, el GLAST [Hussain14],

el Alborz [Mardani12], los esfuerzos del Prof. Dolan [Dolan00], del Prof. Stockel [Stockel09], nuestro desarrollo en Tokamaks, le debe mucho a todos los que nos precedieron en pos de la investigación avanzada en fusión, sí, gracias a Dios en primer lugar y sin lugar a dudas el que nos haya permitido apoyarnos con los Profesores Vorobyov y Mineev [Mineev06].

Capítulo 2

Sistema Toroidal

En el siguiente capítulo se ahonda en las ecuaciones del campo magnético y su comportamiento en el espacio del toroide además de analizar su interacción con las fuerzas existentes en la bobina y su transferencia de calor debido al efecto Joule resultado del proceso electromagnético de inducir una diferencia de potencial en los embobinados. Se agrega con detalle el cálculo para determinar el area del conductor en tiempos de corto circuito debido a la alta cantidad de corriente así como también el diseño geométrico final del sistema toroidal en el Tokamak "T". Por último, se expondrán las consideraciones para la simulación electromagnética en los conductores de las bobinas toroidales, las consideraciones para las simulaciones del efecto Joule en el caso de un conductor aislado térmicamente (transferencia de calor únicamente por conducción) y el cálculo del coeficiente de convección promedio en las superficies para el caso cuando fluye un refrigerante entre los conductores (agregando al sistema la transferencia de calor por convección forzada) y sus respectivas consideraciones para las simulaciones.

2.1. El Sistema Magnético Toroidal

El diseño geométrico de las bobinas toroidales en un dispositivo de confinamiento, está gobernado por dos consideraciones: el esfuerzo mecánico y el calor generado, bobinas toroidales circulares o rectangulares se emplearon en el pasado debido a los bajos campos magnéticos en pequeños Tokamaks, sin embargo, el nivel de fuerzas se incrementa considerablemente en Tokamaks grandes, debido a que el estrés mecánico (F) es proporcional al cuadrado del campo toroidal (B_T) y al radio mayor (R) [Mineev06].

Esta característica de diseño es importante en máquinas mayores, pudiendo dar como resultado la deformación de las bobinas. Aquí interesa el diseño mecánico de la bobina, pues se pueden comprender mejor los momentos en ella. Esto conduce al diseño de bobinas toroidales "D" (*D-shaped coils*, en inglés) [FileA, DeMichele73, Raeder76, Gralnick76], donde el radio de curvatura llega a ser pequeño cuando la presión magnética es grande.

Para la determinación de las características de la bobina, tales como número de vueltas, área transversal del conductor, etc., se realizó un análisis con respecto a las ecuaciones básicas de electromagnetismo, principalmente la ley de Biot-Savart, con su descripción del campo magnético generado por el flujo de corriente a través de un conductor.

En el presente diseño toroidal que se propone, el campo magnético (Ec. 2.1) es inversamente proporcional al radio (r), es decir, el volumen útil varía inversamente con el radio desde el eje del toro, para tener una distribución de campo (1/r) [FileA, Raeder76]; siendo entonces la presión magnética proporcional a (r^{-2}, Ec. 2.2), obteniendo así que, para tener una distribución uniforme del estrés mecánico se necesita que el radio de curvatura (r) sea inversamente proporcional al cuadrado del radio (r^2) esto es: una geometría toroidal en la forma *D-shaped*:

$$B_t(r) \sim r^{-1} \tag{2.1}$$

$$\frac{B_t^2}{2\mu_0} \sim r^{-2} \tag{2.2}$$

La descripción analítica para la generación de la forma de las bobinas toroidales *D-shaped* en un caso ideal con bobinas continuas (no uniones eléctricas) puede ser expresada a través de la ecuación diferencial [DeMichele73, Raeder76, Mineev06, FileA, FileB] siguiente:

$$r\frac{\delta^2 r}{\delta z^2} = \pm\frac{1}{K}\left[1+\left(\frac{\delta r}{\delta z}\right)^2\right]^{3/2} \tag{2.3}$$

$$K = \frac{1}{2}\, ln\, \frac{r_2}{r_1} \tag{2.4}$$

Donde K es la relación entre el radio externo-interno de la *D-shaped*, y la Ec. 2.3 permite trabajar el radio (r) de la *D-shaped* en función de la altura (z). Se debe de hacer notar que la distribución espacial del campo magnético depende de la geometría de las bobinas, y que el factor K puede ser deducido también como sigue a través de las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{2\,T}{I\,B_m r_1} = \frac{4\pi T}{\mu_0\, N\, I^2} \tag{2.5}$$

Siendo T

$$T = \frac{1}{2} I\, B_m\, \varrho \tag{2.6}$$

Donde B_m es el campo total del toroide Ec. 2.11 y ϱ el radio de curvatura. En el caso más concreto de la bobina diseñada para el Tokamak "T", ésta fue diseñada considerando las razones descritas con anterioridad, precisamente a través de una forma *D-shaped*. Un diseño de bobina como el que se propone es complejo, debido a las propiedades de las divergencias de la expresión integral general siguiente (Ley de Biot-Savart [DeMichele73, Yongxing]):

$$\vec{B}(\vec{r_2}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \frac{I\, \vec{dl} \times (\vec{r_2} - \vec{r_1})}{[\vec{r_2} - \vec{r_1}]^3} \tag{2.7}$$

Dónde: $\vec{B}(\vec{r_2})$ es el vector del campo magnético en la posición $\vec{r_2}$, μ_0 es la permeabilidad magnética del espacio libre, **I** es la corriente conducida por el conductor, $\vec{r_1}$ es el vector localizado en el conductor, $\vec{dl}$ es el segmento diferencial conductor en la dirección del flujo de corriente.

Cuando uno trata de calcular los campos del conductor, el argumento de esta integral diverge cuando $\vec{r_2}$ se aproxima a $\vec{r_1}$. En casos donde la integral debe de ser evaluada numéricamente la propiedad del argumento hace imposible evaluar la integral con exactitud. La Ec. 2.8 siguiente, es la ecuación desarrollada por el M.C. González Guervara del Grupo de Investigación en Fusión que demuestra tal complejidad [GIF2010] y se estableció para la generación del campo magnético toroidal (B_T) a través de nuestra bobina *D shaped* para el Tokamak "T":

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \Big[\frac{1}{r} \int_{l.s.} cos(\pi + \theta) d\theta + \frac{a}{r^{\frac{3}{2}}} \sum^{3} \int_{c.s.} \frac{a - r\ cos(\theta - \phi)}{[r - 2a\ cos(\theta - \phi)]^{\frac{3}{2}}} d\phi \Big] \widehat{\mathbf{z}} \tag{2.8}$$

Este problema es evitado usando una ecuación más fundamental, la cual es la Ecuación de campo:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint \int J \frac{\vec{dl} \times (\vec{r_2} - \vec{r_1}) dA}{[\vec{r_2} - \vec{r_1}]^3} \tag{2.9}$$

Aquí dA, es el diferencial del área de la sección eficaz del conductor y J es la densidad de corriente, se ha encontrado que para las bobinas con un área seccional rectangular como aquellas inherentes a las bobinas circulares o a las bobinas *D-shaped*, la integral de la Ec. 2.9, puede ser parcialmente evaluada permitiendo una línea integral de una dimensión con un argumento que permite relacionar los valores de $\vec{r_2}$ y $\vec{r_1}$. Entonces descriptivamente, podemos decir que la distribución radial del campo magnético toroidal para una bobina delgada puede ser aproximada en su evaluación por las siguientes ecuaciones 2.10 y 2.11:

$$B_\varphi = \frac{B_m r_1}{r} \Big[1 + \frac{1}{(\frac{r}{r_1})^N - 1} + \frac{1}{(\frac{r_2}{r})^N - 1} \Big] \tag{2.10}$$

$$B_m = \frac{\mu_0\, N\, I}{2\pi r_1} \tag{2.11}$$

Observando que la expresión 2.10, se reduce a una simple forma cuando N se aproxima al infinito:

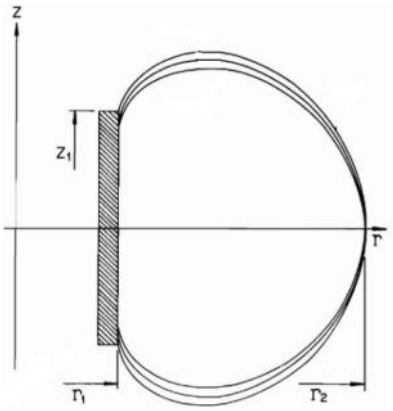


Figura 2.1: Traslape matemático de elementos conduciendo corriente de tensión constante, generado por "n" bobinas discretas. FileA, FileB, Raeder76

$$B_\varphi = B_m \frac{r_1}{r} \tag{2.12}$$

Las singularidades de los radios, cuando r_1 y r_2, pueden desaparecer, es decir, la forma de las bobinas toroidales de campo *D-shaped*, se convierte en circular cuando N es pequeño, ver Fig. 2.1 .

Siendo así es posible evaluar el campo magnético de la bobina, el cual una vez determinado, permite calcular la fuerza por unidad de longitud gracias a la siguiente expresión:

$$\vec{F}(\vec{r}) = \vec{I}(\vec{r}) \times \vec{B}(\vec{r}) \tag{2.13}$$

El tema de las fuerzas sobre la bobina *D-shaped* se tratará en la sección 2.6.12, aquí sólo comentaré que se definen las fuerzas mecánicas actuando, la Fuerza *Bursting* (separación) y la Fuerza *Toppling* (de derribo), a través de las siguientes expresiones se deduce que la primera de las fuerzas es producida por si misma debido a la corriente en la bobina y la otra, es debido a la interacción del campo magnético transversal [Mineev06].

$$F_{self} \simeq 2.5 \frac{B_{t0}^2 R_0^2}{N\,R}\,[T,\, m,\, MN/m] \tag{2.14}$$

$$F_{toppling} \simeq \frac{5 B_{t0} R_0}{N} \cdot B\,[T,\, m,\, MN/m] \tag{2.15}$$

Entonces en un Tokamak existirán fuerzas debido a los campos magnéticos de las bobinas, y los soportes de los dispositivos deben de ser lo suficientemente fuertes para resistirlas, la ecuación básica para calcular la fuerza es aquella reportada en la Ec. 2.13, comentaré de forma general que, si analizamos dos cables largos, paralelos conduciendo corriente, llamémosles I_1 e I_2, si estas corrientes son paralelas y en la misma dirección, los cables sentirán atracción, si fuesen en sentido contrario sentirían repulsión. Esto es lo que sucede en el caso de dos cables circulares co-axiales (sucede lo opuesto en las cargas electroestáticas donde cargas iguales se repelen y cargas contrarias se atraen).

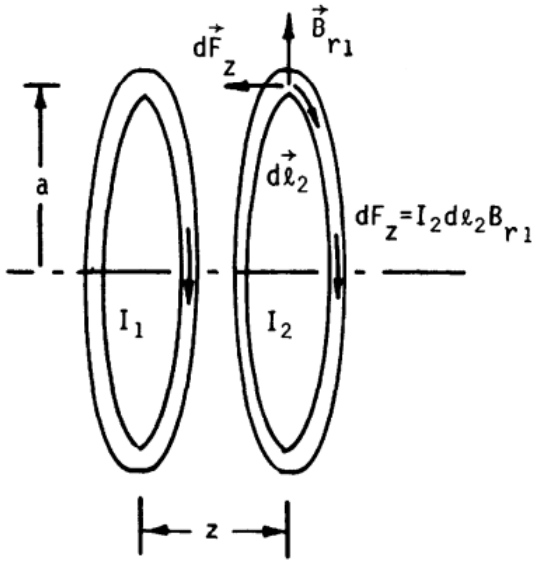


Figura 2.2: Fuerzas actuando sobre una bobina, [Dolan00]

Lazos circulares co-axiales.- Si analizamos el caso de dos cables circulares co-axiales de igual radio (a) (ver Fig. 2.2), el campo B_z produce fuerzas radiales sobre las bobinas, que crean esfuerzos internos, pero no causan movimiento. El campo radial B_r produce un empuje axial F_z que tiende a empujar a las bobinas en conjunto, si los cables tienen igual corriente, o de separarlas si tienen corrientes opuestas [Dolan00].

Es verdad que analizar un sistema complejo como el que proponemos puede resultar arduo, sin embargo, se pueden realizar análisis generales (que al final pueden dar resultados muy coherentes con respecto a aquellos obtenidos para la generación de campo ó de tensión), basta tan sólo asumir y respetar que, esos resultados generales no dependen del traslape perfecto de las secciones eficaces del toro o del solenoide, sino que dependen de la exactitud con la cual un campo toroidal está en concordancia con la consideración electromagnética básica (Ec. 2.11, 2.16).

$$B_T = \frac{\mu_0 \, N_{tot} \, I}{2\pi \, R} \tag{2.16}$$

$$T = \frac{\mu_0 \, N_c \, N_t^2 \, I^2}{8\pi} \, ln \frac{R_2}{R_1} \tag{2.17}$$

Esto quiere decir que, ese campo (o capa) toroidal depende de cómo está empaquetado uniformemente y cómo está cerrado en el espacio, la Ec. 2.16 contiene además un número ya determinado de vueltas para el toroide, estas portan al igual, una corriente también establecida, si existiesen algunas zonas con cierto espacio entre ellos, entonces sí, la mejor exactitud provendría de las integraciones de línea de campo a lo largo de todo la bobina Ec. 2.9 para nuestra *D-shaped*.

Siendo así y partiendo de esta consideración, el Toro Conjunto Europeo (JET, siglas en inglés) en sus cálculos internos para elevar el campo magnético a 4 T, toma como válida la consideración electromagnética básica para calcular su Campo (Ec. 2.16) y su Tensión (Ec. 2.17) [Bertolini00],

esto también lo realiza la División de Energía por Fusión y el Oak Ridge National Laboratory en sus estudios respecto al traslape [Gray].

En la Ec. 2.16, I, es la corriente de alimentación en la bobina conductora; N_{tot} es el total de vueltas sobre todas las bobinas (ej. JET tiene 32 bobinas por 24 vueltas cada una= 768); R, es el radio en el cual el campo es requerido. Para la Ec. 2.17, la fuerza total actuante sobre la bobina es determinada gracias a la presión magnética sobre el plano medio de la bobina, la tensión en una de las bobinas se puede determinar gracias a esta ecuación; R_1, es el radio interior efectivo; R_2, radio exterior efectivo; N_c, Número de bobinas; N_t, Número de vueltas por bobina; I, corriente de alimentación de la bobina.

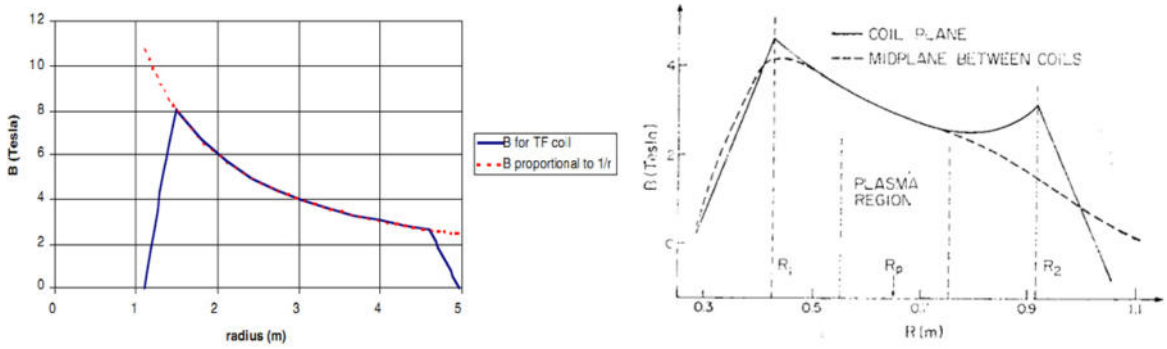


Figura 2.3: Campo magnético de las diferentes bobinas d-shaped desarrolladas para el JET del Centro de Ciencias de Culham (izquierda) y SNUT-79 de Corea (derecha).

En los cálculos que se realizaron para el SNUT-79 de la Universidad de Seúl, Corea del Sur, se comenta que ellos partieron de la Ley de Biot-Savart, para determinar las distribuciones de campo toroidal, ellos tienen una *D-shaped* (16 bobinas, corriente de 60,000 A, campo de 3 T) y la Fig. 2.3 (derecha) muestra la distribución del campo toroidal, el máximo campo magnético ocurre en el interior de la superficie de R_1 del conductor de la bobina, la fuerza del campo es aproximadamente proporcional a 1/R en la región del plasma y varía linealmente con la región de la bobina conductora [Cheol84], la Fig. 2.15, corresponde al campo en el plano ecuatorial.

Los estudios sobre la generación de 4 T en el JET (Fig. 2.3, izquierda), muestran la variación de radio, sin embargo, en el JET utilizaron la Ec. 2.16, indicando que R, sería el radio donde éste fuese requerido [Bertolini00], la corriente que ellos utilizaron para la generación de 4 T es de 78,000 A a 3 m de radio. La Fig. 2.3 izquierda, muestra entonces que el campo máximo se encuentra en la parte interior de la bobina y a 3 metros de distancia, los 4 T, ésta es la forma correcta de interpretación para la generación del campo toroidal. Debido a las razones anteriores comentadas, uno puede utilizar con mayor exactitud la Ley de Biot-Savart o si las consideraciones pueden permitirse, la Ec. 2.16. Lo importante es que se pueda diseñar una bobina *D-shaped* que resista tanto en su conductor como en sus soportes el esfuerzo mecánico existente, ya que de ello dependerá la integridad de la máquina al momento de realizar las descargas de alta corriente con una interacción de campo magnético considerable.

Respecto a las fuerzas, se han realizado bastantes estudios para reducir el estrés mecánico en los conductores al mínimo posible, tratando el traslape del campo magnético toroidal. Una bobina *D-shaped*, tiene la propiedad de maximizar la inductancia de la bobina ensamblada por un conductor de longitud fija. El traslape de la bobina está determinada por la curvatura del conductor flexible proporcional a la distancia del eje toroidal [Gralnick76].

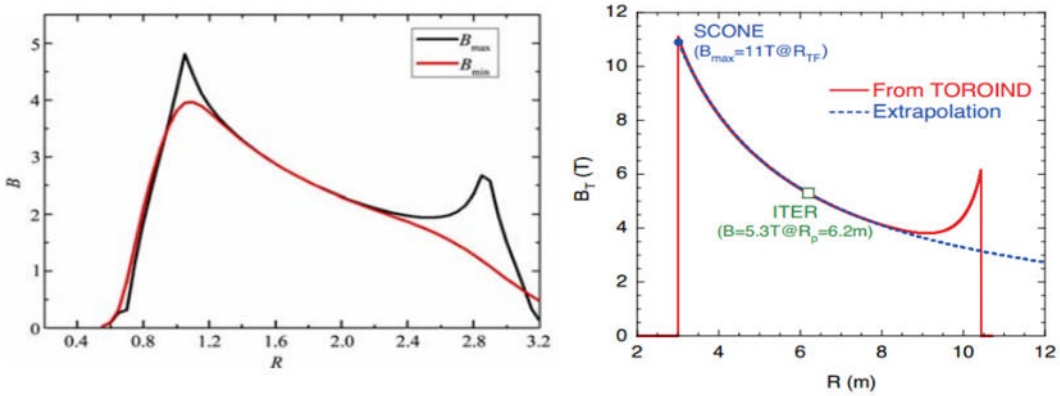


Figura 2.4: Las gráficas izquierda y derecha, corresponden a los estudios realizados con la Ec.2.9, siendo la gráfica izquierda determinada para el HL-2M Tokamak [Yongxing] y la segunda muestra el resultado de un código, para material superconductor en una bobina *D-shaped*, llamado SCONE [Utoh10].

2.1.1. Ripple y dispersión poloidal

La estructura del campo toroidal no es totalmente uniforme, esto es debido a la disposición de las bobinas toroidales, presentando un efecto de onda sinusoidal en la distribución del campo toroidal dicho de otra forma, es la oscilación periódica del campo magnético producida por la existencia de un número finito de bobinas de campo toroidal [Glosario02] (a esto se le conoce como *ripple*: *rizado, corrugación*), para explicar mejor esto podemos introducir el sistema de coordenadas toroidales [Shafranov63, Stacey08].

$$R_t = R + rcos\theta; \;\; z = r \; sen\theta$$

El campo magnético total deberá ser entonces:

$$\vec{B} = (B_\phi \vec{\rho}_\phi + B_\theta \vec{\rho}_\theta) \cdot \frac{R_0}{R} \tag{2.18}$$

Aquí, el componente toroidal B_ϕ puede ser considerado como la suma de un término en estado estable, el cual solo es una función de la coordenada radial (r) y un término que varía, el cual permanece sobre las ondas cada vez que se completa un ciclo toroidal:

$$B_\phi = B_{t0} + \widetilde{B}_\phi \tag{2.19}$$

Siendo entonces la amplitud de los *ripples* (δ), determinados a través de la siguiente ecuación:

$$\delta = \frac{B_{max} - B_{min}}{B_{max} + B_{min}} \tag{2.20}$$

Sí a ello reconocemos que al crear un sistema electromagnético Tokamak se presentan limitaciones bastante estrictas en la amplitud de los campos de dispersión poloidal (B_{str} en inglés, B_{disp} en castellano), y en el nivel de los campos de la corrugación toroidal del campo magnético (B_{ripple} en inglés, B_{rizado} en castellano), y sí normalizamos estos campos por la magnitud del campo magnético toroidal en el eje del plasma B_T, estos requisitos se reducen a los siguientes:

$$\frac{B_{str}}{B_T} \leq 10^{-3}, \quad \frac{B_{ripple}}{B_T} \leq 10^{-2} \tag{2.21}$$

Esto quiere decir que la alineación y construcción de las bobinas poloidales deben ser precisamente generadas ya que el campo de dispersión poloidal B_{str} no debe ser mayor que $1{\times}10^{-3}$, estas limitaciones se especifican a continuación. La presencia de estos campos magnéticos parásitos está asociada con desviaciones en la configuración del campo magnético del caso ideal[Mineev06].

2.1.2. Embobinado

Existen tres tipos de embobinado, se les conoce como: *bobinas con conductor hueco*, *bobinas de tapa de cinta*, y *bobinas de disco*. Las primeras están refrigeradas por un flujo de agua a lo largo del interior del cobre, estas bobinas a menudo se empaquetan por secciones. El refrigerante en una sección de espirales fluye radialmente en el interior. Existe resina epóxica entre las capas del embobinado, que permite mejorar la resistencia mecánica de la bobina.

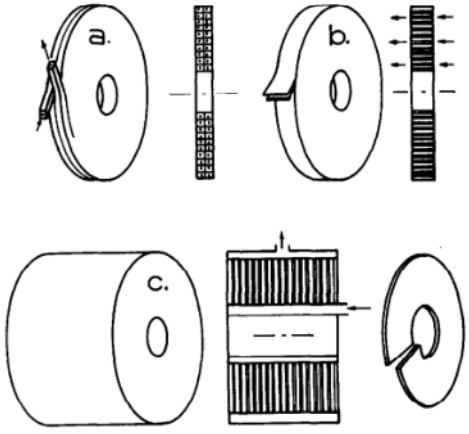


Figura 2.5: Bobinas ejemplos señadala como a) Sección de conductor hueco, b) Tapa de cinta, c) Disco, [Dolan00]

Las bobinas de tapas de cinta, están usualmente refrigeradas por agua fluyendo axialmente a través de pequeñas ranuras en el conductor o en el aislante. Los embobinados están separados por aislamiento plástico o de fibras sintéticas, es el inciso b) de la Fig. 2.5. Las bobinas de disco, nombradas después *Francis Bitter* del Laboratorio Magnético Nacional, pueden ser enfriadas por

un flujo radial a través de ranuras maquinadas en los discos de cobre o por un flujo axial a través de taladros dentro del cobre y los discos de aislamiento es el inciso c) de la Fig. 2.5.

Las bobinas de conductor hueco, son las más comunes, pero los grandes campos pueden obtenerse con las bobinas de tapa de cinta y las bobinas de disco (Bitter), debido al corto camino de su refrigerante, por ejemplo las bobinas Bitter generan cerca de 12 T en el Tokamak Alcator C. El FAST de Italia desarrolló bobinas que parecen una cobra, son superconductoras.

2.2. Mecanismos de transferencia de calor

Un proceso que se observa al establecer una diferencia de potencial sobre un embobinado de cobre y que esto produzca una corriente eléctrica que fluirá de un extremo del conductor a otro será el de: un aumento en la temperatura en cada instante de tiempo para el conductor, este fenómeno está ligado a la oposición del paso de los electrones en cualquier material (resistencia eléctrica) y funge como fuente de calor en el traspaso de energía dentro del sistema. El calor se define como la energía térmica que cede un cuerpo a otro como resultado de la diferencia de temperatura [Cengel07]. La transferencia de calor siempre se sucede del sistema que lleva consigo una temperatura más elevada hacia aquel de temperatura inferior, deteniendo la transferencia de calor al llegar a un equilibrio termodinámico. En nuestros casos de estudio no existirá tal equilibrio termodinámico con el medio ambiente debido a que las simulaciones próximas de calentamiento electromagnético son pulsos de corriente eléctrica en tiempos de corto circuito y será de interés conocer la cantidad de transferencia de calor en el sistema a través de este proceso transitorio y sus respectivas temperaturas en el volumen.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Los modos de transferencia de calor suelen ocurrir de manera natural todo el tiempo. En ocasiones en muchos sistemas experimentales suelen omitirse alguno de estos mecanismos de transferencia de calor para simplificar los cálculos debido a que su aportación de energía térmica en el sistema es mínima comparado con otro modo y en la mayoría de los casos los resultados obtenidos con base a esta simplificación suelen considerarse como aceptables como una buena aproximación. Enseguida se da una breve descripción de cada mecanismo de transferencia de calor.

2.2.1. Conducción

La conducción en la física del estado sólido, depende de una vibración fonónica que va proporciaonal a kT y a la energía cinética, en este caso, los átomos constituidos por nubes de electrones pueden difundir dependiendo de la energía que contienen, si a esto el sistema recibe mayor cantidad de energía, de tal forma que se presente la excitación, esto conducirá a una mayor vibración en el retículo, originando precisamente la mayor transferencia de calor, como resultado de interacciones entre esas partículas. La transferencia de calor puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la transferencia se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas [Cengel07]. La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material de que esté hecho, así como de la diferencia de temperatura a través de él.

En los sólidos la conducción del calor se debe a dos efectos: las ondas reticulares de vibración inducidas por los movimientos de vibración de las moléculas, colocadas en posiciones más o menos fijas de una manera periódica conocida como red cristalina, y la energía transportada por medio del flujo libre de electrones en el sólido [Cengel07]. La conductividad térmica de un sólido se obtiene al sumar la componente reticular y la electrónica, en la obra de Cengel podemos apreciar que las conductividades térmicas más o menos elevadas de los metales puros se deben principalmente a la componente electrónica, y en donde la componente reticular de la conductividad térmica depende con intensidad de la manera en que las moléculas están dispuestas.

Se ha visto que los diferentes materiales almacenan calor en forma diferente y se ha definido la propiedad de calor específico (C_p) como una medida de la capacidad de un material para almacenar energía térmica [Cengel07]. La conductividad térmica de un material (k) se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor en Cengel se explica que un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante. La conductividad térmica del cobre puro a la temperatura ambiente es de 401 $W/m \cdot^{\circ} C$. [Cengel07].

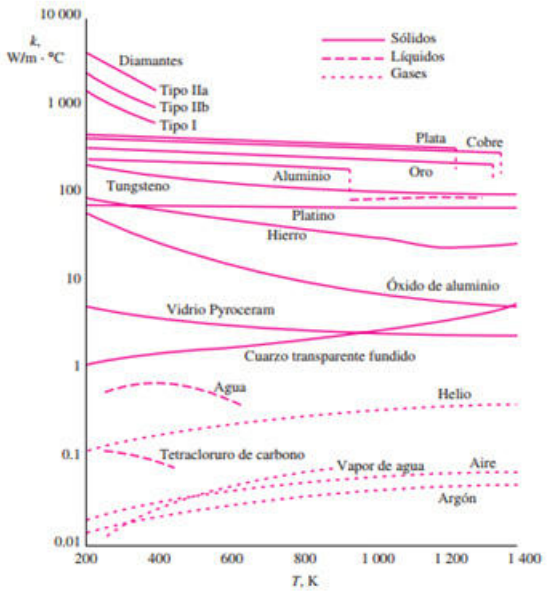


Figura 2.6: Variación de la conductividad térmica para diversos sólidos, gases y líquidos con la temperatura.

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura. La variación de la conductividad térmica sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativa para otros, como se muestra en la Fig. 2.6 Las conductividades térmicas de ciertos sólidos exhiben incrementos sorprendentes a temperaturas cercanas al cero absoluto, cuando estos

sólidos se convierten en superconductores [Cengel07].

La dependencia con respecto a la temperatura de la conductividad térmica causa complejidad considerable en el análisis de la conducción. Por lo tanto, es práctica común evaluar la conductividad térmica (k) a la temperatura promedio y tratarla como constante en los cálculos, razonamiento empleado en Cengel. En el análisis de la transferencia de calor normalmente se supone que un material es isotrópico; es decir, tiene propiedades uniformes en todas direcciones. Esta suposición es realista para la mayor parte de los materiales, excepto para aquellos que exhiben características estructurales diferentes en direcciones diferentes, como los materiales compuestos laminados y la madera. Nosotros tomaremos la conductividad térmica del cobre constante en las simulaciones térmicas.

2.2.2. Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que están en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección, en este sentido intervienen conceptos interesantes como densidad, viscosidad, temperatura ambiente, coeficiente de película y dependiendo de la velocidad del fluido, este puede ser laminar o turbulento.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o el viento [Cengel07]. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido, en este caso, la dinámica del movimiendo del fluido puede representar un gran beneficio para poder elegir un sistema que permita optimizar un proceso con flujo forzado.

A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como [Cengel07]:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T) \tag{2.22}$$

En donde (h) es el coeficiente de transferencia de calor por convección, (A_s) es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección, (T_s) es la temperatura de la superficie y T es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. En la superficie la temperatura del fluido es igual a la del sólido.

2.2.3. Radiación

De acuerdo con Cengel la radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra[Cengel07].

En la transferencia de calor la radiación térmica emitida por los cuerpos debido a su temperatura, es importante.

Las ondas electromagnéticas son energía, un caso muy importante de deposición de energía sobre la materia es la microonda, la cual es capaz de calentar sólidos, líquidos y gases, incluso llevándolos al cuarto estado de la materia: plasma.

En confinamiento inercial la radiación X es capaz de comprimir a la materia en orden del billón de kg/cm^2, el campo de interacción radiación-materia es entonces complejo no basta sólo relacionar términos de potencia emitida con el aspecto termodinámico de la radiación, si no que es importante delucidar la interacción de la radiación (onda electromagnética) que posee una energía por fotón asociado y que es capaz de interactuar con las masas de los elementos en la escala atómica. En esta escala se suceden demasiados eventos que van desde el desplazamiento en sólidos a través de los átomos hasta el vencimiento de las fuerzas de repulsión de Coulomb para generar una reacción termonuclear.

En la presente tesis solamente consideraremos la conducción y convección.

2.2.4. Generación de calor

En un medio a través del cual se transfiere calor puede tenerse la conversión de energía mecánica, eléctrica, nuclear o química en calor (o energía térmica).

En el análisis de la conducción de calor, esos procesos de conversión son caracterizados como generación de calor (o de energía térmica). Por ejemplo, la temperatura de una resistencia de alambre se eleva con rapidez cuando pasa corriente eléctrica a través de ella, como resultado de la energía eléctrica que se está convirtiendo en calor a razón de una potencia disipada de I^2R_e, en donde (I) es la corriente y R_e es la resistencia eléctrica del alambre.

La ecuación general de Fourier-Biot en coordenadas rectangulares con generación de calor y una conductividad eléctrica variable es [Cengel07]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z}) + Q_{gen} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2.23}$$

Donde (x), (y) y (z) son las variables espaciales, T la temperatura, Q_{gen} el calor generado, ρ es la densidad y C_p el calor específico del material.

2.2.5. Consideraciones para el conductor de cobre de las bobinas

Las ventajas de usar el cobre como material para los embobinados son: la abundancia y el conocimiento tecnológico de este material, sus características físicas, entre ellas su conductividad eléctrica, su maleabilidad, su amplio uso en la industria eléctrica y electrónica.

Iniciaremos la metodología en el aspecto geométrico de nuestra instalación ya que de este análisis abarca el área donde se inducirá corriente eléctrica en el conductor de cobre, el perfil que definirá la trayectoria que tome el embobinado y el número de vueltas formando así el conjunto de bobinas "D-shaped" toroidales para el Tokamak "T".

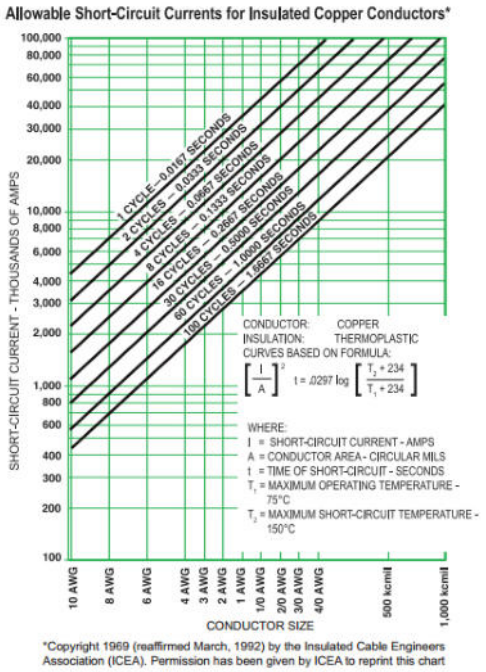


Figura 2.7: Gráfica de el tiempo de corto circuito, tiempo y área del conductor

Debido a la alta cantidad de corriente eléctrica (10, 000 A) que deseamos pasar por el área transversal del conductor se debe tomar en cuenta la elevación de temperatura que impide que el flujo de corriente eléctrica en los embobinados sea de manera constante, existen gráficas que la empresa VIAKON pone a disposición de los investigadores para conocer las relaciones de operación de los cableados de cobre sin repercutir y/o dañar las bobinas (ver Fig. 2.7).

De la gráfica anterior se visualiza que al operar magnitudes de miles de Amperes de corriente eléctrica limita al proceso a trabajar tiempos de corto circuito según se establezca el área del conductor y su número de vueltas por embobinado.

Para la protección del conductor, debemos considerar 3 niveles que son necesarios para alta corriente, el primero de ellos es el aislamiento, la *Asociación de Ingenieros para Cables Aislados*, [ICEA siglas en inglés], ha publicado cartas/gráficas [ICEA] mostrando cuanta corriente y por cuánto tiempo puede empezar a dañarse el aislamiento, el segundo nivel es el recocido, el cual es el punto donde el conductor metálico comienza a recocerse y después del enfriamiento, en las terminales del conductor no existiría suficiente apriete bajo las mismas, por ejemplo, un conductor de cobre se recoce a $250°C$, si ha estado operando y portando suficiente corriente por un tiempo largo tanto así que llegué a reabasar esta temperatura de límite de operación, cuando se le refrigera, el conductor no podrá estar bien apretado en las juntas. Este segundo nivel es importante para la protección del equipo conductor en tierra, el tercer nivel de protección es el punto en el cual el conductor se vaporiza, obviamente no queremos llegar a ese nivel, pues el cobre se vaporiza a $1083°C$. La fórmula usada para los tres niveles es sencilla, y determina cuanta corriente se necesita para cubrir una cierta sección eficaz de cobre de una temperatura a otra.

Para este diseño se visitaron empresas y la que nos entregó información más relevante y que concuerda con la bibliografía consultadas fue VIAKON, pues nos proporcionó la base sobre la cual ellos producen conductores con capacidad de soportar cortocircuitos en un determinado tiempo y a una determinada temperatura, esto por medio de un modelo basado en la experimentación y estándares de calidad del mercado actual. Por lo tanto, hemos decidido basarnos nosotros también en el modelo utilizado por dicha empresa, el cual consiste en la siguiente ecuación:

$$\frac{I^2}{A_{Cond}^2}\, t = 0.0297\; log\; \frac{T_2 + 234}{T_1 + 234} \tag{2.24}$$

Donde (A_{Cond}^2) es el valor del área al cuadrado en 'circular mills', (I^2) el valor de la corriente al cuadrado en Amperes, $(\mathbf{t})$ es el valor de tiempo de corto circuito (segundos), (T_2) y (T_1) los valores de las temperaturas máximas y mínimas de operación del conductor, (150°C) y (75°C), respectivamente. A través de esta ecuación despejamos el valor del área y en nuestros respectivos estudios manejamos corrientes desde los 10,000 hasta los 30,000 Ampere de corriente, específicamente empleando tiempos de corto circuito de 300, 500, 700 ms hasta 1 segundo, se ha considerado la longitud media de la bobina toroidal de 2.87 metros, y al combinar los 4 valores de tiempo de corto circuito y los valores de corriente, hemos determinado una gran cantidad de áreas de conductor que han sido aplicadas en la Ec. 2.8.

La temperatura T_2 debe considerar lo siguiente, para aislamiento termoplástico le corresponde un valor de 150°C, para el recocido éste valor deberá de ser de 250°C y para la vaporización debe considerarse 1083°C.

Debido a que las temperaturas máximas se encuentran definidas podemos adecuar la Ec. 2.24 para nuestro análisis. De esta forma nos aseguraremos que el material de la bobina no sufrirá daños debido a la cantidad de corriente que pasará a través de él, siempre y cuando no excedamos los tiempos de CC, luego entonces suponemos que:

$$R_T = 0.0297\, log[\frac{(T_2 + 234)}{(T_1 + 234)}] \tag{2.25}$$

entonces

$$A_{Cond} = \sqrt{\frac{(I^2\, t)}{R_T}} \tag{2.26}$$

Debemos recordar que las unidades de la Ec. 2.26 están en circular mills (un circular mil equivale al área de un círculo de diámetro de una milésima de pulgada), la equivalencia en el SI es: 1 circular mil= $5.0567 \times 10^{-10} m^2$.

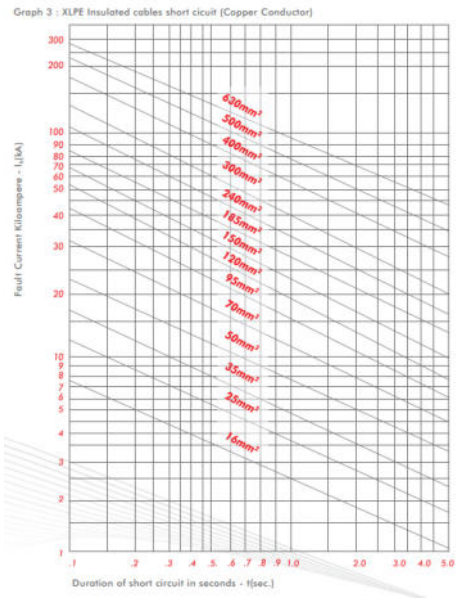


Figura 2.8: Gráfica de tiempos de corto circuito

Con esta información, podremos validar el área de conductor que resulte de los análisis, de tal forma que si el valor de corriente y área de conductor corresponde al valor que arroja este análisis, podremos decir que ese conductor cumple con las normas de calidad actual de una empresa grande de conductores, asegurándonos de esta forma que el conductor será capaz de soportar tales condiciones de operación.

Hemos sido capaces de generar un modelo en 3D-CAD de las bobinas toroidales cumpliendo la geometría y en un arreglo del conductor de tal forma que tiene continuidad en los puertos de entrada, es decir, el conductor está representado en una sola pieza continua; esto es posible debido a que la cantidad de numero de vueltas es pequeño, pero se hace demasiada compleja la geometría conforme aumenta tal característica.

Las gráficas 2.7 y 2.8 muestran que para tiempos de corto circuito de 700 ms, como máximo, se debe diseñar un conductor con un margen mayor en tiempo de operación de 800 a 900 ms, para la descarga, también se muestra en la Fig. 2.8 que para un tiempo de corto circuito de 700 ms, con 10 kA de corriente, el área sería aproximada de 45 mm^2 para el conductor.

El área del conductor, se encuentra gobernada por el valor de la corriente en el tiempo de cortocircuito, un valor de 45 mm^2 puede ser interpretado como un conductor construido en un cuadrado de 6.7082 x 6.7082 mm, o en uno rectangular de 1 x 45 mm, con el consecuente número de vueltas gobernado por el factor de la corriente máxima y el tiempo de corto circuito. Siendo así, es aceptable que para 10,000 A de corriente, con tiempo de corto circuito máximo por diseño de 900 s y con un área que va desde los 45 hasta los 85 mm^2 con un número de vueltas en 25, en promedio, nosotros al punto medio de la bobina toroidal *D-shaped*, podamos encontrar un campo de 1.3 T, suficiente para generar un buen campo magnético sobre nuestro plasma.

2.2.6. Perfil "D-shaped" de la bobina

Con respecto a la trayectoria que seguirán los conductores dentro de las bobinas, los autores FileA, FileB, Raeder76 y DeMichelle73, analizan un caso ideal con bobinas continuas (no uniones eléctricas) expresan el perfil "D-shaped" como una ecuación diferencial:

$$r\frac{\partial^2 r}{\partial z^2} = \pm\frac{1}{k}\left[1+\left(\frac{\partial r}{\partial z}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}} \tag{2.27}$$

Donde (k) es la relación entre el radio externo-interno de la D-shaped, la ecuación permite trabajar el radio (r) en función de la altura (z). Este ecuación presenta grandes dificultades para ser resuelta por algún método de ecuaciones diferenciales, en cambio, una opción que disminuye considerablemente este impedimento y es un método sencillo de llevar a la práctica es solucionar numéricamente la ecuación diferencial con una parametrización que involucra únicamente las dos variables espaciales (r) y (z), un nuevo término (r_a) que describe el valor máximo del eje horizontal que tendrá el perfil "D-shaped" y una variable (α) que se evalúa en una región de [-π, π]. De los trabajos mencionados se resume en el siguiente diagrama de flujo (ver Fig. 2.9) los pasos para graficar el contorno de la bobina que, al establecer inicialmente los parámetros (k) y (r_a), deben coincidir con los parámetros geométricos deseados en la instalación.

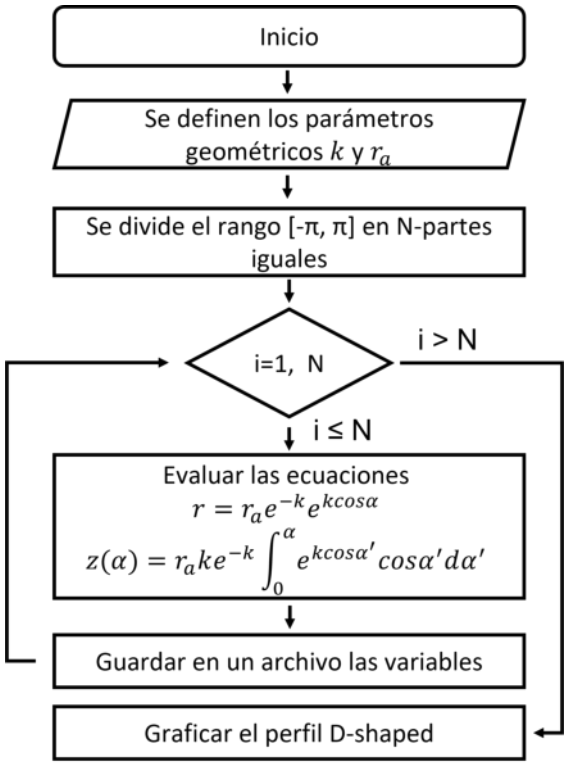


Figura 2.9: Metodología para la D-shaped

Para calcular estas variables (r) y (z) se escribió un código en lenguaje Fortran que emplea este algoritmo matemático estableciendo para (r_a) un valor de 0.91 m y nuestro interés geométrico es que (r_i) inicie en 0.15 m. Después de nuestro programa resuelva las ecuaciones de manera numérica, exporta los valores de las variables y se graficaron en Gnuplot, imprimiendo así N-curvas (ver Fig. 2.10) que geométricamente se acoplan con los valores horizontales extremos de la bobina (r_i) y (r_a).

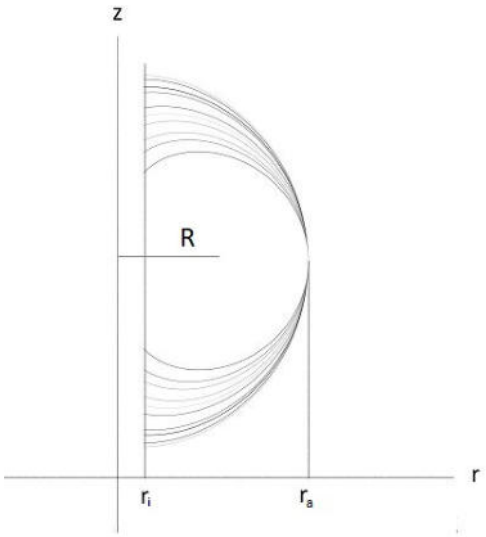


Figura 2.10: Perfiles D-shaped

Con la tabulación de los datos (r) y (z) de una curva presentada en la figura anterior, se traslada al software SolidWorks y esto permite dibujar los contornos 2D con la finalidad de agregar una profundidad y crear los volumenes de los conductores en 3D, asegurándonos que siguen la curvatura 'D-shaped' (ver Fig. 2.11 a)):

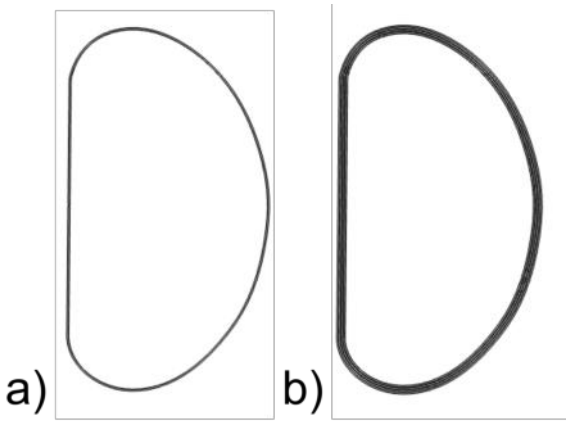


Figura 2.11: a) 1 conductor y b) 24 conductores en una bobina 'D-shaped'

Con la operación 'matriz lineal' en SolidWorks se diseñan los 24 conductores (ver Fig. 2.11 b)) en un arreglo de 6×4 con una separación entre ellos de 2 milímetros. Estos 24 conductores físicamente debe estar encerrados en una bobina (ver Fig. 2.12 a)) y respetando las dimensiones que ocupa una bobina 'D-shaped' en el espacio, se usa la operación de matriz circular rotando 30° sobre el eje vertical resultando 12 ejemplares iguales en el arreglo toroidal (ver Fig. 2.12 b)):

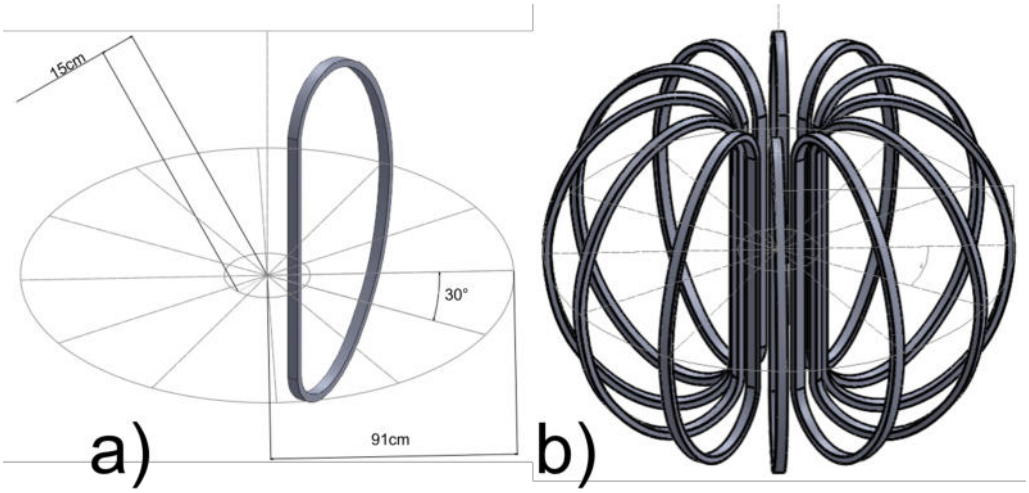


Figura 2.12: a) 1 bobina 'D-shaped', b) configuración final del arreglo toroidal del Tokamak "T"

Este sistema de bobinas es el propuesto para el Tokamak 'T' del Grupo de Investigación en Fusión, la siguiente tabla muestra los valores geométricos y de operación:

Parámetros	Valor
Radio interior (r_i)	0.15 m
Radio exterior (r_a)	0.91 m
Razón de la bobina D-shaped (k)	0.90
Radio mayor (R)	0.41 m
Radio mayor (r)	0.18 m
Razón de aspecto (A)	2.27
Número de vueltas por bobina	24
Número de bobinas	12

Tabla 2.1: Parámetros geométricos del Tokamak "T"

Aquí termina el aspecto geométrico debido a que existe una compatibilidad entre el software de diseño 3D (SolidWorks) con el software donde se emplearán las simulaciones de Elemento Finito (COMSOL Multiphysics) y en cada caso de simulación (electromagnético y térmico) daremos las especificaciones que fueron consideradas para resolver los fenómenos.

2.3. Aspecto electromagnético

Lo que se desea determinar para el modelo electromagnético es la densidad de campo magnético dentro de las bobinas, los valores de campo magnético en ciertos puntos específicos y analizar el efecto "ripple" que indudablemente se tiene en cualquier instalación Tokamak. Para obtener estos resultados en una simulación de este estilo (Elemento Finito) se hace uso del software COMSOL Multiphysics eligiendo el módulo de "campos magnéticos" en un estado estacionario y agregar el estudio de análisis de la geometría.

En un riguroso aspecto físico-matemático se deben contemplar los 24 conductores en las 12 bobinas del arreglo toroidal, establecer en un extremo de cada conductor la terminal para el inicio de la corriente, especificar la "tierra" consiguiendo una diferencia de potencial además de colocar todo el sistema dentro de un volumen de control para efectuar de manera correcta este estudio. Realizar este procedimiento ayuda a conocer el campo magnético inclusive en la separación entre los conductores aunque en la simulación esto implica grandes desventajas como indicar en el software 288 bobinas del estilo númerico (24 conductores x 12 bobinas) y sus respectivas terminales y 'tierra', mayor tiempo de cálculo computacional, entre otras problemáticas.

COMSOL Multiphysics permite trabajar con un volumen sólido para las bobinas y no obligatoriamente trabajar con todos los conductores (contemplando el número total de vueltas por bobinas) evitando los problemas ya mencionados si sólo nos enfocamos en las 12 bobinas que recrean el perfil "D-shaped" considerando que son espiras de varias vueltas homogeneizadas con embobinados del tipo numérico [Cocilovo, Liu13, Lee18] colocando 24 vueltas para cada sólido y proceder a realizar la simulación. Los investigadores que han trabajado con esta metodología han obtenido resultados congruentes y exactos, la diferencia radica en que la generación del campo magnético podrá ser visible y calculable en todo el volumen de control excepto en las zonas entre conductores, para primera aproximación de estudio e interés de esta tesis, podemos aceptar que el trabajo está hecho al conocer el campo magnético en la zona toroidal ignorando el fenómeno magnético relacionado entre conductor-conductor dejando el estudio para futuras investigaciones.

Las ecuaciones que COMSOL Multiphysics resolverá usando el Método de Elementos Finitos para el módulo de campos magnéticos en estado estable son (Ley de Ampere):

$$\nabla \times H = J \tag{2.28}$$

$$B = \nabla \times A \tag{2.29}$$

$$J = \sigma E \tag{2.30}$$

$$J_e = \frac{NI_{coil}}{A_{cond}} \tag{2.31}$$

Donde H es la intensidad del campo magnético [A/m], J es la densidad de corriente [A/m^2], B es la densidad de flujo magnético [T], A es el vector del potencial magnético [Wb/m], σ es la conductividad eléctrica [S/m], E es la intensidad del campo eléctrico [V/m], J_e es la densidad de

corriente generada externamente [A/m^2] (existe debido al análisis de geometría de cada bobina del tipo numérico), N el número de vueltas en el embobinado, I_{coil} es la corriente eléctrica [A], A_{cond} es el área de la sección transversal del conductor [m^2]. Para la relación constitutiva resultante que define la densidad de corriente se generaliza como: J= σ E+ J_e [A/m^2].

Prosiguiendo con los pasos para realizar la simulación, se debe definir el inicio, la trayectoria y la 'tierra' a donde llegará el paso de corriente eléctrica. Para indicarle al software estas 3 regiones se define un plano horizontal en 2D que intersecte las zonas verticales de las bobinas y con la operación "Diferencia" extraer dicho plano consiguiendo una superficie a la misma altura en cada bobina:

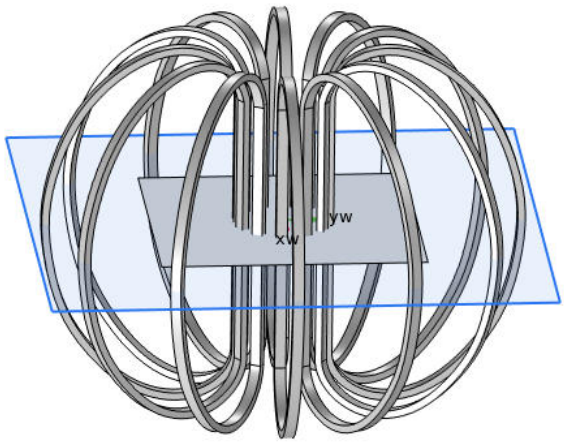


Figura 2.13: Plano en la bobina toroidal.

La nueva cara resultante que quedó en las bobinas "D-shaped" sirve para establecer la terminal (10, 000 A) y COMSOL Multiphysics propone la dirección del flujo de corriente eléctrica (arriba o abajo) que puede ser cambiada a consideración del usuario (ver Fig. 2.14), obligatoriamente debe ser un sólido cerrado (sin hueco alguno) y la 'tierra' se establece como el otro lado de la superficie una vez recorrido todo el perfil.

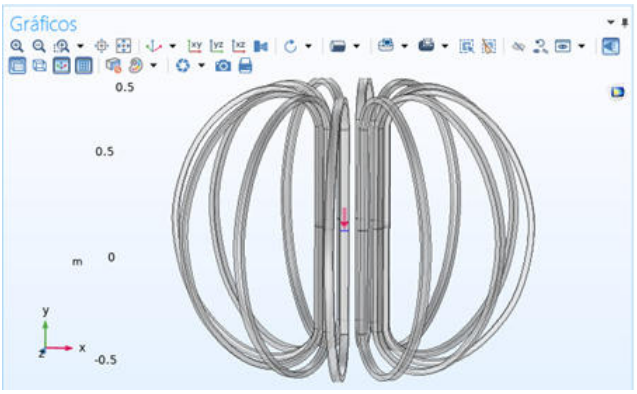


Figura 2.14: Dirección del paso de la corrriente

De la literatura se sabe que los electrones fluirán de un extremo del conductor a otro provocando un campo magnético perpendicular a la dirección de estos, es de nuestro interés que los valores teóricos y de simulación coincidan con el valor de 1.3 T utilizando la ecuación del toroide tradicional [Halliday99].

COMSOL Multiphysics necesita un volumen que encierre el sistema a simular con la intención de limitar en el espacio el cálculo de campo magnético, este volumen esférico fue diseñado con un radio de 1.3 m. El material de los conductores es cobre y el del volumen que encierra estos conductores es aire, ambos con sus propiedades que indica el software.

El mallado de este sistema fue una malla controlada por la física con la característica para el tamaño del elemento “más fina” con 213347 número de elementos en los dominios.

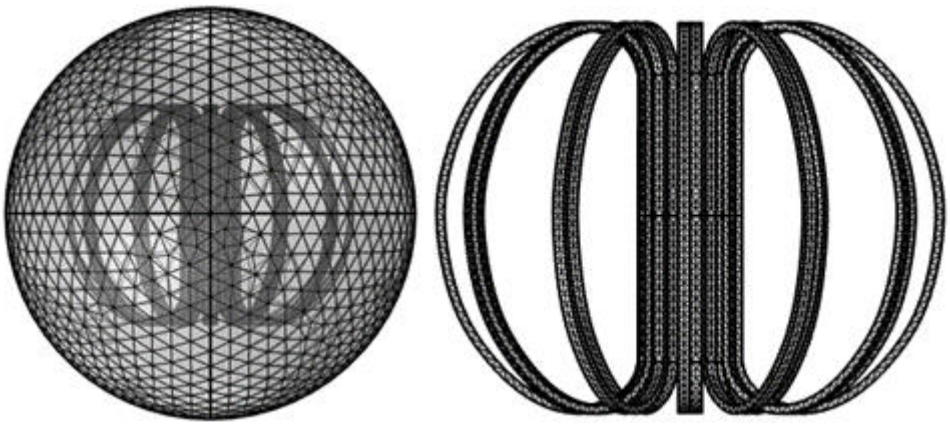


Figura 2.15: a) Mallado en el volumen completo, b) mallado en el arreglo toroidal

Terminando la metodología empleada para el sistema magnético, procediendo a simular lo estipulado.

2.4. Efecto Joule en un conductor “D-shaped” aislado térmicamente

El fenómeno de transferencia de calor en un conductor de cobre aislado del medio ambiente es indispensable ya que se usará la información recabada en estos resultados para comparar este caso con los resultados que se obtendrán con las simulaciones de refrigeración en los conductores.

Para este estudio se contó únicamente con un conductor cuyas superficies impiden la transferencia de calor por convección y obligan a que el fenómeno térmico se dé únicamente dentro del sólido por conducción con la intención de enfocarnos a las temperaturas máximas que llegaría el conductor de cobre en caso de que nuestra instalación operara con cables aislados térmicamente.

Este análisis se emplea para conocer los efectos locales (temperatura y potencia disipada) en el volumen de un conductor y no en el colectivo de los 24 conductores, contemplando que los resultados de este estudio son una muy buena aproximación para los otros 23 conductores en la bobina.

La simulación también se empleará con el software de COMSOL Multiphysics con el módulo de corriente eléctrica y transferencia de calor en sólidos, la combinación de estos permite estudiar el efecto Joule (módulo de calentamiento electromagnético) tomando los parámetros necesarios de cada módulo para llevar a cabo el estudio en estado transitorio. Estos dos módulos en conjunto se engloban la siguiente ecuación al hacer uso de la multifísica "calentamiento electromagnético":

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_e \tag{2.32}$$

Donde (C_p) es la capacidad de calor específica, (ρ) es la densidad del material, (T) la temperatura absoluta, (t) el tiempo, (k) es la conductividad térmica, y (Q_e) representa las pérdidas electromagnéticas como fuente de calor.

La generación de calor la potencia disipada en el sistema ($P = I^2 R_e$ [W]) en el sólido está ligada al choque de los electrones entre si al fluir de un extremo al otro además de la oposición del paso de corriente (resistencia eléctrica del material) que depende del área transversal del punto de partida de la corriente, la longitud a recorrer y la resistividad eléctrica. Esta última se relaciona con la temperatura a la que se encuentre el conductor al inicio del estudio y suele ser uno de los parámetros afectados, este fenómeno para un intervalo aproximado de -100 $°C$ a 400 $°C$ [Halliday99] tiene una tendencia lineal descrito de la siguiente forma $\rho_e = \rho_o(1 + \alpha(T - T_{ref})$ para algunos conductores, en la Tabla 2.2 definimos los valores para el coeficiente de temperatura de resistividad de referencia (α), la temperatura de referencia (T_{ref}) y la resistividad eléctrica del cobre de referencia (ρ_o). Los datos que requerimos es la temperatura final y la potencia disipada en el sistema.

Para el correcto uso del módulo de corriente eléctrica es obligatorio establecer áreas que desempeñen el rol de "terminal" y "tierra" por separado (caso que para otros módulos no es necesario). Se colocó un bloque con una altura de 0.005 m a una altura media de la zona vertical del conductor y procedimos a obtener la diferencia de los volumenes (ver Fig. 2.16 a)) lo que resultó con dos nuevas superficies para asignar el inicio (terminal) y el fin del flujo de electrones (tierra).

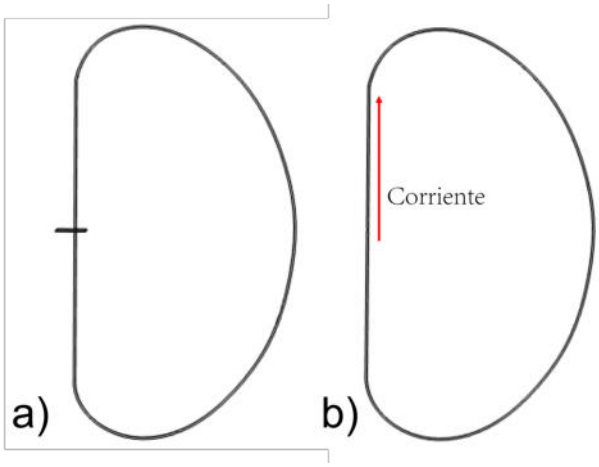


Figura 2.16: a) bloque para corte del perfil, b) dirección de la corriente

Haciendo esta distinción de la "terminal" y "tierra", COMSOL Multiphysics asigna a todo el

perfil del conductor como trayectoria obligatoria en donde deberá fluir la corriente eléctrica en la dirección asignada (ver Fig. 2.16 b)).

Los valores utilizados para la simulación:

Parámetros	Valor
Área del conductor (A_{Cond})	49mm^2
Tiempo de simulación (t)	0.1 a 0.7 s
Corriente eléctrica (I)	10,000 A
Resistividad eléctrica de referencia (ρ_o)	1.667x10^{-8} Ω m
Densidad del cobre (ρ_{cobre})	8,933 kg/m^3
Calor específico del cobre (C_p)	385 J/kg K
Temperatura inicial (T_i)	20 deg C
Coeficiente de temperatura de resistividad (α)	3.862x10$^{-3}K^{-1}$
Temperatura de referencia (T_{ref})	20 deg C

Tabla 2.2: Parámetros simulación de un conductor aislado

Las consideraciones para esta simulación de efecto Joule por conducción son:

1. La densidad y el calor específico del cobre que son constantes en todos los instantes de tiempo.
2. El pequeño corte para la terminal y 'tierra' se considerará despreciable al compararlo con las dimensiones de longitud del conductor.
3. El análisis de transferencia de calor será puramente una simulación de conducción.
4. La resistividad eléctrica variará linealmente con respecto a la temperatura.

2.5. Enfriamiento de las bobinas

Para el estudio actual se contempla el calentamiento electromagnético debido al efecto Joule agregando condiciones en las superficies de convección forzada de un conductor arbitrario del embobinado estableciendo un valor previamente calculado del coeficiente de convección constante (h) aprovechando que lo permite COMSOL Multiphysics para las simulaciones, condiciones que existirán en todo el volumen con excepción en la superficie de la terminal y la tierra.

Antes de describir el método para calcular el coeficiente de convección (h), citaremos los puntos de interés a considerar para el análisis de refrigeración en las bobinas:

1. El fluido pasará entre los conductores dentro de la bobina.
2. Las velocidades del refrigerante a simular son de 0.8, 1.35, 1.9, 2.45 y 3 m/s.
3. Los arreglos a analizar son con 1, 8, 16 y 24 conductores.
4. El refrigerante es agua fluyendo a 10 $^\circ C$

La metodología siguiente a presentar se aplica para cualquier configuración de N-conductores en una bobina. Para hacer un método general de refrigeración para los conductores de cobre mostramos en la Fig. 2.17 un corte transversal de una bobina siendo una propuesta de un acomodo de $(j) \times (i)$ conductores puesto que podemos llegar a una ecuación generalizada para escribir las ecuaciones del área transversal donde pasará el fluido (A_c) y del diámetro hidráulico (D_h) de cualquier configuración que nos interese.

En la Fig. 2.17 se muestran las distancias entre conductores (2 mm) y medidas del conductor de nuestro interés (7 mm x 7 mm) aunque este análisis puede adaptarse a conductores de sección transversal círcular, rectángular y/o con distintas distancias entre conductores y únicamente se harían pequeñas modificaciones en las ecuaciones que involucren parámetros geométricos (diámetro hidráulico y el área del ducto), los demás cálculos no deben presentar cambios significativos. Nuestro caso de mayor interés del Tokamak "T" son 24 conductores en un acomodo de 4×6.

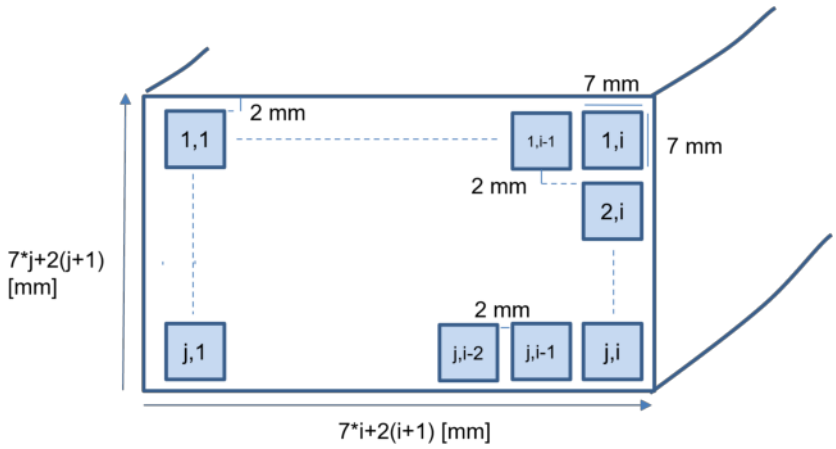


Figura 2.17: N-conductores en una bobina con corte transversal

Por conveniencia veremos el acomodo de los conductores (ver Fig. 2.17) como una matriz en donde los horizontalmente el conteo va de 1 a 'i' y verticalmente de 1 a 'j' en secuencia discreta, el espacio entre conductores es de 2 mm al igual que la distancia entre los conductores exteriores y la bobina. El área del ducto donde pasará el refrigerante se calcula con la diferencia del área transversal de la bobina y la suma del área transversal de los conductores, en otras palabras el área donde fluirá el refrigerante es (en mm^2):

$$A_c = A_T - A_{Tcon} \tag{2.33}$$

Donde (A_c) es el área del ducto, (A_T) el área total de la bobina (calculada multiplicando la base $\times$ altura de la Fig. 2.17) y (A_{Tcon}) es la suma de las áreas transversales de los conductores. Para nuestro caso, el área transversal del ducto donde fluirá el refrigerante es (A_c):

$$A_c = (9j + 2)(9i + 2) - 49ij \tag{2.34}$$

La finalidad de escribir el área del ducto en términos geométricos, es decir, en cantidades de conductores horizontales (i) y verticales (j) es para programar un código en lenguaje Fortran que trabaje con las ecuaciones donde sólo cambie estos valores en las variables correspondientes y facilitar los cálculos para cada caso de estudio. Así el diametro hidráulico del ducto (D_h) (en mm) se define como[Cengel07]:

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \tag{2.35}$$

Siendo (P) el perímetro del ducto en mm. Del arreglo a solucionar (ver Fig. 2.17), podemos determinar que la ecuación que regirá el diámetro hidráulico es:

$$D_h = \frac{2[(9j+2)(9i+2) - 49ij]}{9(j+i)+4} \tag{2.36}$$

Obteniendo ecuaciones que caculan el área del ducto (Ec. (2.34)) y el diámetro hidráulico (Ec. (2.36)) para cualquier configuración horizontal y vertical que se desee.

En nuestra propuesta de enfriamiento para las bobinas se trabaja con tubos no circulares y bajo estas condiciones el diámetro hidráulico (D_h) está vinculado con el número de Reynolds como[Cengel07]:

$$R_e = \frac{\rho v D_h}{\mu} \tag{2.37}$$

Donde (R_e) es el número de Reynolds, ρ es la densidad del fluido, (μ) es la viscosidad dinámica y (v) la velocidad del refrigerante en el ducto.

Debido a que en el sistema queremos implementar la convección forzada para retirar el calor de las bobinas, es importante calcular el número de Prandtl (P_r) para el agua fluyendo como refrigerante a 10 ° C con estas condiciones:

$$P_r = \frac{\mu C_p}{k} = 9.41 \tag{2.38}$$

Donde la viscosidad dinámica (μ) tiene un valor de 1.3 $\times 10^{-3} Ns/m^2$, (C_p) es la capacidad calorífica específica con un valor 4,200 de J/kg K y (k) es la conductividad térmica con un valor de 0.58 W/mK. Estos parámetros son sacados de tablas para la temperatura inicial del fluido[Cengel07].

A partir de aquí se establecen las condiciones del refrigerante y del ducto en la simulación para los conductores debido a que las ecuaciones empíricas que se mostrarán a continuación funcionan para ciertos rangos donde opera nuestro sistema:

1. Se simulará un flujo completamente desarrollado.

2. El ducto donde pasará el fluido es un tubo liso.

Establecido lo anterior, se hará mención las ecuaciones empíricas empleadas para conocer el coeficiente de convección forzada constante (h) en toda las superficies y son válidas para ciertos rangos del Número de Reynolds (Re) y (Pr), estos son:

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \tag{2.39}$$

Siendo (f) el coeficiente de fricción. La ecuación anterior se conoce como la primera ecuación de Pethukov, válidas para rangos de $3 \times 10^3 < Re < 5\times^6$ [Cengel07].

$$Nu = \frac{\frac{f}{8}(Re - 1,000)P_r}{1 + 12.7(\frac{f}{8})^{0.5}(P_r^{\frac{2}{3}} - 1)} \tag{2.40}$$

Donde (Nu) es el número de Nusselt, esta ecuación empírica es la más recomendada para tubos lisos y flujos completamente desarrollados. El rango de validez es para $0.5 \leq P_r \leq 2,000$ y $3\times 10^3 < Re < 5\times^6$ [Cengel07].

$$h = \frac{kNu}{D_h} \tag{2.41}$$

Y por último la ecuación que relaciona la conductividad térmica (k) del agua, el número de Nusselt (Nu) y el diámetro hidráulico (D_h) para calcular el coeficiente de convección promedio (h).

Otros parámetros importantes para la construcción del sistema de refrigeración para el Tokamak "T" y que se calcularon con el programa en Fortran son:

$$\Delta P = f\frac{L\rho v^2}{2D_h} \tag{2.42}$$

$$\dot{V} = A_c v \tag{2.43}$$

$$W_{bomba} = \dot{V}\Delta P \tag{2.44}$$

Siendo (ΔP) la caída de presión, (L) la longitud del conductor, (v) la velocidad del fluido, ($\dot{V}$) el caudal del refrigerante y W_{bomba} la potencia de la bomba necesaria que rige el flujo del refrigerante en el ducto.

El programa en Fortran resuelve todas las ecuaciones presentadas en esta sección para 1, 8, 16 y 24 conductores (y sus distintos acomodos en la bobina) contemplando las distintas velocidades del refrigerante de 0.8, 1.35, 1.9, 2.45 y 3 m/s.

Como conclusión preliminar de este capítulo, hemos observado que un sistema que genera calor consecuencia de una corriente eléctrica en un embobinado puede ser beneficiado con un flujo de fluido de enfriamiento, no se utiliza aire debido a que la generación de temperatura es en el tiempo elevada y por ende necesita un fludio con mayor capacidad de transferencia de calor, además de que los ductos por el que pasa el refrigerante al tener un dimensión puede llevar a un disipación mayor de temperatura si se utiliza agua en vez de aire.

El agua es un refrigerante natural que al ser puesto en circulación con una bomba, presenta las características importantes para absorber y evacuar el calor en espacios reducidos, como es el caso.

La bobina no puede ser expandida en áreas anchas, sino que debe ser compacta para que pueda reforzar la magnitud de campo, debido a ello, es que se presentarán condiciones de trabajo extremas, y el beneficio de emplear agua representa una opción económica y viable para el sistema.

Químicamente el refrigerante en una bobina de campo toroidal debe ser compatible con el aislante del embobinado, y no debe llegar a condiciones de extrema baja temperatura, debido al resquebrajamiento de la misma.

En este caso, gracias a los estudios presentados en el Tokamak Test Fusion Reactor, del Plasma Princeton Physics Laboratory en EE.UU., es que [Smith] indica que el agua por bobinas de cobre puede ser enfriada a 10°C, y entonces en la presente tesis encontramos el impacto posivito de conducir agua a esa temperatura para reducir con mayor eficacia el pico de temperatura de operación alargando así el tiempo de disparos del dispositivo.

Capítulo 3

Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los tres modelos que abarca la tesis para los arreglos de las bobinas D-shaped que involucran los conductores y el refrigerante en la bobina: 1) el modelo electromagnético de las bobinas toroidales de un reactor nuclear de fusión, 2) el modelo de efecto Joule de los conductores de cobre en estado transitorio con transferencia de calor puramente de conducción y 3) las simuaciones del sistema de enfriamiento para los conductores.

3.1. Estudio electromagnético de las bobinas “D-shaped”

En el área de investigación de los sistemas magnéticos toroidales de los dispositivos de confinamiento magnético, cuyo objetivo es el desarrollo de la fusión nuclear a través de reactores como sistemas de potencia es fundamental y necesario el análisis electromagnético y la correspondiente evacuación de calor bien para enfriarle si es un sistema caliente con el empleo del cobre como es el caso en la presente tesis, o bien para refrigerarle (si es un sistema compuesto de materiales superconductores de baja temperatura), a través de esta comprensión se puede mantener la operatividad del sistema. El sistema toroidal es sólo uno de varios sistemas electromagnéticos, es indispensable porque como se ha comentado este sistema es el encargado de generar el campo toroidal en un dispositivo de confinamiento, empero, en conjunto con los sistemas poloidal y las bobinas de campo vertical puede otorgar al plasma una estabilidad.

Una cuestión importante al momento de desarrollar este modelo es que puede ser aplicable a estudios de evacuación en conductores de alta corriente, y sobre todo con la consideración del empleo de tiempos de corto circuito, teniendo en consideración la geometría a refrigerar adecuando las características propias del refrigerante sobre la superficie de los conductores.

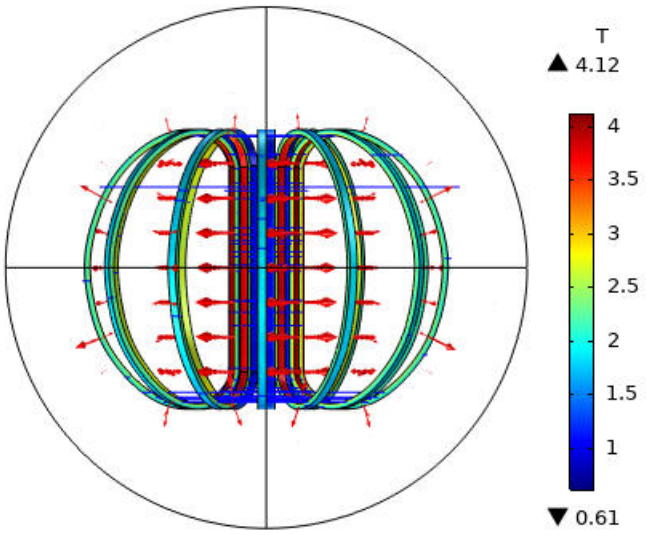


Figura 3.1: Simulación electromagnética del arreglo toroidal horizontal en el Tokamak de Baja Razón de Aspecto “T”

En la Fig. 3.1 se aprecia el resulado de una simulación realizada sobre el arreglo toroidal del sistema para el Tokamak “T” que contempla 12 bobinas de cobre con 24 conductores en cada una (es decir, 288 vueltas), podemos observar que la parte interior de las bobinas cercanas al solenoide central, presentan un valor de campo elevado (cercano a los 4 T).

El software que empleamos para realizar el estudio sobre este arreglo toroidal es el *COMSOL Multiphysics* el cual permite la comprensión del campo magnético en cualquier región que se desee

dentro del desarrollo de un conductor o en este caso bobina. Un punto de interés dentro del área del confinamiento magnético es en el centro del arreglo toroidal y más precisamente de la componente tangencial a dicho punto, debido a la relación perpendicular de la corriente eléctrica y del campo magnético y que se relaciona con el Radio Mayor que es donde se deberá concentrar la columna de plasma.

La simulación electromagnética del arreglo toroidal brinda un panorama más amplio acerca de los campos magnéticos debido al paso de la corriente y como se comporta las ondulaciones (“ripple”) a causa de las bobinas que llevan un espacio entre ellas. Este concepto que en castellano es “rizado”, indica la magnitud de la apertura entre las bobinas toroidales, y dependiendo de ella, se dictamina si es necesario compensar con bobinas poloidales ese espacio.

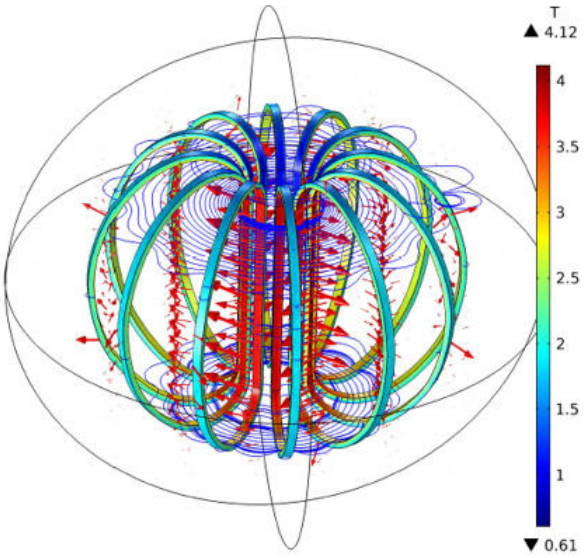


Figura 3.2: Simulación electromagnética del arreglo toroidal en el Tokamak de Baja Razón de Aspecto “T”

En la Fig. 3.3 se muestra con flechas rojas la distribución en todo el espacio de las líneas de campo magnético con un valor en el centro del toroide de 1.4 T, valor esperado que coincide con el calculado de la ecuación tradicional del campo magnético toroidal. Como se ha comentado la generación de campo magnético en un dispositivo de confinamiento de plasmas es extremedamente importante, pero al paso de la generación de campo, viene la generación de temperatura, este es un factor que hay que tener cuidado para la correcta operación del dispositivo, con el empleo de la geometría “D-shaped” y con el empleo de la determinación del área del conductor y del tiempo de corto-circuito es que se ha podido desarrollar el presente estudio.

En dispositivos pequeños y medianos de investigación [Smtoks05] casi siempre el material de las bobinas es cobre, sin embargo, conducir experimentación sobre plasmas de alta densidad y alta temperatura es complejo, debido al calentamiento del sistema magnético toroidal, en el Rector Termonuclear Experimental Internacional (ITER) [TAC-16], el material de las bobinas es un super-

conductor de baja temperatura (NbSn), y la temperatura de operación para la superconductividad es de 4 K, precisándose un ciclo de 2 etapas de refrigeración, el primero que lleve a la máquina de temperatura ambiente a 77 K y el segundo que desde 77 K conduzzca al dispositivo a 4 K.

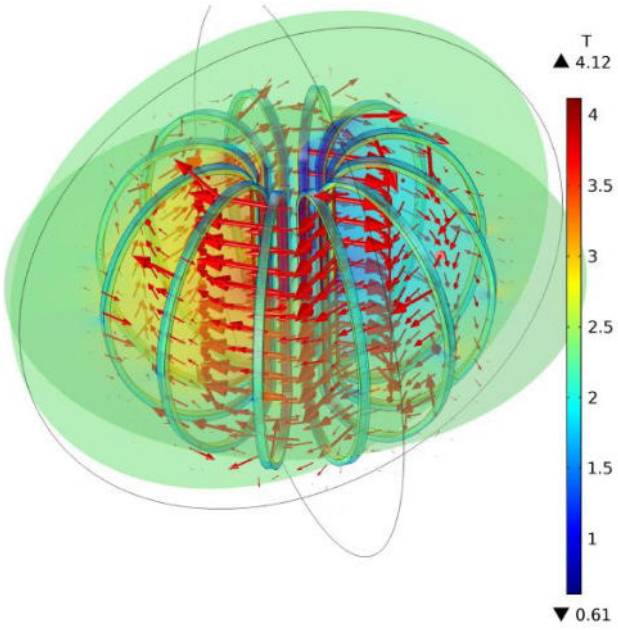


Figura 3.3: Distribución del campo magnético en el sistema de bobinas toroidales del Tokamak de Baja Razón de Aspecto "T"

En estas simulaciones se determinó con el empleo de los tiempos de corto circuito, el área del conductor de cobre capaz de soportar ese amperaje.

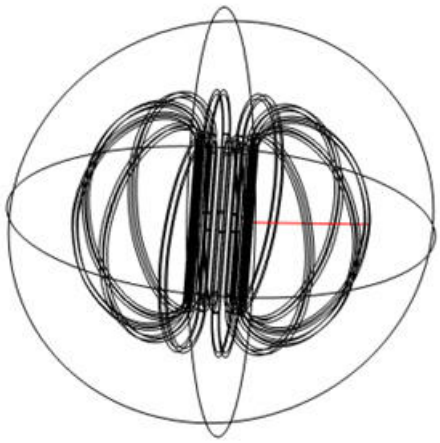


Figura 3.4: Línea para evaluar el campo magnético perpendicular

Distancia radial (cm)	Densidad de flujo magnético (T)
15	-0.5586
23	2.5617
41	1.4000
59	0.9849
91	-1.4032

Tabla 3.1: Densidad de flujo magnético en ciertos puntos de interés

Vemos entonces con franco entendimiento que la temperatura en el sistema toroidal juega un rol fundamental para el incremento de tiempo de confinamiento sobre plasma de alta densidad y temperatura. En la Fig. 3.4 podemos apreciar como se ha decidido crear una línea de 0.16 m a 0.9 m en la dirección radial del toro (línea roja) con el objetivo de graficar esta distancia contra el perfil del flujo magnético el cual es perpendicular al paso de la corriente en las bobinas como se puede apreciar en la Tabla 3.1.

Las ecuaciones de campo que determinan la distribución y sobretodo la objetividad en el cálculo de una bobina D-shaped dependen de la geometría de la bobina, [FileA, FileB, Raeder76, DeMichele73] en este caso, podemos apreciar en el capítulo 2, las diferentes líneas de campo al centro de los respectivos toroides que indican su magnitud. Para el Tokamak de Baja Razón de Aspecto “T”, nuestra línea de campo principal la encontramos en la Fig. 3.5 que se muestra abajo.

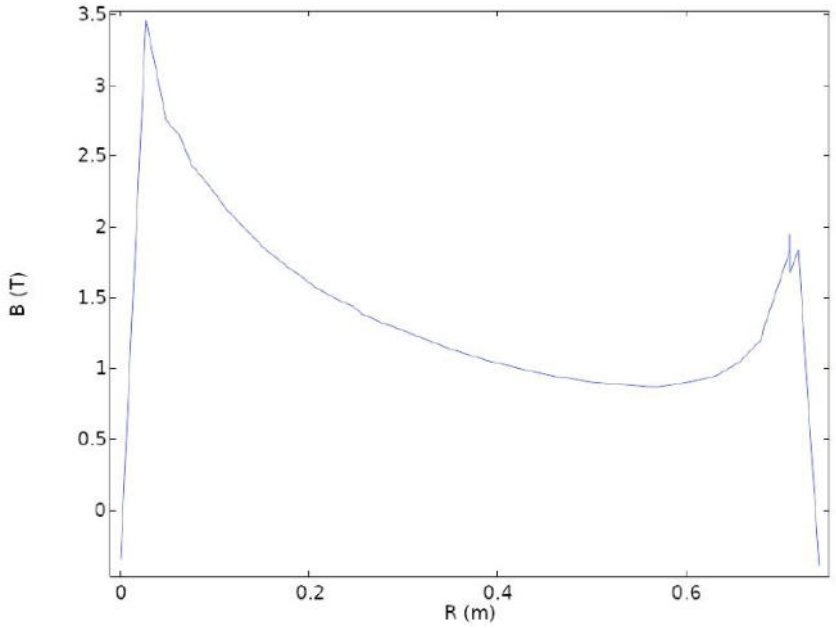


Figura 3.5: Campo magnético vs. distancia radial en la constitución de la cámara de vacío del Tokamak “T” Grupo de Investigación en Fusión FIME-UANL

El campo magnético a través de nuestra geometría, empleando la Ley de Biot-Savart generan la

depencia del campo a través de la distancia (ver Fig. 3.5) debido a que muestra el perfil que toma en la dirección radial y su comparación con el comportamiento teórico de la ecuación tradicional.

En la interacción del conjunto de campos magnéticos en un Tokamak con el plasma es importante conocer los valores en puntos de interés que van desde lo geométrico (zona vertical de la bobina D-shaped) hasta el radio mayor del toroide. En la Tabla 3.1 presentamos ciertas distancias radiales donde son intereses para investigaciones futuras.

Acerca del *ripple* podemos afirmar que esta apertura puede convertirse en un problema si no se tiene la suficiente atención, ya que el plasma rota a gran velocidad dentro de la cámara de reacción de un reactor de fusión, entonces, si en un instante dado la presión térmica del plasma pudiese romper el campo magnético, esta apertura pudiese ser consecuencia para facilitar una disrupción, con el consecuente daño a la pared del reactor.

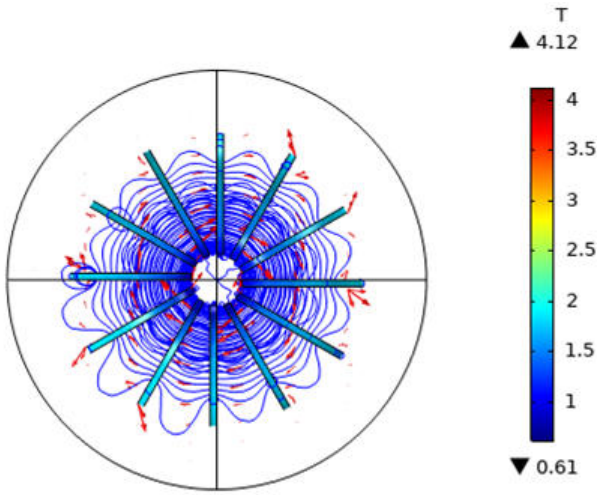


Figura 3.6: Ripple en el sistema toroidal de la cofiguración de 12 bobinas toroidales en el Tokamak de Baja Razón de Aspecto “T”

Las líneas azules representan el campo magnético (ver Fig. 3.6) y representan el efecto del rizado sobre las aperturas de las bobinas toroidales que existen en la configuración, soluciones a esto pueden ser consideradas varias, entre ellas generar una distribución más compacta. Sin embargo aunque la comprensión de la generación de campo es fundamental para el diseño de sistemas de confinamiento toroidales, existe, dentro del óptimo diseño la condición que se presenta al circular una corriente sobre los embobinados, pues crea para la bobina, situaciones a considerar, si es que deseamos que opere y tenga una vida máxima aprovechable, entre los aspectos tecnólogicos inherentes se atiende: la evacuación del calor generado.

Comenzaremos el estudio con el asentamiento de la generación de corriente en un conductor aislado y que dictaminará la corriente máxima que circulará por la bobina sin refrigerante. Lo que a continuación se presenta en la subsección 1.1.1. sienta la base para las consideraciones de la presente tesis y el aspecto termodinámico de la misma.

3.1.1. Resultados del estudio en un conductor aislado

Los resultados del fenómeno de la transferencia de calor en un conductor aislado térmicamente (contemplando la conducción solamente) son cruciales debido a que se puede comprender el comportamiento de las temperaturas a las que llegaría (como en este caso) un embobinado de cobre en cada instante de tiempo, y respecto a todo el volumen, esto puede ser de gran apoyo en casos donde por diversas razones en la operación de una instalación experimental como la que se presenta, se niegue la posibilidad de que la convección exista sobre las superficies de los conductores, sea por *errores/descuidos* humanos y/o las condiciones de enfriamiento no sean implementadas de manera adecuada en la operación de la bobinas. Los resultados de este estudio serán usados más adelante como punto de comparación con los resultados que se obtendrán impementando condiciones de enfriamiento dentro de una bobina toroidal “D-shaped”.

Para el desarrollo del siguiente estudio, se empleó el software *COMSOL Multiphysics* y se abordó la condición de generación de temperatura por paso de corriente en un conductor, esto condujo a la resolución de esta importante condición de diseño, ya que el efecto Joule en un sistema de alta corriente, amerita ser controlado, en el ánalisis se permitió únicamente la conducción como mecanismo de propagación de energía térmica y en breve se describirá los resultados de esta simulación. Se ha mencionado antes que nuestro interés en la instalación del Tokamak “T” radica profundamente en operar en rangos de tiempo de corto circuito y más precisamente en 0.3 segundos, Comsol permite visualizar la temperatura en el conductor con la forma de la bobina “D-shaped” de cobre en el instante de 0.2 y 0.3 segundos (ver Fig. 3.7). En este caso se considera la temperatura en un conductor y gracias a la proyección con el programa, nos permite manejar simulaciones que permitan reducir el empleo de todas las bobinas, el programa evalúa en el volumen el parámetro de la temperatura.

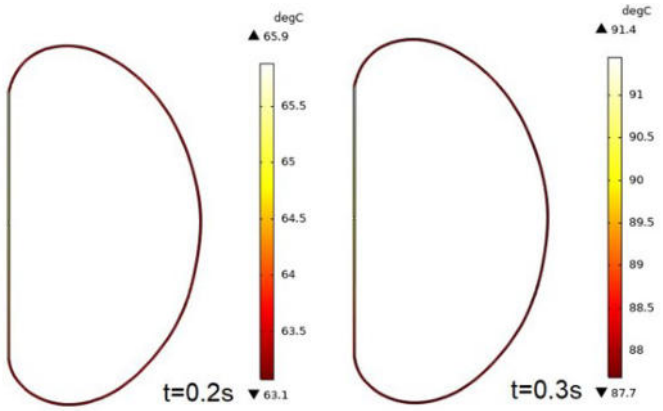


Figura 3.7: Temperaturas en el conductor a 0.2 y 0.3 segundos, siguiendo la geometría “D-shaped”

Para estos casos transitorios (0.2 y 0.3 segundos) y contemplando la resistividad eléctrica del material variando con respecto a la temperatura, se sigue operando en valores que se clasifican como temperaturas considerables para los conductores de cobre, que en otras palabras, no se alcanza los puntos críticos donde existe un cambio de fase o se perjudique el embobinado por recocimiento, siendo la temperatura máxima de operación del cobre $250°C$. Después de la simulación (ver Fig.

3.7) observamos un rango de valores de temperaturas en todo el volumen que, por temas de cuidar el material del embobinado, nuestra atención recae completamente en recopilar los resultados que incluyen las temperaturas máximas en cada instante de tiempo y esto de debe a que en las zonas donde se presenten estas temperaturas serán de mayor importancia implementar el enfriamiento de manera eficiente en la instalación experimental, en la imagen anterior se contempla visualmente gracias a los contornos coloreados que nos hace concluir a primera aproximación en que región se presentan estos valores.

A través del programa COMSOL Multiphysics podemos determinar los “valores máximos del volumen”, se eligió el parámetro de “Temperatura” con la intención de elaborar una tabla que después fue graficada con los valores calculados de las temperaturas máximas en el conductor “D-shaped”’ de cobre aislado térmicamente para cada instante de tiempo en el estudio (de 0.1 a 0.7 segundos):

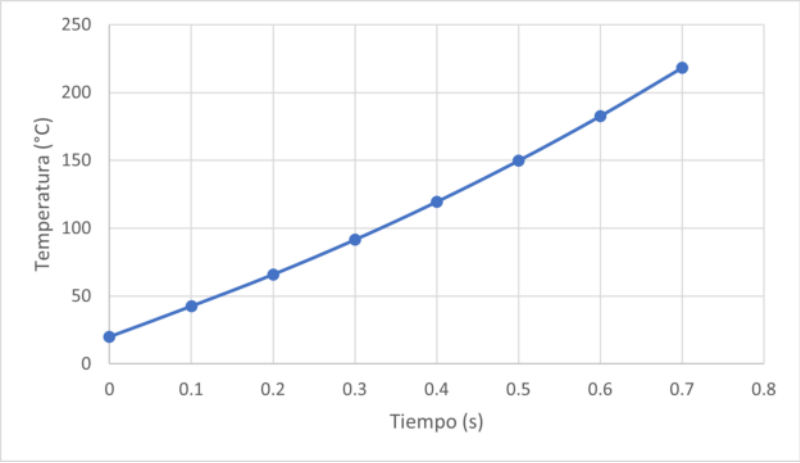


Figura 3.8: Temperaturas máximas en los rangos de operación de corto circuito

Aunque en la gráfica anterior la temperatura máxima no exceda los 250 °C (temperatura en que se ha mencionado anteriormente que se recoce el cobre) no es para nada conveniente estar en valores de temperatura que se encuentren muy cerca de este valor, por lo tanto, se concluye y se recomienda que para este alto amperaje en tiempos de corto circuito se debe implementar un sistema de enfriamiento que, con el trabajo de bombas hidráulicas, se haga fluir un refrigerante (en nuestro caso agua previamente tratada para que ingrese a 10 °C [Smith]) dentro de cada espacio por entre los conductores de cobre y que ayude a evacuar el calor.

Se volverá a hablar sobre estos resultados en la sección siguiente ya que la temperatura máxima en los diferentes pasos de tiempo en el conductor aislado térmicamente da pie a la siguiente hipótesis para ahora buscar establecer las condiciones de un sistema de enfriamiento que implemente la convección forzada en las bobinas al hacer fluir un refrigerante con distintos valores de velocidades entre los conductores en los diferentes arreglos de 1, 8, 16 y 24 conductores por bobina, comparando estos valores de temperaturas máximas del caso de conductores aislados con los que se obtendrán de los conductores cuyo calor disipado fue evacuado de manera eficiente.

Tiempo (s)	Densidad de la pérdida eléctrica en el volumen (kW)
0.1	137.122
0.2	148.296
0.3	160.379
0.4	173.458
0.5	187.604
0.6	202.904
0.7	219.451

Tabla 3.2: Densidad de la disipación de potencia eléctrica en el tiempo de simulación

Otro parámetro importante en las simulaciones que contemplan la combinación de fenómenos electromagnéticos y térmicos es la potencia disipada que es la que afecta directamente al cambio brusco de la temperatura en el conductor. Es importante hacer mención que como la resistividad eléctrica varía con respecto a la temperatura, esta a su vez hace variar la resistencia eléctrica del material, la potencia disipada en cada instante de tiempo también se ve afectada y no puede considerarse constante (por ende la Tabla 3.2 muestra la potencia disipada en el tiempo de operación). Para conocer estos valores en cada instante de tiempo Comsol hace una integración volumétrica considerando todo el sólido para este cálculo. Los datos que arrojó se muestran a continuación:

La máxima temperatura de la simulación sin enfriamiento dejando la corriente fluir libremente sobre la geometría de la bobina, con el área obtenida es de aproximadamente $225°C$, esto indica que sin el enfiramiento adecuado es altamente posible que el conductor dentro de la bobina falle, observése que en la gŕafica 3.8 el tiempo es corto y la temperatura alta, esto es debido al gran amperaje que circula por el conductor. Los resultados del estudio de un único conductor se tomarán como una excelente aproximación la cual, impacta para los otros 23 conductores en la bobina, debido a que se tienen similitudes en parámetros como tiempo de operación, corriente eléctrica, área del conductor, la resistividad eléctrica linealizada, entre otros, algunos parámetros presentan muy poca variación (como lo son las longitudes de los conductores) habrá cambios tangibles en variables como temperatura y potencia disipada que, para practicidad y beneficio del siguiente estudio contempla los efectos en las superficies de la convección forzada, será conveniente analizar a la bobina por la sección recta de ella, la cual es la parte central que se aprecia en la Fig. 3.7, estos conductores largos concentrarán la mayor resistencia eléctrica que se traduce en las potencias disipadas y temperaturas máximas en cada instante de tiempo.

3.2. Estudio de enfriamiento sobre las bobinas “D-shaped”

Uno de los objetivos específicos en la presente tesis, es la implementación al final de nuestro desarrollo de un buen sistema de enfriamiento para las bobinas de campo toroidal, se busca: regular las temperaturas de los conductores de cobre no sobrepasando la temperatura máxima de operación y así evitar que fallen por corto circuito, en este punto debemos hacer enfásis en el concepto de cortocircuito, en la ingeniería eléctrica podemos operar un conductor de cobre con alta cantidad de corriente, determinando el área necesaria para ese amperaje pero con la condición de realizar des-

cargas rápidas de corriente, esto a través de la electrónica de potencia para crear tiempos brevísimos de operación mejor conocidos como tiempos de corto circuito, la otra interpretación del concepto es el que deriva en una falla total del sistema que impide la operación de una máquina eléctrica.

La propuesta con base al punto de vista termodinámico se basa en establecer condiciones óptimas para la evacuación de calor por el fluido, el cual, al estar atravesando los ductos del embobinado, y dependiendo de la velocidad con que fluye, podrá evacuar eficientemente el calor que se consigue por la alta cantidad de corriente eléctrica y a su vez se genere el campo magnético toroidal deseado en las bobinas sin llegar a temperaturas críticas en los conductores.

Se debe entender que para llevar a la práctica el sistema propuesto de enfriamiento, el fluido previamente tratado deberá estar pasando con una velocidad constante en toda la longitud del ducto y la temperatura estipulada (10°C) para mantener las condiciones descritas en la metodología, cumpliendose así los parámetros del número de Prandtl (P_r), el coeficiente de fricción (f), Número de Nusselt (Nu) y el coeficiente de convección promedio (h), después de que en las bobinas esté implementado este constante enfriamiento, proceder a inducir la corriente en las bobinas y con el refrigerante circulando en el contorno D-shaped evacue el calor disipado que los conductores de cobre estarán irradiando a su exterior.

El análisis siguente entonces iniciará con los distintos arreglos en los que pueden acomodarse los conductores en la bobina toroidal, por ejemplo: 8 conductores pueden ordenarse en 2 filas con 4 conductores u 8 filas con 1 conductor, esto ayudará a observar para los distintos casos el coeficiente de convección promedio que se calcula para el sistema. Con la finalidad de limitar los casos de estudio se eligió analizar únicamente los arreglos en múltiplos de la cantidad todal de conductores por bobina (como el ejemplo mencionado anteriormente de los 8 conductores) y eliminar todas las distribuciones del tipo: 8 conductores en 3 filas con 2-4-2 en la bobina respectivamente.

Desde el punto de vista de diseño mecánico el arreglo tiene que ser simétrico pues también existirán fuerzas debido a la energía electromagnética generada en las bobinas, tanto por el paso de la corriente por ella como por la interacción de los campos entre cada bobina como por la interacción con el campo poloidal generado por la columna de plasma. Debido a esto, el arreglo tiene que ser compacto y simétrico.

Después de elegir el adecuado diseño, y gracias al análisis que se efectuará para los arreglos de estudio de 1, 8, 16 y 24 conductores, se mostrarán sus respectivos cálculos para la dterminación del diámetro hidráulico (D_h), área transversal del ducto (A_c), el número de Reynolds (Re), el coeficiente de fricción (f), el coeficiente de convección promedio (h), la diferencia de presión en el ducto (Δ P) y la potencia de la bomba para hacer pasar el refrigerante (W_{bomba}) para las velocidades propuestas del fluido.

Antes de pasar a las siguientes subsecciones se hace mención que no descartamos la posibilidad de emplear este método para cualquier tipo de configuración de conductores, puede usarse haciendo pequeños cambios en la ecuación del diámetro hidráulico ya que sólo varía en los aspectos geométricos, la física y las ecuaciones de los demás parámetros debe respetarse como la presentamos. Veremos a continuación la variación de los parámetros por diferentes valores de diámetro hidráulico (D_h) y el área transversal del ducto (A_c).

3.2.1. Un conductor en la bobina toroidal

El diseño de las bobinas toroidales en la parte interna, contempla un espaciamiento por el cual el líquido de enfriamiento puede fluir y evacuar el calor rodeando al conductor, simplificamos el estudio con la siguiente consideración: en un conductor eléctrico de la bobina toroidal no existen configuraciones distintas para su acomodo en el embobinado, con este asunción, no se creará distinción alguna sobre las configuraciones a estudiar, y esto nos ayudará a tener un área de investigación sobre cada tipo de arreglo de conductores que nos permitirán realizar comparaciones respecto a la temperatura y calor evacuado, determinando por la termodinámica, aquella que resulte más idónea para el diseño del sistema toroidal, así que, una vez establecido este criterio, sólo nos enfocaremos en calcular las variables mencionadas en la sección anterior y concluiremos con el arreglo ideal para emplearlo en la práctica y posteriormente en las simulaciones de COMSOL Multiphysics. El caso de estudio para un conductor en la geometría "D-shaped" en la bobina de campo toroidal es el siguiente:

Empleando la ecuación 2.36 del diámetro hidráulico (D_h) para un conductor de cobre en una bobina obtenemos un valor de $6.54x10^{-3}$ m y la ec. 2.34 para el área transversal del ducto donde pasa el refrigerante (A_c) es $7.2x10^{-5}m^2$. Lo siguiente en la metodología implementada es usar esta información para conocer los parámetros faltantes a través de las ecuaciones mencionadas en el capítulo pasado (las ecuaciones 2.37, 2.39, 2.41, 2.42 y 2.44), se presenta en la siguiente tabla que agrupan parámetros importantes para la presente investigación:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	4,027.97	0.0413	13,054.73	7,600.73	0.44
1.35	6,797.2	0.0352	21,268.26	18,417.91	1.79
1.9	9,566.43	0.0319	28,471.07	33,049.92	4.52
2.45	12,335.67	0.0297	35,111.59	51,214.75	9.03
3	15,104.9	0.0281	41,375.73	72,724	15.71

Tabla 3.3: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para 1 conductor.

Para este inicio de la implementación del método de evacuación de calor, la sección blanca que se aprecia en la Fig. 3.9, representa el lugar donde se acomoda el conductor de cobre que en este caso tiene unas dimensiones de: $7mm \times 7mm$ y la parte gris que lo envuelve es el espacio por donde fluye el agua, es un ducto que rodea por sus 4 lados al conductor y tienen como dimensión por cada lado: 2 milimetros en cada dirección (es decir, un ducto que tiene una altura y base de $9mm \times 9mm$ con un hueco en la parte central respetando el área del conductor).

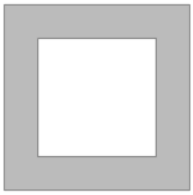


Figura 3.9: Sección transversal del ducto establecido para un conductor

La relación de la velocidad del fluido de enfriamiento circulando en la bobina y que se relaciona con el coeficiente de convección promedio es el siguiente:

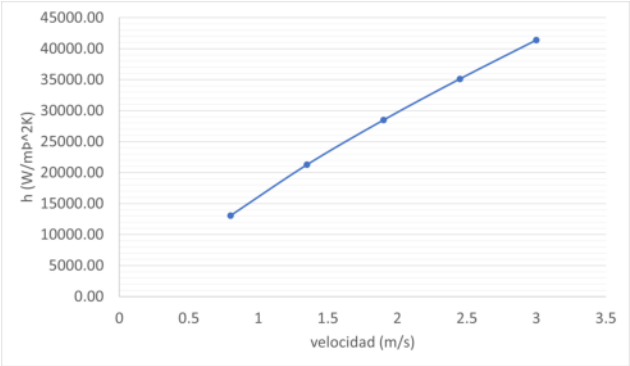


Figura 3.10: El coeficiente de convección para 1 conductor en la bobina para distintas velocidades.

De la curva anterior se concluye que la velocidad del agua fluyendo es proporcional al coeficiente de convección promedio obtenido de la Ec. 2.41 y conforme el valor de la velocidad se incremente, la transferencia de calor por convección será más eficiente. De igual manera el análisis para el coeficiente de convección promedio puede verse desde la perspectiva de la potencia necesaria de la bomba que influye directamente con las condiciones de entrada del fluido:

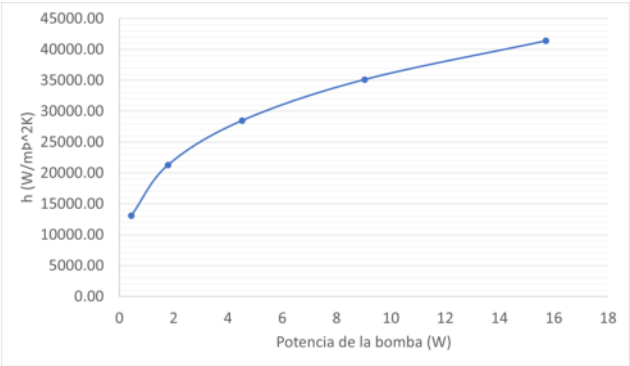


Figura 3.11: La potencia de la bomba para 1 conductor en la bobina

Si de antemano se cuenta con un sistema de bombas hidráulicas la información anterior ayuda a poder aproximar el valor de (h) que existirá en el sistema.

Los datos de la Tabla 3.3 serán usados para la simulación del calentamiento electromagnético con condiciones de enfriamiento al no existir otra configuración de como se pueda acomodar un conductor en la bobina, aceptaremos estos resultados como los más prácticos y pasaremos al siguiente caso de estudio de 8 conductores.

3.2.2. 8 conductores en la bobina toroidal

Para este caso de estudio el arreglo de los conductores en múltiplos dan 2 configuraciones diferentes: 4×2 y 8×1. Analizaremos los dos casos para al final compararlos entre ellos y elegir el que consideremos la mejor opción.

El arreglo de 8×1 conductores

La geometría de la sección transversal de esta configuración de 8 conductores horizontales en una fila es la siguiente:

Figura 3.12: Sección transversal del ducto establecido para 8×1 conductores

De este arreglo en el diámetro hidráulico (D_h) se obtuvo $9.92x10^{-3}m$ por la Ec. 2.36 y con la Ec. 2.34 se calculó el área transversal del ducto donde pasa el refrigerante (A_c) igual a $4.22x10^{-4}m^2$. Los resultados obtenidos por las ecuaciones presentadas anteriormente en la metodología y que son de interés para el sistema se presentan en la siguiente tabla:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	6,110.41	0.0363	12,758.65	4,401.38	1.49
1.35	10,311.31	0.0312	19,975.3	10,769.85	6.14
1.9	14,51222	0.0284	26,408.15	19,434.71	15.58
2.45	18,713.12	0.0266	32,387.46	30,232.46	31.26
3	22,914.03	0.0253	38,056.5	43,053.51	54.51

Tabla 3.4: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 8×1 conductores.

Arreglo de 4×2 conductores

Para esta configuración de 4 conductores horizontales en 2 filas, se tiene:

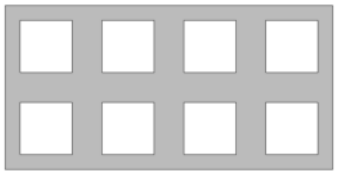


Figura 3.13: Sección transversal del ducto establecido para 4x2 conductores

El diámetro hidráulico (D_h) con la Ec. 2.36 es $1.26x10^{-3}m$ y empleando la Ec. 2.34 el área transversal del ducto donde pasa el refrigerante (A_c) es de $3.68x10^{-4}m^2$.

Usando las ecuaciones 2.37, 2.39, 2.41, 2.42 y 2.44 obtenemos para este sistema:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	7,809.02	0.0338	12,371.09	3,203.04	0.94
1.35	13,177.72	0.0292	19,111.06	7,878.54	3.91
1.9	18,546.42	0.0267	25,162.05	14,260.15	9.97
2.45	23,915.12	0.0250	30,807.11	22,229.02	20.04
3	29,283.82	0.0238	36,171.68	31,705.35	35

Tabla 3.5: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 4×2 conductores.

Con la información de las dos tablas obtenidas para los arreglos de 8×1 y 4×2, graficamos el coeficiente de convección promedio en relación con la velocidad del fluido que pasará entre los conductores en las bobinas, ver Figuras 3.14 y 3.15.

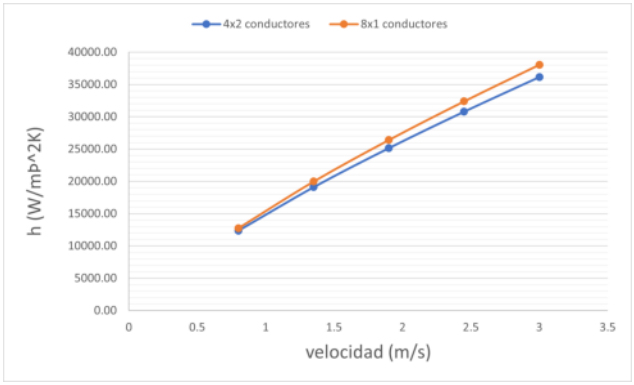


Figura 3.14: El coeficiente de convección para los arreglo de 8 conductores en la bobina para distintas velocidades.

Además de graficar la potencia de la bomba necesaria en relación con coeficiente de convección promedio (h) en ambas configuraciones de los conductores:

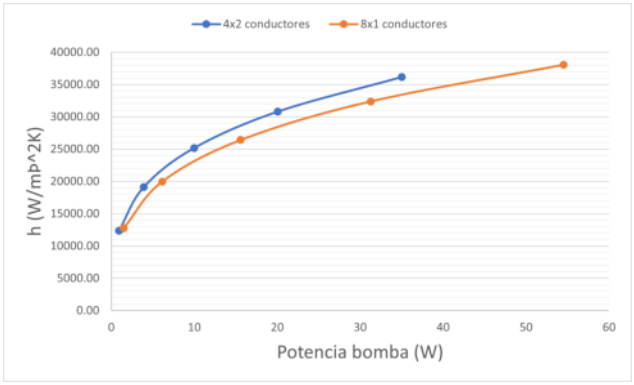


Figura 3.15: La potencia de la bomba para 8 conductores en la bobina

Se ve en la Fig. 3.14 que no difieren grandemente en los valores del coeficiente de convección promedio entre los distintos arreglos y en la Fig. 3.15 se observa que una configuración más horizontal (8×1 conductores) que compacta (4×2) es necesario una potencia de bomba hidráulica mayor y esto pudiera ser un problema contemplando las 12 bobinas toroidales que tiene el Tokamak “T”. El arreglo que se asume como el ideal depende de lo compacto (relación base y altura) de la bobina contemplando los conductores y el ducto para el fluido, por ello, será indispensable trabajar para las simulaciones con el arreglo y datos obtenidos para la configuración de 4×2 conductores en la bobina.

Lo compacto de la bobina entonces sí representa un amplio beneficio en aspectos mecánico-eléctricos, como se ha comentado anteriormente la fuerza del campo, en primer lugar, la concentración de calor sobre geometrías determinadas para con mayor facilidad evacuarle, el empleo de un refrigerante sobre un sistema de alta temperatura, el tiempo de operación y la seguridad del personal como del mismo dispositivo.

3.2.3. 16 conductores en la bobina toroidal

Para este caso de estudio el arreglo de los conductores en múltiplos dan 3 configuraciones diferentes: 1×16, 8×2 y 4×4 conductores en la bobina. Analizaremos los tres casos para al final compararlos entre ellos y determinar cual es la mejor opción para simular.

El arreglo de 16×1 conductores

Para el primer arreglo de 1×16 conductores en la bobina se tiene un diámetro hidráulico (D_h) con la Ec. 2.36 un valor de $1.04x10^{-3}m$ y el área del ducto para el refrigerante (A_c) con la Ec. 2.34 igual a $8.22x10^{-4}m^2$. Esta configuración se ve como se presenta a continuación:

Figura 3.16: Sección transversal del ducto establecido para 16×1 conductores

Las variables que definen este modelo están expuestas en la siguiente tabla:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	6,443.9	0.0357	12,684.07	4,107.6	2.7
1.35	10,874.08	0.0308	19,791.66	10,062.66	11.17
1.9	15,304.26	0.028	26,137.92	18,170.72	28.38
2.45	19,734.45	0.0262	32,041.8	28,279.24	56.95
3	24,164.63	0.0249	37,642.33	40,285.91	99.35

Tabla 3.6: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 1×16 conductores.

El arreglo de 8×2 conductores

Para el segundo arreglo se tiene un diámetro hidráulico (D_h) con la Ec. 2.36 un valor de $1.48x10^{-2}m$ y el área del ducto para el refrigerante (A_c) igual a $6.96x10^{-4}m^2$ usando la Ec. 2.34. La configuración de este arreglo es la siguiente:

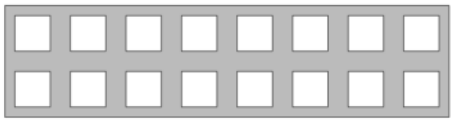


Figura 3.17: Sección transversal del ducto establecido para 8×2 conductores

Se muestra en la siguiente tabla los datos de esta configuración:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	9,112.93	0.0323	12,083.15	2,625.68	1.46
1.35	15,378.07	0.028	18,554.29	6,478.45	6.09
1.9	21,643.21	0.0256	24,386.06	11,747.11	15.53
2.45	27,908.35	0.0241	29,837.44	18,334.38	31.26
3	34,173.49	0.0229	35,024.59	26,174.83	54.65

Tabla 3.7: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 2×8 conductores.

El arreglo de 4×4 conductores

Para el último arreglo se tiene un diámetro hidráulico (D_h) usando la Ec. 2.36 con un valor de $1.73x10^{-2}m$ y el área del ducto para el refrigerante (A_c) usando la Ec. 2.34 es igual a $6.6x10^{-4}m^2$. Los valores empleando las ecuaciones 2.37, 2.39, 2.41, 2.42 y 2.44 son:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	10,688.26	0.0309	11,763.86	2,140.64	1.13
1.35	18,036.44	0.0269	17,978.59	5,297.9	4.72
1.9	25,384.62	0.0246	23,598.74	9,623.64	12.07
2.45	32,732.8	0.0231	28,861.99	15,038.68	24.32
3	40,080.98	0.0221	33,876.15	21,489.71	42.55

Tabla 3.8: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 4×4 conductores.

Esta configuración de 4 filas con 4 conductores cada uno se presenta a continuación:

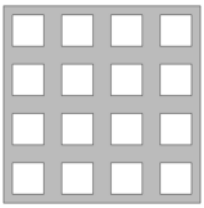


Figura 3.18: Sección transversal del ducto establecido para 4×4 conductores

Para las tres configuraciones mencionadas, hacemos la comparación de la velocidad del fluido y el coeficiente de convección promedio:

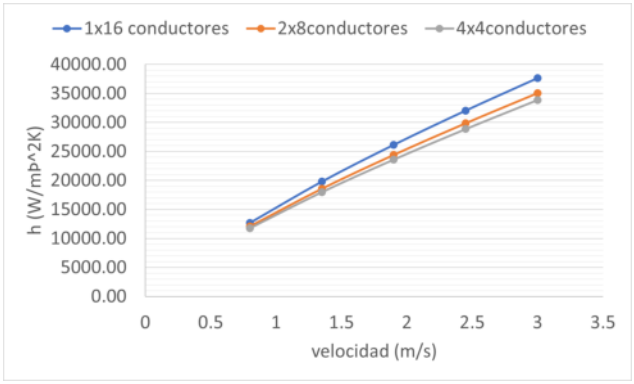


Figura 3.19: El coeficiente de convección para los arreglo de 16 conductores en la bobina para distintas velocidades.

La potencia de la bomba necesaria para implementar estos sistemas y su relación con el coeficiente de convección:

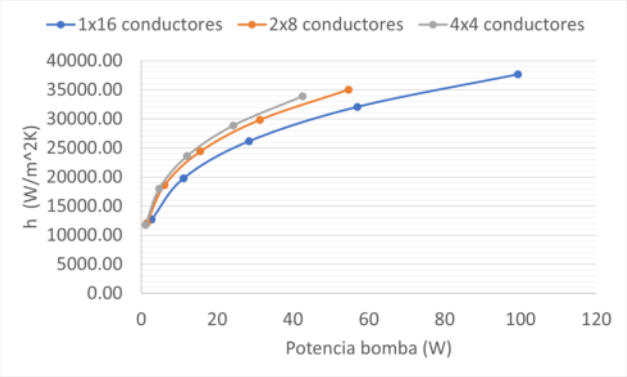


Figura 3.20: La potencia de la bomba para 16 conductores en la bobina

Vemos en la gráfica anterior que mientras más compacto sea el arreglo de los conductores (4×4 el más óptimo) la potencia de la bomba tiende a ser mínima y complementa al beneficio de no trabajar con bobinas con una muy desproporcional comparandose con la anchura de la misma sin tener un cambio notable en el valor del coeficiente de convección promedio que está relacionado con la transferencia de calor por convección forzada.

3.2.4. 24 conductores en la bobina toroidal

Para último caso de estudio el arreglo de los conductores en múltiplos dan 4 configuraciones diferentes: 1×24, 12×2, 8×3, 6×4 conductores en la bobina. Analizaremos los cuatro casos para al final compararlos entre ellos y determinar la opción más beneficiosa para las simulaciones.

El arreglo de 24×1 conductores

Para el primer arreglo de 24×1 conductores, se tiene un diámetro hidráulico (D_h) con un valor de $1.06x10^{-2}m$ usando la Ec. 2.36 y el área del ducto para el refrigerante (A_c) igual a $1.22x10^{-3}m^2$ con el uso de la Ec. 2.34. Esta configuración se presenta a continuación:

Figura 3.21: Sección transversal del ducto establecido para 24×1 conductores

Los valores de los parámetros para este caso de estudio:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	6,567.69	0.0355	12,655.95	4,007.37	3.92
1.35	11,082.97	0.0306	19,725.31	9,821.15	16.2
1.9	15,598.26	0.0279	26,041.11	17,738.84	41.19
2.45	20,113.54	0.0261	31,918.41	27,611.61	82.67
3	24,628.82	0.0248	37,494.76	39,339.65	114.22

Tabla 3.9: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 1×24 conductores.

El arreglo de 12×2 conductores

Para el segundo arreglo de 12×2 conductores, se tiene un diámetro hidráulico (D_h) con un valor de $1.5x10^{-2}m$ empleando la Ec. 2.36 y el área del ducto con la Ec. 2.34 para el refrigerante (A_c) igual a $1.024x10^{-3}m^2$. Esta configuración se presenta a continuación:

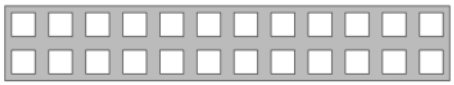


Figura 3.22: Sección transversal del ducto establecido para 12×2 conductores

Los valores de esta configuración utilizando las ecuaciones anteriormente expuestas son:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	9,694.68	0.0318	11,961.36	2,425.31	1.99
1.35	16,359.77	0.0275	18,330.6	5,991.27	8.28
1.9	23,024.86	0.0252	24,078.56	10,871.37	21.15
2.45	29,689.94	0.0237	29,455.57	16,975.76	42.59
3	36,355.03	0.0226	34,574.4	16,975.76	74.48

Tabla 3.10: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 2×12 conductores.

El arreglo de 8×3 conductores

Para el tercer arreglo de 8x3 conductores, se tiene con la Ec. 2.36 un diámetro hidráulico (D_h) con un valor de $1.8x10^{-2}m$ y con la Ec. 2.34 el área del ducto para el refrigerante (A_c) igual a $9.7x10^{-4}m^2$. Esta configuración se presenta a continuación:

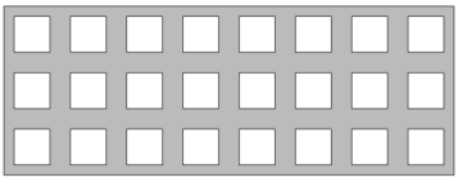


Figura 3.23: Sección transversal del ducto establecido para 8×3 conductores

Para este arreglo de 8×3 conductores en la bobina tenemos los siguientes datos:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	11,590.74	0.0302	11,595.86	1,930.26	1.5
1.35	19,559.38	0.0263	17,687.57	4,784.45	6.27
1.9	27,528.01	0.0241	23,205.33	8,698.61	16.03
2.45	35,496.64	0.0227	28,377.18	13,601.41	32.32
3	43,465.28	0.0216	33,307.05	19,444.83	56.58

Tabla 3.11: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 3×8 conductores.

El arreglo de 6×4 conductores

Para el último arreglo de 6×4 conductores, se tiene con la Ec. 2.36 un diámetro hidráulico (D_h) con un valor de $2.02x10^{-2}m$ y con la Ec. 2.34 el área del ducto para el refrigerante (A_c) igual a $9.52x10^{-4}m^2$. Esta configuración se presenta a continuación:

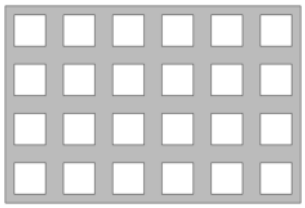


Figura 3.24: Sección transversal del ducto establecido para 6×4 conductores

Empleando las ecuaciones 2.37, 2.39, 2.41, 2.42 y 2.44, los parámetros de esta configuración son:

v (m/s)	Re	f	h (W/m^2 K)	Δ P (Pa)	W_{bomba}
0.8	12,464.81	0.0296	11,443.01	1,759.6	1.34
1.35	21,034.37	0.0258	17,428.21	4,367.21	5.61
1.9	29,603.93	0.0237	22,856.91	7,946.18	14.37
2.45	38,173.49	0.0223	27,949.04	12,431.55	29
3	46,743.05	0.0213	32,805.29	17,779.55	50.78

Tabla 3.12: Datos obtenidos del programa en FORTRAN para el arreglo de 4×6 conductores.

Para estas configuraciones presentadas, exponemos en una gráfica la relación de velocidad del refrigerante ante el coeficiente de convección promedio para cada caso:

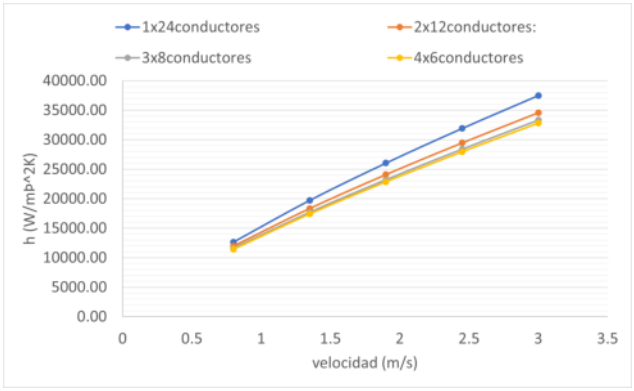


Figura 3.25: El coeficiente de convección para los arreglo de 24 conductores en la bobina para distintas velocidades.

Así como a su vez la capacidad de la bomba necesaria y su relación con el coeficiente de convección promedio para cada arreglo:

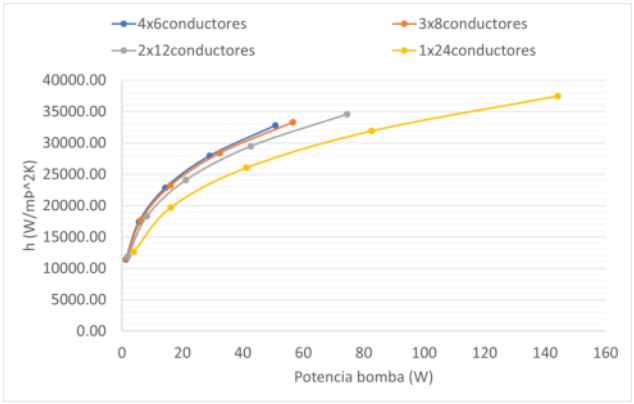


Figura 3.26: La potencia de la bomba para 24 conductores en la bobina

Vemos en la gráfica anterior que mientras más compacto sea el arreglo de los conductores (6×4 el más óptimo) la potencia de la bomba tiende a ser mínima y complementa al beneficio de no trabajar con bobinas con una muy desproporcional comparandose con la anchura de la misma además de que el valor sería para una sóla bobina y en el Tokamak “T” se tienen 12 bobinas toroidales (así que sería estos valores multiplicado por 12).

A partir de aquí, mencionar que para 8 conductores se establece como los arreglos más idealos el de 4×2, para 16 conductores el de 4x4 y para el 24 conductres, el arreglo de 6×4. El “Efecto Joule” en las siguientes gráficas se entiende como el conductor completamente aislado térmicamente del ambiente y la única transferencia de calor que existe es por conducción. Analizaremos para cada caso de número de conductores (1, 8, 16 y 24) la relación de la temperatura máxima en los conductores con respecto a las distintas velocidades a las que estará el fluido en los ductos.

Primero mostramos las temperaturas máximas para caso para 1 conductor en tiempos de corto circuito con la condición en las superficies del coeficiente de convección (h) obtenidos (mostrado en la tabla 3.3 para cada caso de velocidad del refrigerante) que simula la convección forzada en una ducto interno:

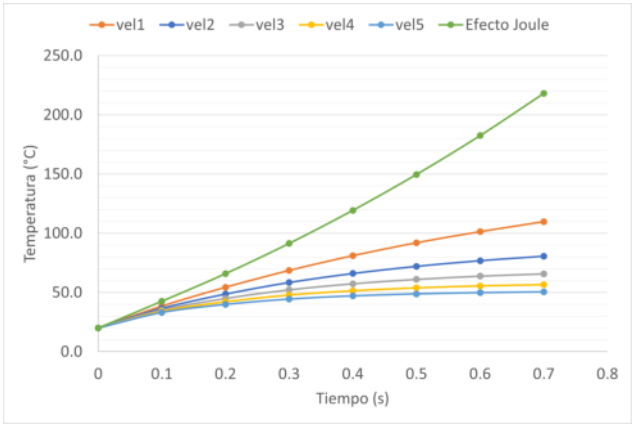


Figura 3.27: Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 1 conductor en el proceso transitorio

Para el siguiente arreglo de 8 conductores establecimos el caso de interés de 4×2 y resueltas las simulaciones de enfriamiento obtuvimos las temperaturas máximas en los tiempos de corto circuito con la condición en las superficies del coeficiente de convección (h) obtenidos (mostrado en la tabla 3.5 para cada caso de velocidad del refrigerante) que simula la convección forzada en una ducto interior:

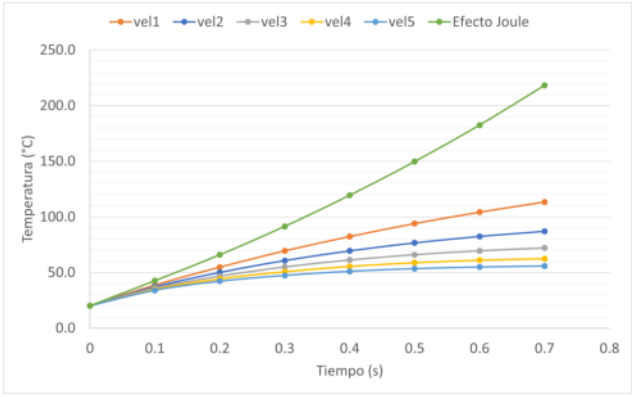


Figura 3.28: Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 8 conductores en el proceso transitorio

Para el siguiente arreglo de 16 conductores establecimos el caso de interés de 4×4 y resueltas las simulaciones de enfriamiento obtuvimos las temperaturas máximas en los tiempos de corto circuito con la condición en las superficies del coeficiente de convección (h) obtenidos (mostrado en la tabla 3.8 para cada caso de velocidad del refrigerante) que simula la convección forzada en una ducto interno:

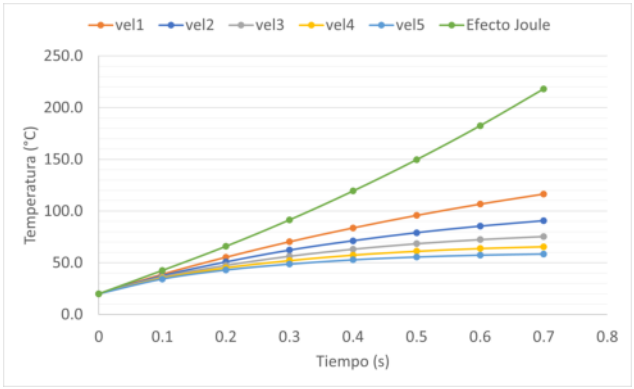


Figura 3.29: Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 16 conductores en el proceso transitorio

Para el siguiente arreglo de 24 conductores establecimos el caso de interés de 6×4 y resueltas las simulaciones de enfriamiento obtuvimos las temperaturas máximas en los tiempos de corto circuito con la condición en las superficies del coeficiente de convección (h) obtenidos (mostrado en la tabla 3.12 para cada caso de velocidad del refrigerante) que simula la convección forzada en una ducto interno:

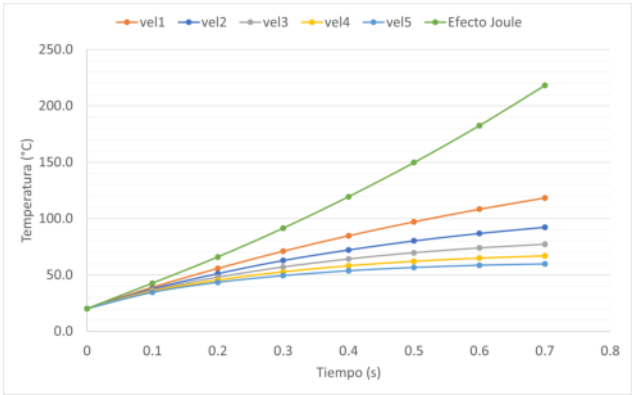


Figura 3.30: Temperatura máxima con diferentes velocidades del fluido para 24 conductores en el proceso transitorio

De los valores obtenidos por el programa en Fortran de los arreglos de 1, 8, 16 y 24 conductores presentados en las tablas 3.3, 3.5, 3.8 y 3.12 podemos conocer las potencias requeridas de la bomba por bobina con respecto a las velocidades del refrigerante:

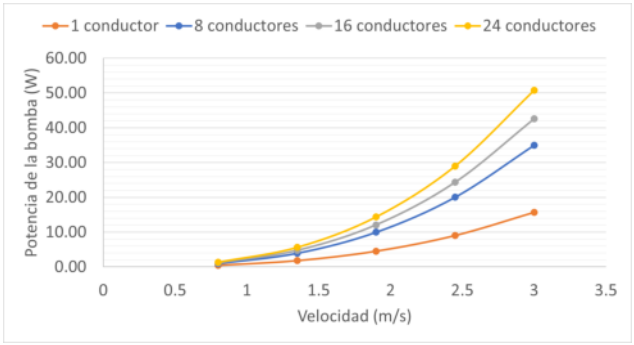


Figura 3.31: Potencia de bomba necesaria para los arreglos de 1, 8, 16 y 24 conductores

De la gráfica anterior podemos estimar la potencia de la bomba necesaria para N-bobinas en un sistema magnético estableciendo la cantidad de conductores y la velocidad del fluido en el ducto en una bobina, procediendo a multiplicar su potencia de la bomba requerida por el número de bobinas de interés.

Las velocidades en relación con el coeficiente de convección promedio (h) para diferente número de conductores (con los datos mostrados en las tablas 3.3, 3.5, 3.8 y 3.12):

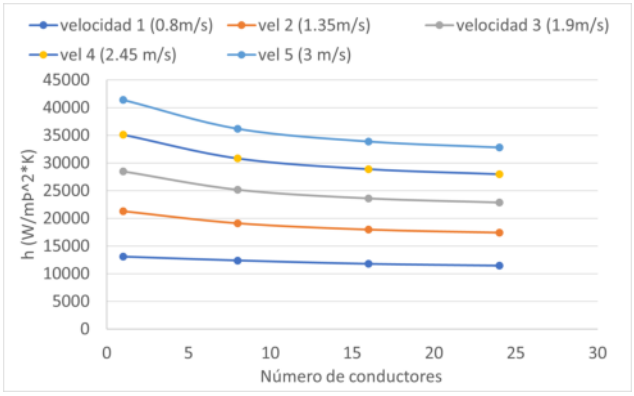


Figura 3.32: Coeficiente de convección (h) para cada arreglo de conductores

Se ve en la Fig. 3.32 que en velocidades (v) máximas del refrigerante se obtiene un valor del coeficiente de convección (h) y conforme se establezcan en las bobinas un alto número de conductores el coeficiente de convección (h) disminuye en la superficie de los conductores.

Es de nuestro interés que el conductor no exceda los 80° C de temperatura máxima y, por ello, exponemos en la siguiente gráfica a partir de que configuración de conductores y que Número de Reynolds (R_e) conseguimos este objetivo:

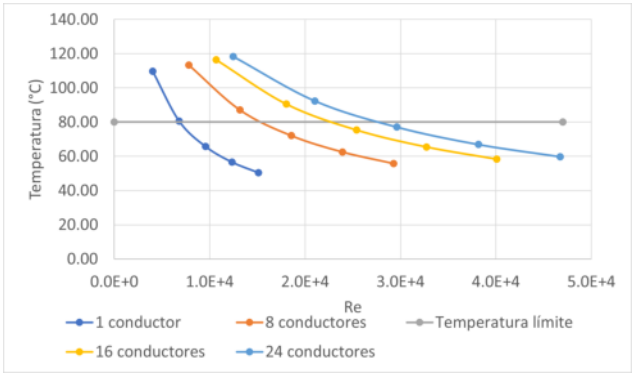


Figura 3.33: El Número de Reynolds en el fluido y su relación con las temperaturas máximas en los conductores al final del proceso transitorio (0.7 s) para las distintas velocidades.

La Fig. 3.33 abarca demasiada información para nuestro sistema de enfriamiento que procederemos a desglosarla. En el eje vertical se marcan las temperaturas máximas (T) en el conductor al final de la simulación (tiempo igual 0.7 segundos), el eje horizontal el Número de Reynolds (R_e) para cada caso de estudio de cantidad de conductores (1, 8, 16 y 24) y previamente se marcó una linea horizontal en 80° C estableciendo como límite de temperatura. El Numero de Reynolds a su vez relaciona la velocidad (v) con la que fluye el fluido dentro de la bobina y el diámetro hidráulico (D_h) del ducto, y sin necesidad de entrar en detalles buscando una variación directa de la velocidad o el diámetro hidráulico, obtuvimos en la figura anterior un rango de operación que a partir de cierto valor del Número de Reynolds no excederá la temperatura límite (80°C) establecida por nosotros para 1, 8, 16 y 24 conductores que formen nuestro sistema magnético y esto es de suma importancia ya que nos asegura el cuidado del material en la instalación experimental.

Por último, mostraremos las gráficas de temperatura máxima en las distintos casos de conductores obtenido por las simulaciones en Comsol de enfriamiento durante el proceso transitorio para cada velocidad del fluido en el ducto:

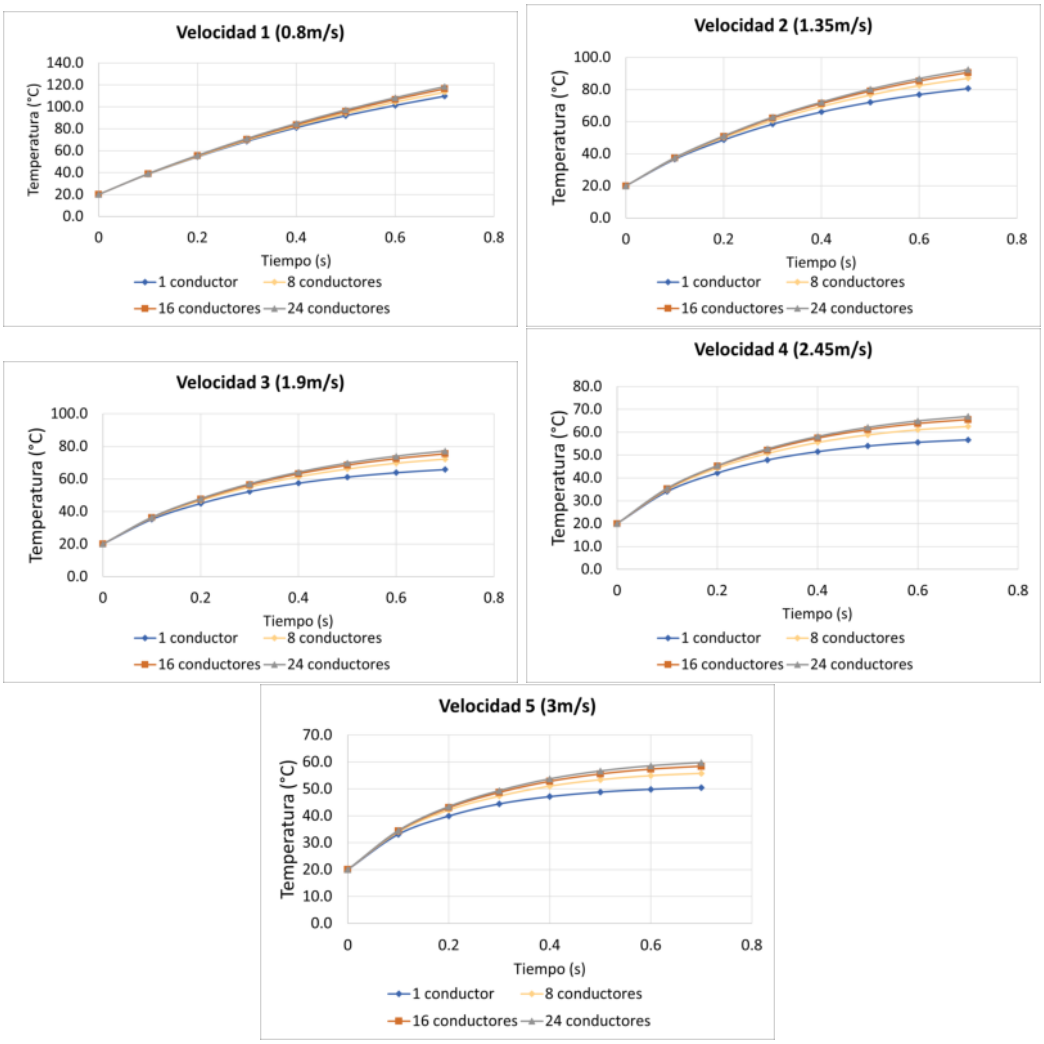


Figura 3.34: Las temperaturas máximas en las distintas cantidades de conductores para cada velocidad en el proceso transitorio

Distinguimos en cada imagen una velocidad (v) distinta en el eje vertical, los diferentes números de conductores en la bobina en el eje horizontal y conforme empleemos mayor velocidad transitando en el ducto, el rango de temperaturas máximas baja. Por ejemplo, se aprecia que para la velocidad 1 (0.8 m/s) el rango de temperaturas va aproximadamente entre 100°C y 120°C y para la velocidad final (3 m/s) el rango de temperaturas máximas está aproximadamente entre 48°C y 62°C.

Conclusiones

De operación y geométricas:

Respecto a la forma geométrica y a la operación de alta corriente en un embobinado determinamos: que las condiciones aceptadas de operación de 10,000 A de corriente en conductores de 7mm x 7mm pueden operar 0.3 segundos sin que el material sufra algún daño sin necesidad de implementar un sistema de enfriamiento, esta magnitud de amperaje es la ideal para generar el campo magnético de 1.4 T con 288 conductores en las bobinas que se desea en el arreglo toroidal.

Con el software SolidWorks se diseñó en 3D-CAD el perfil D-shaped que sigue la metodología mostrada en la Fig. 2.9 estableciendo los límites en el eje (r) de la bobina que gráfica el contorno gracias a una parametrización matemática de las dos variables espaciales. Esta bobina 'D-shaped' permite el trabajo y la evolución de formas más compactas de campo magnético toroidal.

A pesar de la forma irregular de la bobina (forma en 'D'), su comportamiento del campo magnético dentro del toroide al inducir en ella corriente eléctrica coincidió a la perfección con el perfil teórico pudiendo así conocer un valor bastante aproximado del campo magnético en cualquier distancia radial dentro de la configuración.

Simulaciones electromagnéticas:

Nuestros valores de cálculo teórico del campo magnético en el toroide coinciden con las simulaciones de COMSOL Multiphysics.

Se facilitó la investigación trabajando con 12 espiras de varias vueltas homogeneizadas del tipo numérico en donde COMSOL Multiphysics interpreta que en cada bobina sólida sea simulada como si estuvieran 24 conductores abarcando ese espacio así sólo preocupandonos en hacer 12 sólidos en el arreglo toroidal y no 288 conductores.

Visualizamos en la simulación electromagnética de la Fig. 3.6 el efecto del 'ripple' debido a las bobinas discretas puestas en el espacio toroidal y nos ayuda a primeras instancias cualitativas a conocer su comportamiento.

Estos resultados de la simulación electromagnética en la configuración toroidal al establecer el número de vueltas, el perfil de la bobina ('D-shaped') y la corriente eléctrica para obtener el campo magnético deseado dentro del toroide, fue publicado bajo el nombre de **Magnetic Field Studies in Toroidal–Poloidal Systems** [Salvador21] en la **28va Conferencia de Energía por Fusión (FEC 2020)** auspiciada por el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA, por sus siglas en inglés) del 10 al 15 de Mayo del 2021.

Simulación de un conductor de cobre aislado térmicamente:

Esta simulación nos otorgó las temperaturas máximas a las que llegaría el conductor al inducir una alta cantidad de corriente y no considerando la transferencia de calor por convección ni radiación haciendo que toda la energía térmica sea conducido por el mismo cableado originando la temperatura máxima de operación sin enfriamiento en un proceso transitorio de 0.1 a 0.7 segundos.

Calculamos la potencia disipada (P) en cada instante de tiempo tomando la variación de la resistividad eléctrica con respecto a la temperatura.

Estos resultados de la simulación de transferencia de calor de un conductor de cobre que sigue el perfil 'D-shaped' en una instalación de reactores nucleares de fusión (Tokamak) ocasionado por el efecto Joule al estar aislado térmicamente fueron publicados en un trabajo bajo el nombre de **Consideraciones de diseño y de estudio térmico sobre la bobina D-shaped para el Tokamak 'T'** en el **Congreso XXVII Internacional Anual de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica (SOMIM)**, evento que se llevó a cabo del 22 al 24 de Septiembre del 2021[Chapa21].

Simulaciones de las condiciones para el enfriamiento de los conductores de cobre:

El sistema de enfriamiento de interés para el Tokamak 'T' es el de 24 conductores por bobina viendo que la posibilidad de hacer circular agua tratada a 10°C a una velocidad de 3 m/s ya que trae un beneficio muy distinguible en la temperatura de los conductores y que la bomba requerida que se calculó para llevar a cabo no es un valor difícilmente alcanzable comparada con las bombas que actualmente operan en el mercado e inclusive, contemplando todo el sistema completo de las 12 bobinas, es posible llevarlo a operación.

En los valores de velocidad (v) establecidos para los casos de estudio (0.8, 1.35, 1.9, 2.45 y 3 m/s), se observa en la Fig. 3.30 que de estos valores los que cumplen el objetivo deseado de una temperatura máxima del conductor menor a 80°C son las velocidades del fluido de 1.9, 2.45 y 3 m/s con temperaturas máximas de 77.1°C, 66.9°C y 59.8°C respectivamente.

Se vio que para los distintos acómodos horizontales y verticales de los conductores en las bobinas que mostramos en el capítulo anterior, la potencia requerida para la bomba disminuía notablemente al tomar configuraciones compactas (ejemplo: Para 16 conductores, un acomodo de 4×4) y el coeficiente de convección (h) favorecía en los menos compactos (ejemplo: 16×1 conductores), por prácticidad de querer construir este sistema de bobinas incluyendo el enfriamiento dentro de ellas, es más sencillo trabajar con el sistema que requiera menos potencia de bombeo debido a que son 12 bobinas en su totalidad y operando con un coeficiente de convección promedio en las superficies menor, recalcando en las gráficas presentadas en el capítulo anterior (ver. Fig. 3.32) cumplimos nuestro objetivo de evacuar el calor del conductor y que este con las condiciones adecuadas se mantenga en temperaturas de operación aceptables. No descartamos completamente la posibilidad de construir las bobinas con arreglos no compactos (ejemplo: 24 conductores acomodados en 6 filas con 4 conductores) ya que dan beneficio en que se obtiene para el sistema el mayor coeficiente de conveccion promedio en las superficies (h) pero optar por esta opción traería consigo problemas en los aspectos mecánicos de la instalación no deseados y que se mantienen controlados en configuraciones compactas.

Independientemente de la cantidad de conductores en la bobina (1, 8, 16 y 24), se vio en las últimas gráficas (ver Fig. 3.34) que a mayor velocidad las temperaturas máximas en el conductor

decrecen, esto se debe a que el Número de Reynolds (R_e) en el sistema aumenta y a su vez el coeficiente de convección promedio (h) en las superficies. También se puede agregar que se aprecia que a menor número de conductores existan en la bobina las temperaturas máximas son mínimas comparadas con las temperaturas máximas con más conductores por bobina, lo que en otras palabras se traduce en que: Para una velocidad establecida para el refrigerante, a menor cantidad de conductores tendrá mayor coeficiente de convección promedio (h).

En el área de ingeniería se contempla siempre los resultados como una aproximación aceptable y con justa razón al usar ecuaciones empíricas y consideraciones que en diversos casos simplifican la solución del problema pero le agregan incertidumbre al cálculo, se busca no tomar con firmeza y exactitud los valores obtenidos y, en cambio, aceptar rangos para los parámetros que fueron calculados con las ecuaciones presentadas en la metodología y en los valores que fueron resultados de las simulaciones.

Nuestro modelo está empleado en flujos de fluido completamente desarrollados en ductos que es considerado como un tubo liso. Esta metodología tiene límites y están marcandos por las ecuaciones empíricas como lo es la ecuación de Pethukov para el coeficiente de fricción (Ec. 2.39) y la ecuación para determinar Número de Nusselt (Ec. 2.40), estos rangos de válidez son de $0.5 \leq P_r \leq 2,000$ y $3 \times 10^3 < Re < 5 \times 10^6$.

Nuestra metodología no sólo aplica para bobinas con forma D-shaped, puede aplicarse para cualquier configuración de arreglos magnéticos que contemplen conductores que necesiten un sistema de enfriamiento por convección forzada. Es posible seguir los pasos propuestos para calcular las variables correspondientes y emplear la simulación de calentamiento electromagnético incluyendo la variación en parámetros como área del conductor y su forma transversal, una separación entre conductores y un libre acomodo en la bobina, las velocidades y la temperatura con la que el refrigerante fluirá en ducto e inclusive cambiar los materiales establecidos para el fluido y el conductor, todo esto se llevaría a cabo nuevamente como lo expuesto en la metodología siendo cauteloso y trabajar con la ecuación más general del diámetro hidráulico (D_h) y el área del ducto (A_c), ecuaciones 2.36 y 2.34, respectivamente.

La Fig. 3.33 muestra la temperatura máxima del conductor de cobre con respecto al Re al haber evacuado el calor en el sistema y esto permite que si conocemos la cantidad de conductores en la bobina y su Re (previamente calculando su D_h y v), conocer una temperatura máxima aproximada. Además que para mayor cantidad de conductores en la bobina, es necesario un mayor número de Re para conseguir un enfriamiento (evacuación de calor) más eficiente.

Por último, se hizo una propuesta de simulaciones de enfriamiento para 'i' conductores horizontales y 'j' verticales conductores colocados en una bobina D-shaped donde se conduce una alta cantidad de corriente eléctrica impidiendo se concentren valores indeseados de temperatura en el embobinado y, a su vez, genere sin inconveniente alguno el campo magnético buscado.

Conclusión general:

Los dispositivos de confinamiento magnético como Tokamaks, Tokamaks de baja relación de aspecto, Tokamaks esféricos, necesitan parámetros mejorados de bienes que involucran consideraciones como: relación de aspecto, alargamiento, triangularidad, densidad del plasma, con el objetivo de obtener valores altos deseables de β, aumento del tiempo de descarga de plasma y comprensión

de la física sobre el comportamiento del plasma, en cuanto a la geometría y el diseño de la bobina toroidal presentada, se han presentado aspectos de ingeniería que involucran problemas eléctricos, definiendo el desarrollo futuro de las cajas toroidales refrigeradas, y la resistencia a esfuerzos mecánicos, estas consideraciones permiten reconocer la importancia de los materiales superconductores avanzados. En el trabajo se ha presentado un resumen de la metodología de diseño a partir del análisis en forma de D, desarrollando algoritmos para generar formas interesantes utilizadas en la bobina toroidal, se han obtenido distribuciones analíticas del campo magnético toroidal con una geometría determinada, el uso de elemento finito Se han presentado métodos (FEM) a través del software COMSOL Multiphysics empleando un módulo de campo magnético en estudio estacionario, esto proporciona una vista 3D del comportamiento de la densidad de flujo magnético a través de un sistema de disposición toroidal.

Los investigadores del GIF-UANL reconocen que las colaboraciones internacionales tienen un aspecto importante para abordar temas de investigación interesantes y complejos, el acuerdo científico con SPbSU ha permitido una correcta evolución desarrollando interesantes configuraciones ST. El siguiente paso que tiene por delante el GIF-UANL es la evolución de su Tokamak Low Aspect Ratio 'T' a un Tokamak esférico, llamado Tokamak esférico hacia 'T' (TEA-T) de 1.6 T a 3 T como campo toroidal máximo, comenzando con 0.5 T en la primera etapa hasta la última, este dispositivo ST reforzará el esfuerzo realizado en el Tokamak 'T'.

Bibliografía

[Altovskii85] Atomnaya Énergiya, Vol. 58, No.5, pp.336-341, Mayo 1985

[Azizov12A] Azizov E.A.; Tokamaks: from A D Sakharov to the present (the 60-year history of tokamaks) "A.D. Sakharov's 90th Birthday Conmmemoration"; *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Russian Academy of Sciences, Physics-Uspekhi 55 (2) 190-203, 2012.

[Bertolini00] Bertolini, E. *et al*; Raising the JET Toroidal Field to 4 Tesla; JET-R(99)10, 2000.

[Cengel07] Cengel, Y. A.; Transferencia de calor y masa, 3ra Ed.; 2007.

[Chapa21] E. Chapa, M. Salvador, F. A. Sánchez, H. G. Ramírez, S. Martínez, A. Acosta; Consideraciones de diseño y de estudio térmico sobre la bobina D-shaped para el Tokamak 'T'; Memorias del XXVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2021.

[Cheol84] Cheol, H. N.; *et al*; Design of Magnetic Systems for SNUT-79 Tokamak, Journal of the Korean Nuclear Society, Vol. 16; No.2; 1984.

[Cocilovo] Cocilovo, V.; Analysis of D-shaped toroidal superconductive coils for medium size Fusion Experiment Facility.

[DeMichele73] DeMichele, D.W.; Darby, J.B.; Three-dimensional mechanical stresses in toroidal magnets for controlled thermonuclear reactors, 5th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research, 1973.

[DENIM89] Estado actual de la Fusión: Aspectos científicos, técnicos y ecónomicos, Inst. de Fusión Nuclear, Univ. Politécnica de Madrid, DENIM 222, 1989.

[DTFR91] Akiyama, M.; Design Technology of Fusion Reactors; ISBN 9971-50-727-7, World Scientific Publishing, 1991.

[Dolan00] Dolan T.J.; Fusion Research: principles, experiments and technology, Pergamon Press, 2000

[FileA] File, J.; Mills, R.G.; Sheffield, G.V.; Large superconducting magnet designs for fusion reactors, Plasma Physics Laboratory, Princeton University.

[FileB] File, J.; Sheffield G.V.; A large superconducting magnet for fusion research, Plasma Physics Laboratory, New Jersey.

[GIF2010] Grupo de Investigación en Fusión - UANL, Mexican Design of a Tokamak Experimental Facility, FTP/p6-36; 23rd IAEA Fusion Energy Conference, Daejon, Rep. Corea, IAEA-FEC 2010

[Glosario02] Glosario elaborado en el Marco del Proyecto EISSV (Estudios para emplazamiento de ITER en Vandellós), INF-EISSV-SL6.3-001. Diciembre 2002.

[Gralnick76] Gralnick, S.L.; Tenney F.H.; Analytical Solution of the Toroidal Constant Tension Solenoid; Proc. 6th Symp. on Engineering Problems of Fusion Research; Conf. 751125 122, 1976.

[Gray] Gray, W.H., *et al*; Bending free toroidal shells for Tokamak fusion reactors; CONF-771029-145;

[Halliday99] Halliday, D.; Resnick, R.; Krane, K.S.; Physics Vol.2 Extended version, 4th ed., Séptima impresión en lengua castellana, ISBN 0-471-54804-9, Ed. Wiley, J. and Sons, 1999.

[Hussain14] Hussain, S.; *et al*, Estimation of Electron Temperature on Glass Spherical Tokamak (GLAST), Journal of Physics: Conference Series 591 012009, 2009

[IAEA95] Hogan, W.J.; Coutant,J.; Nakai,S.; Rozanov, V.B.; Velarde, G.; Energy from Inertial Fusion, Vienna: International Atomic Energy, ISBN 92-0-100794-9, 1995

[ICEA] Cooper Bussmann, Gráfica tomada por Insulated Cable Engineers Association (ICEA); 1969

[Kecebas19] Kecebas, Ali; Kayfeci, Muhammet; Chapter 1: Hydrogen properties; Solar Hydrogen Production, Academic Press, 2019, Pages 3-29, ISBN 9780128148532.

[Lee18] Lee, J. I., Kim, T. K., Park, M., Yu, I. K.; Design and performance analysis of a 1500 A, 400 mH.; 2018.

[Liu13] Liu, H., Deng, X., Ren, L., Xu, Y., He, J., Tang, Y.; Electromagnetic Design of HTS D-shaped Coils for a Toroidal-type Superconducting Magnet.; 2013.

[Ludwig03] G.O. Ludwig, E. Del Boscco, J.G. Ferreira, L.A. Berni, R.M. Oliveira, *et al*, *Sphe-*

rical Tokamak Development in Brazil, Brazilian Journal of Physics, Vol.33, no.4, Diciembre, 2003.

[Mardani12] Mardani, M. *et al* Preliminary design of Alborz Tokamak, J. Fusion Energy (2012) 31: 175-178

[Meyerhofer85] Meyerhofer, D.O., Goldston, R.J., Kaita, R., *et al.*, Nucl. Fusion 25 (1985) 321.

[Mineev97] Anatoly Borisovich Mineev, Physical and Engineering Aspects of the Spherical Tokamak "Aftab" (Introduction to the Plasma and Electromagnetic System), Course of Lectures given by Dr. A.B. Mineev June - July 1997, St. Petersburg, Russian Fed. 1997.

[Mineev06] Anatoly Borisovich Mineev, "Physico-Technical Fundamentals of Controlled Thermonuclear Fusion", Publishing House of the Saint Petersburg Polytechnic University, ISBN 5-7422-1117-1, 2006. (sólo en lengua Rusa)

[Neumeyer00] C. Neumeyer and the NSTX Team, *National Spherical Torus Experiment* (NSTX) *Engineering Overview & Research Results* 1999-2000, USDOE Contract DE-AC02-76-CHO3073.

[Oceana] $https://europe.oceana.org/es/eu/que-hacemos/cambio-climatico-y-energias-renovables/cambio-climatico/mas-informacion/fuentes-de-emisiones-de-gases-contaminant$

[Rodríguez94] Tesis Doctoral, *Estudio de los electrones desacoplados en el Tokamak TJ-1, determinación de sus características de confinamiento a partir del ánalisis de su radiación de frenado*, Lina Rodríguez Rodrigo, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física Átomica, Molecular y Nuclear, Madrid, 1994.

[Raeder] Raeder, J.; Some analytical results for toroidal magnetic field coils with elongated minor cross-sections; 1976.

[Sakharov58] Sakharov, A.D. *Fizika Plasmy i Problema Upravlyaemykh Termoyadernykh Reaktsii* (Plasma physics and the problem of controlled nuclear reactions), Vol. 1; Ed. M. A. Leontovich; Moscú: Izd. AN URSS, p.20, 1958; (texto en inglés traducido por New York Pergamon Press, 1961); USP. Fiz. Nauk 93 564 (1967).

[Salvador21] M. Salvador, G. Vorobyov, J. Gonzalez, E. Chapa, R. Chavez, J. Gonzalez, A. Nieto, A. Acosta; Magnetic Field Studies in Toroidal–Poloidal Systems, 28th IAEA Fusion Energy Conference (FEC 2020), 2021.

[Shafranov63] Shafranov, V.D.; Equilibirum of a toroidal plasma in a magnetic field; Plasma Physics (Journal of Nuclear Energy Part C), Vol. 5 pp. 251 to 258, Pergamon Press Ltd. 1963.

[Smith77] Smith G.E.; Punchard W.F.B.; TFTR Toroidal Field Coil Design, Princeton University; 1977

[Smtoks05] M.P. Gryaznevich, E. Del Bosco, A. Malaquias, G. Mank, G. Van Oost, *et al*; *Joint research using small tokamaks*, Nucl. Fusion 45 (2005) S245-S254, Institute of Physics Publishing and International Atomic Energy Agency.

[Stacey08] Stacey, V.M.; Applications of the Miller equilibrium to extend tokamak computational models, Physics of Plasmas 15, 122505, 2008.

[Stockel09] Stockel, J.; Plasma confinement in Tokamaks, European Summer School in Plasma Physics in Science and Technology, 2009

[TAC-16] ITER under collaboration Home Teams, TAC-16 Progress Report -Research & Development R&D, 2000.

[Utoh10] Utoh, H.; *et al*; SCONE code: Superconducting TF coils design code for tokamak fusion reactor, J. Plasma Fusion Res. SERIES, Vol. 9, 2010.

[Yongxing] Yongxing L. *et al*, Computation of the magnetic field and ripple for the toroidal coils in HL-2M Tokamak, SWIP Annual Report.

Resumen autobiográfico

Candidato para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLES
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
Tesis:
Estudios electromagnéticos y térmicos de bobinas de cobre para sistemas magnéticos toroidales.

Emilio Chapa Villarreal nació el 11 de Junio de 1997 en Nuevo León, México, hijo de Laura Alicia Villarreal Ortiz y Eduardo Chapa Vazquez. Motivado por las curiosidades de la naturaleza y apoyado por toda su familia, decidió estudiar física y en el año de 2018 se tituló como Licenciado en Física por la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Desde el 2017 pertenece en el Grupo de Investigación en Fusión (GIF) que le ha traído experiencias científicas y personales fructíferas, como lo es exponer en el XXX Congreso de la Sociedad Nuclear Mexicana en 2019, en el 28va Conferencia de Energía por Fusión (IAEA, por sus siglas en inglés) en el año 2021 y en el XXVII Congreso Anual Internacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica en el mismo año.