

TÉCNICAS AVANZADAS DE MODELADO COMPUTACIONAL EN SUPERCONDUCTIVIDAD APLICADA

Autor: Conderana Medem, Elena.

Director: Hernando López de Toledo, Carlos José.

Entidad Colaboradora: Cyclomed Technologies

RESUMEN DEL PROYECTO

Este estudio propone un modelo para el cálculo de pérdidas AC en un sistema SMES durante transitorios eléctricos, implementado en Julia y optimizado para GPU. La validación del modelo frente a la implementación base en MATLAB revela una mejora en el cómputo de las matrices de potencial eléctrico y campo magnético superiores al 95%, así como una convergencia mejorada durante la resolución de ecuaciones diferenciales. El modelo final simplifica la definición de la geometría y los transitorios a simular, agilizando exitosamente el proceso de diseño de un sistema SMES.

Palabras clave: SMES, HTS, pérdidas AC, Julia, GPU, simulación numérica

1. Introducción

Los sistemas SMES almacenan energía en forma de campo magnético [1]. Para ello se hace circular corriente por una bobina superconductora hasta alcanzar una determinada intensidad. Alcanzado este punto la bobina enfriada criogénicamente se conecta en cortocircuito, almacenando de manera indefinida la energía generada en forma de campo magnético, pues la resistividad nula del superconductor no genera pérdidas de corriente. Sin embargo, uno de los grandes retos de esta tecnología reside en las pérdidas generadas durante los ciclos de carga y descarga en corriente alterna (AC) que incrementan la carga térmica del sistema [2]. Para garantizar el funcionamiento óptimo, manteniendo la temperatura del superconductor por debajo del umbral crítico, es fundamental simular los transitorios eléctricos para poder medir el impacto y monitorizar su estado en tiempo real, aunque se trata de un proceso complejo con un elevado coste computacional [2].

Ante el desafío que representa el tiempo de cómputo, esta tesis tiene como objetivo reducir el tiempo necesario para el cálculo de pérdidas AC en un sistema SMES con una geometría arbitraria sometido a un transitorio cualquiera, sin comprometer la precisión de los resultados mediante la implementación de métodos numéricos en el lenguaje de programación Julia.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal de esta tesis reside en desarrollar una simulación más eficiente para el cálculo de transitorios electromagnéticos en una bobina superconductora con geometría y transitorio arbitrarios, buscando una disminución significativa en el tiempo de ejecución respecto a la solución actual implementada en MATLAB.

El proceso completo consiste en la migración del código y los métodos de cálculo existentes en MATLAB al lenguaje Julia y su posterior optimización a nivel de software, modificando las funciones y cálculos, y a nivel de hardware, migrando aquellas secciones que suponen un cuello de botella a la GPU. La validación de los

resultados se realizará con un comparación con el modelo base en MATLAB, evaluando tanto la precisión de los resultados como el tiempo de ejecución. Se espera que el modelo resultante exhiba un desempeño superior al modelo en MATLAB, logrando una notable reducción en el tiempo de ejecución sin detrimento de la precisión de las pérdidas AC.

3. Descripción del modelo

Para comprobar el comportamiento del modelo se han escogido tres geometrías distintas: una primera geometría formada por dos bobinas conectadas en serie una encima de otra, en formato doble pancake, constituidas por 20 espiras de cinta superconductora (20,2); la segunda geometría consta de dos dobles pancakes formadas por 40 vueltas (40,4); y la última geometría es un doble pancake de 144 vueltas (144,2).

La Ilustración 1 muestra la geometría (20,2) del sistema SMES a simular sin escala. Todos los parámetros se mantienen para la segunda y tercera geometría excepto el número de bobinas, el número de espiras y el radio externo, que depende del número de vueltas de superconductor. Se han escogido tres geometrías arbitrarias para poder visualizar diferentes rendimientos de los modelos para complejidades incrementales del problema. El transitorio a simular se ha definido como una intensidad sinusoidal con una amplitud de 600 A a frecuencia 1 Hz durante 10 segundos.

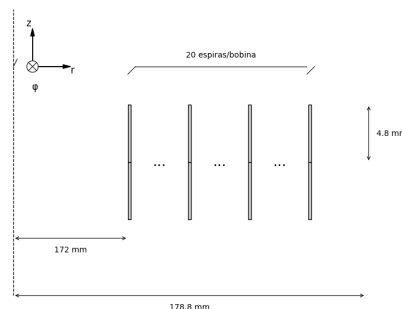


Ilustración 1 – Geometría (20,2) del sistema SMES.

El proceso de simulación del sistema SMES se segrega en 6 partes principales: Cargas y otros parámetros, Malla, Geometría, Condiciones de Contorno, Resolución y Post-Procesado. La implementación concreta con sus funciones principales viene detallada en el diagrama de flujo de la Ilustración 2. Las mejoras de software y de hardware se han centrado principalmente en la creación de matrices, pues abarca un porcentaje muy elevado del tiempo de computación.

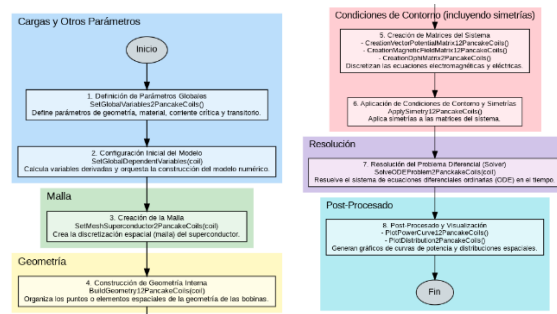


Ilustración 2 – Diagrama de Flujo Simulación SMES.

4. Resultados

El Modelo III representa la implementación total más optimizada, alcanzando una mejora superior al 60% en el tiempo de cálculo respecto al modelo de MATLAB para cualquier geometría. Esto significa que una tarea que en MATLAB tomaría aproximadamente 926.34 segundos (alrededor de 15 minutos), por ejemplo, el Modelo III la resuelve en tan solo 11.59 segundos. Incluso para configuraciones más exigentes como (40,4) o (144,2) el Modelo III mantiene una impresionante mejora superior al 95% sobre MATLAB, sin comprometer a penas la precisión del modelo, como se parecía en las Ilustraciones 3 y 4.

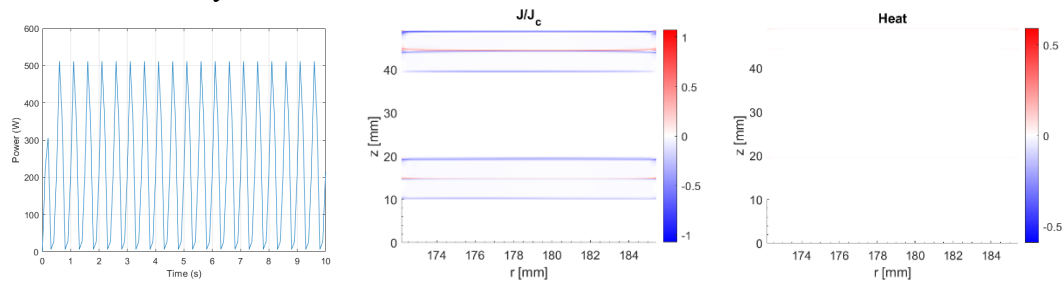


Ilustración 3 – Distribuciones en MATLAB de Potencia [W], J/J_c y Calor disipado para la Geometría (40,4).

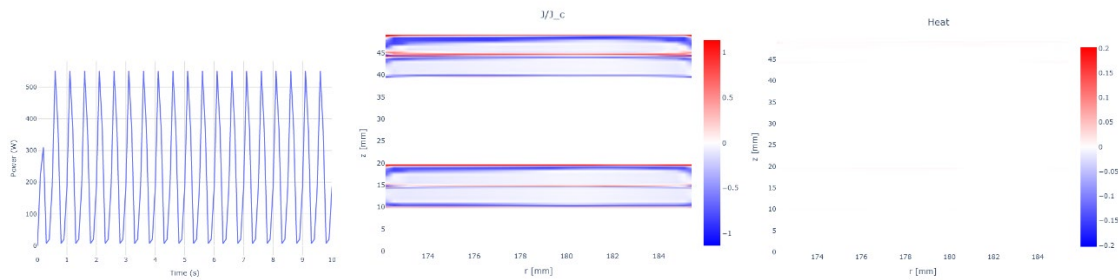


Ilustración 4 – Distribuciones en Julia con GPU optimizada (Modelo III) de Potencia [W], J/J_c y Calor disipado para la Geometría (40,4).

Geometría y Configuración	MATLAB (s)	Modelo III con solver (s)	Mejora (%)
(20,2)	2253.26	144.29	93.59
(40,4)	11930.70	3881.59	67.47
(144,2)	49622.90	19207.59	61.29

5. Conclusiones

Se ha construido de manera incremental un modelo computacional para simular el comportamiento de un sistema SMES en Julia, concentrándose prioritariamente en el cómputo de las matrices de potencial eléctrico y campo magnético, que junto con la resolución de las ecuaciones diferenciales del problema, constituyen la práctica totalidad del tiempo de cómputo. Independientemente de la complejidad de la geometría, se ha logrado una mejora global en el tiempo de computación de las matrices superior al 95\% en comparación con el modelo base en MATLAB (desarrollado por J. Orea) [3] y el modelo final en Julia, optimizado para GPU y denominado Modelo III. Estas características hacen que el programa sea ideal para ser utilizado en la fase de diseño de la geometría del sistema SMES donde deben hacerse numerosas simulaciones con diversas geometrías y transitorios.

6. Referencias

- [1] X. L. a. J. W. a. M. D. a. J. Clarke, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,» *Applied Energy*, pp. 511-536, 2015.
- [2] H. a. W. Z. a. G. F. a. G. K. a. M. M. Zhang, «Alternating Current Loss of Superconductors Applied to Superconducting Electrical Machines,» *Energies*, vol. 14, 2021.
- [3] J. O. Rufino, MODELADO Y VALIDACIÓN DE PERDIDAS AC EN IMÁN SUPERCONDUCTOR DE ALTA TEMPERATURA, Trabajo Fin de Máster: Universidad Pontificia Comillas, 2024.

ADVANCED COMPUTATIONAL MODELING TECHNIQUES IN APPLIED SUPERCONDUCTIVITY

Author: Conderana Medem, Elena.

Supervisor: Hernando López de Toledo, Carlos José.

Collaborating Entity: Cyclomed Technologies

ABSTRACT

This study proposes a model for the computation of AC losses in a SMES system during electrical transients, implemented in Julia and optimized for GPU. The validation of the model against the benchmark implementation in MATLAB reveals an improvement in the computation of the electric potential and magnetic field matrices over 95%, as well as an improved convergence during the solution of differential equations. The final model simplifies the definition of the geometry and transients to be simulated, successfully streamlining the design process of a SMES system.

Keywords: SMES, HTS, AC losses, Julia, GPU, numerical simulation.

1. Introduction

SMES systems store energy in the form of a magnetic field [1]. For this purpose, current is circulated through a superconducting coil until a certain level is reached. Once this point is reached, the cryogenically cooled coil is short-circuited, storing the energy generated in the form of magnetic field indefinitely, since the zero resistivity of the superconductor does not generate current losses. However, one of the great challenges of this technology lies in the losses generated during alternating current (AC) charge and discharge cycles that increase the thermal load of the system [2]. To ensure optimal operation, keeping the temperature of the superconductor below the critical threshold, it is essential to simulate the electrical transients to measure the impact and monitor their state in real time, although this is a complex process with a high computational cost [2].

Faced with the challenge of computational time, this thesis aims to reduce the time required to calculate AC losses in a SMES system with an arbitrary geometry subjected to any transient, without compromising the accuracy of the results by implementing numerical methods in the Julia programming language.

2. Project definition

The main objective of this thesis is to develop a more efficient simulation for the calculation of electromagnetic transients in a superconducting coil with arbitrary geometry and transient, looking for a significant decrease in the execution time with respect to the current solution implemented in MATLAB.

The whole process consists of migrating the existing MATLAB code and computational methods to the Julia language and its subsequent optimization at software level, modifying functions and calculations, and at hardware level, migrating the sections that represent a bottleneck to the GPU. The validation of the results will be performed with a comparison with the benchmark model in MATLAB, evaluating both the accuracy

of the results and the execution time. The resulting model is expected to exhibit superior performance than the MATLAB model, achieving a notable reduction in execution time without detriment to AC loss accuracy.

3. Model description

Three different geometries have been chosen to test the behavior of the model: a first geometry formed by two coils connected in series one on top of the other, in double pancake format, consisting of 20 turns of superconducting tape (20,2); the second geometry consists of two double pancakes formed by 40 turns (40,4); and the last geometry is a double pancake of 144 turns (144,2).

Figure 1 shows the geometry (20,2) of the SMES system to be simulated without scaling. All parameters are kept for the second and third geometry except the number of coils, the number of turns and the external radius, which depends on the number of superconductor turns. Three arbitrary geometries have been chosen in order to visualize different performances of the models for incremental complexities of the problem. The transient to be simulated has been defined as a sinusoidal current with an amplitude of 600 A at frequency 1 Hz during 10 seconds.

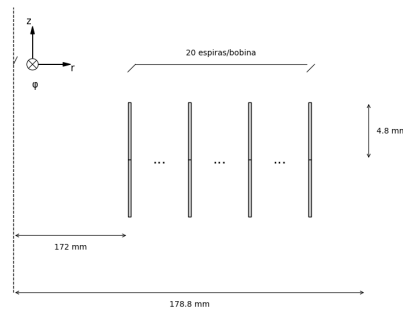


Figure 2 – Geometry (20,2) of SMES system.

The simulation process of the SMES system is divided into 6 main parts: Loads and other parameters, Mesh, Geometry, Boundary Conditions, Resolution and Post-Processing. The specific implementation with its main functions is detailed in the flowchart in Figure 2. The software and hardware improvements have been mainly focused on the creation of matrices, as it covers a very high percentage of the computational time.

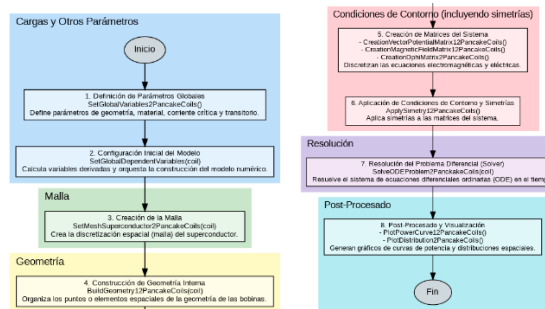


Figure 2 – Flowchart of SMES simulation.

4. Results

Model III represents the globally most optimized implementation, achieving over 60% improvement in computation time over the MATLAB model for any geometry. This means that a task that in MATLAB would take approximately 926.34 seconds (about 15 minutes), for example, Model III solves it in only 11.59 seconds. Even for more demanding configurations such as (40,4) or (144,2) the Model III maintains an impressive 95%+ improvement over MATLAB, with almost no compromise in model accuracy, as shown in Figures 3 and 4.

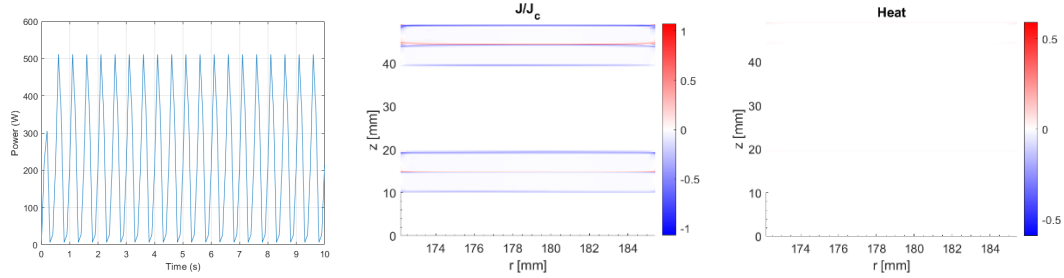


Figure 3 – MATLAB Distribution of Power [W], J/J_c and Heat dissipation for Geometry (40,4).

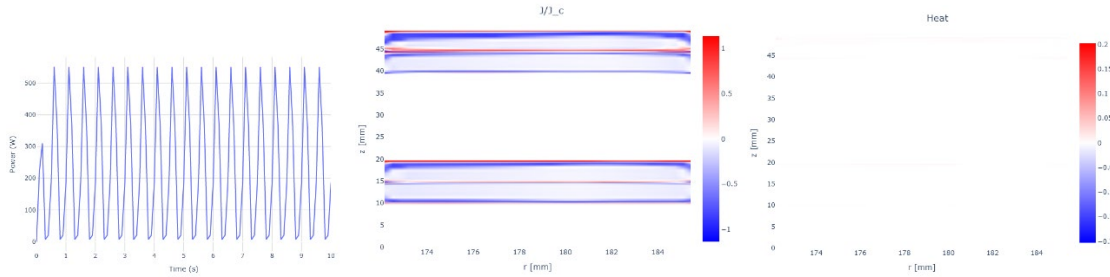


Figure 4 – GPU optimized Julia Distribution (Modelo III) for Power [W], J/J_c and Heat dissipation for Geometry (40,4).

Geometry and Configuration	MATLAB (s)	Model III with solver (s)	Improvement (%)
(20,2)	2253.26	144.29	93.59
(40,4)	11930.70	3881.59	67.47
(144,2)	49622.90	19207.59	61.29

5. Conclusions

A computational model has been incrementally built to simulate the behavior of a SMES system in Julia, concentrating mainly on the computation of the electric potential and magnetic field matrices, which together with the solution of the differential equations of the problem, constitute almost the total computation time. Regardless of the complexity of the geometry, an overall improvement in the computation time of the matrices over 95% has been achieved in comparison with the benchmark model in MATLAB (developed by J. Orea) [3] and the final model in Julia, optimized for GPU and called Model III. These features make the model ideal for use in the geometry design phase of the SMES system where numerous simulations with various geometries and transients must be performed.

6. References

- [1] X. L. a. J. W. a. M. D. a. J. Clarke, «Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,» *Applied Energy*, pp. 511-536, 2015.
- [2] H. a. W. Z. a. G. F. a. G. K. a. M. M. Zhang, «Alternating Current Loss of Superconductors Applied to Superconducting Electrical Machines,» *Energies*, vol. 14, 2021.
- [3] J. O. Rufino, MODELADO Y VALIDACIÓN DE PERDIDAS AC EN IMÁN SUPERCONDUCTOR DE ALTA TEMPERATURA, Trabajo Fin de Máster: Universidad Pontificia Comillas, 2024.