



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**“MODELACIÓN DE UN CAÑÓN ELECTROMAGNETICO MEDIANTE
ATP-EMTP Y ATPDRAW”**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Electrico

**AUTORES: JUAN JOSÉ CORDERO CANTOS
PEDRO JOSÉ LEÓN ROJAS**

TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, Ph.D.

Cuenca - Ecuador

2025

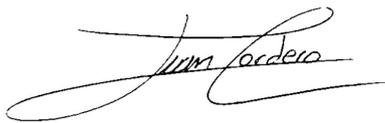
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Juan José Cordero Cantos con documento de identificación N^o 0150552578 y Pedro José León Rojas con documento de identificación N^o 1105603730 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 21 de febrero del 2025

Atentamente,



Juan José Cordero Cantos
0150552578



Pedro José León Rojas
1105603730

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Juan José Cordero Cantos con documento de identificación N^o 0150552578 y Pedro José León Rojas con documento de identificación N^o 1105603730, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Modelación de un cañón electromagnético mediante ATP-EMTP y ATPDraw”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 21 de febrero del 2025

Atentamente,



Juan José Cordero Cantos
0150552578



Pedro José León Rojas
1105603730

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “MODELACIÓN DE UN CAÑÓN ELECTROMAGNETICO MEDIANTE ATP-EMTP Y ATPDRAW”, el, realizado por Pedro José León Rojas con documento de identificación N° 1105603730 y por Juan José Cordero Cantos con documento de identificación N°0150552578, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 21 de febrero del 2025

Atentamente,



José Manuel Aller Castro
0151561800

AGRADECIMIENTOS

Con un profundo sentimiento de gratitud, agradezco principalmente a mi familia, especialmente a mis padres, quienes me enseñaron el camino correcto y me mostraron que, con dedicación y perseverancia, todo es posible.

Agradezco al Ing. José Manuel Aller por su guía, experiencia y constante apoyo ante las dificultades que se presentaron durante la realización de este proyecto.

A mis compañeros y amigos, quienes me brindaron su apoyo y confianza durante esta etapa. También quiero reconocer a mi compañero de tesis, ya que su compromiso y constancia estuvieron siempre presentes.

Finalmente, agradezco a la vida, que me ha brindado tanto y ha permitido que mis fracasos y logros me forjen como persona, ayudándome a cumplir mis metas

Juan José Cordero Cantos

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia por su amor incondicional, su apoyo constante y la confianza que siempre han depositado en mí. Su guía y fortaleza han sido esenciales en mi camino. A Dios, por darme salud y permitirme llegar hasta aquí, brindándome la fuerza y la protección necesarias en cada etapa de este proceso.

Al Ing. José Manuel Aller, por su disposición, conocimientos y guía invaluable durante la realización de este trabajo. Su apoyo ha sido clave para superar los desafíos encontrados.

A mis amigos, por su compañía, motivación y apoyo incondicional en los momentos de alegría y dificultad. Aprecio cada gesto de ánimo y cada momento compartido que hizo este camino más llevadero. También, a todos quienes, con su ayuda o inspiración, contribuyeron a este logro. Y a mí mismo, por la perseverancia y el esfuerzo dedicados para alcanzar esta meta.

Pedro José León Rojas

DEDICATORIA

Dedico este proyecto técnico a mi padre, Franklin Fernando, y a mi madre, Rita Pamela, quienes me han enseñado el verdadero significado de la fortaleza, la perseverancia y la determinación necesarias para alcanzar los objetivos en la vida. Su apoyo incondicional y el cariño que me brindaron en los momentos difíciles han sido fundamentales a lo largo de mi carrera. Sin ellos, nada de esto hubiera sido posible; a ellos les debo mi vida entera y todo lo que soy.

A mi hermana Amanda, quien me impulsó a ser un buen ejemplo como hermano mayor; siempre llevaré su influencia en mi corazón.

A mi abuelita Magdalena, quien ha sido como una segunda madre en mi formación como persona. Su amor, sabiduría y enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi vida.

Dedico este proyecto a la memoria de mi querido abuelo Efraín, a quien siempre llevaré en mi corazón. Sus enseñanzas y consejos han dejado un legado invaluable en mi vida, y su recuerdo me inspira a crecer y a convertirme en un mejor ser humano cada día.

A mis amigos, quienes hicieron que esta etapa de mi vida fuera más enriquecedora y alegre, demostrando su apoyo y amistad en momentos difíciles, además de brindarme risas y buenos recuerdos de lo que fue mi carrera universitaria.

A mis mascotas, que siempre estuvieron a mi lado durante las largas noches de estudio.

Y a la vida, que me ha permitido convertirme en la persona que soy hoy. Agradezco las dificultades que ha puesto en mi camino, así como todos los fracasos y victorias que me han fortalecido en todos los ámbitos de mi ser. Estoy agradecido por las oportunidades que se me han presentado y, sobre todo, por aquellas que no se dieron, pues cada experiencia ha sido un paso hacia mi crecimiento personal.

Juan José Cordero Cantos

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto técnico a mis padres, Beatriz Irene y Pedro Efraín, y a mi hermana, Victoria Carolina, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, por su paciencia y por haber confiado en mí a pesar de las adversidades. Les agradezco profundamente, pues gracias a ellos soy quien soy hoy. Su amor incondicional y su constante guía han sido los pilares que me han permitido llegar hasta aquí. Les agradezco profundamente por cada sacrificio y por enseñarme que, con esfuerzo y perseverancia, se pueden alcanzar grandes metas. Este logro también les pertenece, a ustedes, mi familia.

Dedico este proyecto técnico también a toda mi familia, especialmente a mis abuelos, a mi mami Julita, a mi mami Juanita y a mi papi Oswaldo, por sus oraciones y por enviarme siempre buenas energías. Su apoyo emocional y las fuerzas que me han brindado han sido fundamentales para seguir adelante. Gracias por estar siempre a mi lado, por transmitirme su amor. Gracias por demostrarme, una y otra vez, que la familia es un refugio donde siempre se encuentra amor y comprensión.

Quiero agradecer a Dios por haberme dado salud, por protegerme en cada paso de este camino y por permitirme llegar hasta aquí, completando esta etapa universitaria. Asimismo, quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ing. José Manuel Aller por su predisposición, su valioso conocimiento y por su guía constante a lo largo de la realización de este proyecto técnico. Su apoyo y su dedicación han sido fundamentales para lograr este objetivo. Aprecio profundamente el tiempo y esfuerzo que ha invertido en orientarme y en ayudarme a superar los retos durante todo el proceso.

Quiero agradecer a la vida por cada circunstancia, tanto buena como mala, que se ha presentado en mi camino. Gracias a cada decisión, error y acierto, he llegado hasta donde estoy hoy y he comprendido que es necesario primero conocer y sentir la derrota para entender lo que significa ganar. A lo largo del tiempo, he aprendido a creer en mis capacidades, a mantenerme firme en este proceso académico y a afrontar las dificultades con serenidad, logrando así alcanzar esta meta.

También agradezco a la vida por las personas que ha puesto en mi camino. A mis amigos, quienes, de una u otra forma, han sido parte de este recorrido, brindándome su apoyo, motivación y compañía. Su presencia ha sido clave en los momentos difíciles, donde la unión nos dio fuerza, así como en los momentos de alegría, risas y camaradería que siempre tendré presente en mis pensamientos.

Crear crea realidades.

Pedro José León Rojas

RESUMEN

Este trabajo presenta un modelo de cañón electromagnético desarrollado en la herramienta ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw. El diseño se basa en varias etapas de bobinas circulares a través de las cuales se desplaza una armadura metálica cilíndrica. Utilizando la técnica VBR, cada bobina se convierte en un equivalente dinámico, conformado por una resistencia, una inductancia y una fuente de fuerza electromotriz. Estos parámetros se determinan instantáneamente según la dinámica del sistema mecánico. Las bobinas se activan mediante condensadores inicialmente cargados y se conectan a través de tiristores, que se disparan en momentos específicos determinados por la posición de la armadura. La validez del modelo se verifica mediante resultados experimentales reportados en la literatura, asegurando la precisión y efectividad del enfoque propuesto. Este estudio no solo contribuye al entendimiento de los cañones electromagnéticos, sino que también establece una base para futuras investigaciones y aplicaciones en este campo.

ABSTRACT

This work presents a model of an electromagnetic cannon developed using the ATP-EMTP tool and its graphical environment, ATPDraw. The design is based on multiple stages of circular coils through which a cylindrical metallic armature moves. Utilizing the VBR technique, each coil is transformed into a dynamic equivalent consisting of a resistance, an inductance, and a source of electromotive force. These parameters are determined instantaneously based on the dynamics of the mechanical system. The coils are activated by initially charged capacitors and are connected via thyristors, which are triggered at specific moments determined by the position of the armature. The validity of the model is verified through experimental results reported in the literature, ensuring the accuracy and effectiveness of the proposed approach. This study not only contributes to the understanding of electromagnetic cannons but also establishes a foundation for future research and applications in this field.

PALABRAS CLAVES TEMÁTICAS

Cañón electromagnético
Inductancia mutua
Modelo VBR (Voltage Behind Reactance)
Armadura
Bobinas circulares
Electromagnetic Transient Program
ATPDraw

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un modelo de cañón electromagnético en la herramienta de simulación ATP-EMTP utilizando la interfaz gráfica ATPDraw y la programación en MODELS.

Objetivos Específicos

1. Identificar y analizar las variables y parámetros que intervienen en el funcionamiento del cañón electromagnético.
2. Modelar las ecuaciones electromagnéticas y mecánicas que rigen el comportamiento de un cañón electromagnético en la herramienta ATPDraw, utilizando circuitos, TACS y MODELS.
3. Validar el modelo desarrollado mediante la comparación de los resultados con publicaciones y modelos realizados en otras herramientas.

Grupo Objetivo

Este trabajo sigue una línea de gran desarrollo en la actualidad y diseñar un modelo en ATPDraw que permita la modelación de estos sistemas permitirá a muchos investigadores en el área contar con una herramienta de gran utilidad para diseñar nuevas estrategias de control de los cañones electromagnéticos. El grupo de investigación en Energía GIE, se verá repotenciado en su capacidad de realizar nuevos controles de estos dispositivos y contribuir al conocimiento de esta importante área en desarrollo.

ÍNDICE

1. METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	3
1.1. Metodología	3
1.1.1. Planteamiento del problema teórico	3
1.1.2. Modelo Dinámico	4
1.1.3. Cálculo de parámetros	6
1.1.3.1. Resistencias	6
1.1.3.2. Fricción	6
1.1.3.3. Dimensiones de la bobina y la armadura	8
1.1.3.4. Inductancia Mutua bobina-armadura	9
1.1.3.5. Inductancia Propia de la bobina	10
1.1.3.6. Inductancia Propia de Armadura	11
1.1.4. Modelo VBR del cañón	11
2. RECONSTRUCCION DE INDUCTANCIA MUTUA	14
2.0.1. Modelación en ATPDraw	14
2.0.1.1. Circuito	14
2.0.1.2. Modelación de la inductancia mutua en MODELS	15
3. MODELACIÓN DE LA PRIMERA ETAPA	27
3.0.0.1. Modelo de la primera etapa	27
4. MODELACIÓN DE LAS MÚLTIPLES ETAPAS	35
4.0.0.1. Generación de múltiples etapas	35
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
5.0.1. Resultados de la primera etapa	44
5.0.2. Resultados de las múltiples etapas	45
5.0.3. Comparación con resultados experimentales	47
6. CONCLUSIONES	49
6.1. Tabla de criterios ABET	51

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Análisis físico de la fuerza de rozamiento (diagrama de cuerpo libre)	7
1.2. Análisis físico de la fuerza de rozamiento (diagrama de cuerpo libre)	8
1.3. Circuito VBR del modelo entre bobina y armadura [1]	13
2.1. Circuito equivalente basado en el modelo BVR	15
2.2. Posición relativa bobina y armadura.	15
2.3. Gráfica comportamiento de la inductancia mutua entre la bobina y el armadura con res- pecto a la posición	16
2.4. Adquisición de puntos de interés para la reconstrucción gráfica	17
2.5. Gráfica de la derivada de la inductancia mutua con respecto a la posición a partir del método algebraico en matlab (valores positivos).	18
2.6. Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos)	20
2.7. Modelo utilizado para representar $\frac{dM}{dx}$ y M a partir de una entrada genérica.	21
2.8. Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).	23
2.9. Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).	23
2.10. Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).	24
2.11. Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).	24
3.1. Circuito y modelos usados para la solución de la primera etapa	28
3.2. Gráfica de la velocidad punta alcanzada con la primera etapa.	31
3.3. Gráfica de la corriente de armadura alcanzada con la primera etapa.	32
3.4. Gráfica de el voltaje en el capacitor en la primera etapa	33
3.5. Gráfica de la corriente de bobina en la primera etapa.	34
3.6. Gráfica de fuerza eléctrica en la primera etapa.	34
4.1. Determinación de las posiciones de las bobinas y la armadura al momento del disparo.	36
4.2. Cañón Electromagnético de cinco etapas	37
4.3. Velocidad obtenida de las cinco etapas.	39
4.4. Corriente de armadura de las cinco etapas.	40
4.5. Corriente de la bobina en las cinco etapas	41
4.6. Voltaje del capacitor en las cinco etapas	42
4.7. Fuerza eléctrica de las cinco etapas	43

Índice de tablas

1.1. Valores de los parámetros del cañón electromagnético	9
2.1. Parámetros del modelo en ATPDraw	21
2.2. Inicialización de variables para el cálculo	21
2.3. Parámetros para la simulación dinámica del sistema	25
2.4. Inicialización de variables para el cálculo dinámica	25
3.1. Parámetros para la simulación de la primera etapa	29
3.2. Inicialización de variables para la simulación de la primera etapa	29
5.1. Resultados obtenidos para la velocidad en la primera etapa	45
5.2. Resultados de cada etapa del proceso	46
5.3. Resultados de corriente de bobina y velocidad experimental	47
6.1. Áreas del Trabajo de Grado	52

INTRODUCCIÓN

El cañón electromagnético es un dispositivo que emplea campos magnéticos generados por corrientes eléctricas para acelerar proyectiles a altas velocidades. A diferencia de los cañones convencionales que utilizan propulsión química, este sistema se basa en la interacción entre bobinas electromagnéticas y una armadura conductora, permitiendo la conversión eficiente de energía eléctrica en energía cinética. Entre los principales diseños de cañones electromagnéticos destacan el cañón de riel y el cañón de bobinas, también conocido como cañón de Gauss, cuya implementación ha sido objeto de estudio en diversas aplicaciones militares, aeroespaciales y científicas.

El desarrollo del cañón electromagnético tiene sus orígenes en las investigaciones de André Louis Octave Fauchon-Villeplee en 1918, quien propuso el uso de energía eléctrica para la aceleración de proyectiles [2]. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas de la época, tales como la insuficiencia de fuentes de energía y materiales adecuados, impidieron su aplicación práctica. Décadas más tarde, la Armada de los Estados Unidos retomó este concepto, impulsando su desarrollo con fines militares. Desde entonces, los avances en electrónica de potencia, materiales superconductores y técnicas de control han permitido la optimización de estos sistemas, mejorando su eficiencia energética y precisión operativa.

Uno de los enfoques recientes más prometedores en esta tecnología es el cañón de bobina de inducción síncrono multietapa (MSSICG), el cual ha demostrado un desempeño superior en la propulsión sin contacto de proyectiles [3]. Este diseño se basa en la sincronización precisa entre la alimentación de las bobinas y el movimiento del proyectil, permitiendo una aceleración controlada y minimizando pérdidas energéticas. Sin embargo, el principal desafío radica en la exactitud del sincronismo entre la activación de las bobinas y la trayectoria del proyectil, lo que motiva el desarrollo de nuevos modelos de simulación y experimentación.

El interés en los cañones electromagnéticos se extiende más allá del ámbito militar. Investigaciones recientes han explorado su uso en la propulsión de satélites, ofreciendo una alternativa eficiente y económica para el lanzamiento de nanosatélites [4]. Asimismo, Schroeder [5] propuso un modelo orientado a la propulsión espacial, resaltando su potencial para mejorar la accesibilidad al espacio mediante sistemas electromagnéticos de lanzamiento.

Para el desarrollo y análisis de sistemas electromagnéticos complejos, es fundamental contar con herramientas de simulación especializadas. En este contexto, ATP-EMTP (Alternative Transients Program – Electromagnetic Transients Program) ha sido ampliamente utilizado en el estudio de transitorios elec-

tromagnéticos en sistemas eléctricos. Desde su origen en 1970 como EMTP y su posterior evolución hacia ATP en 1993, este software ha permitido a los ingenieros modelar fenómenos eléctricos con alta precisión. Con la incorporación de ATPDraw en la década de 1990, se ha facilitado la implementación gráfica de circuitos eléctricos, permitiendo una mayor flexibilidad en la simulación de dispositivos electromagnéticos [6].

En este proyecto técnico, se desarrolla un modelo de cañón electromagnético utilizando la herramienta ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw, basado en un sistema de bobinas circulares dispuestas en múltiples etapas y por su centro se acelera una armadura cilíndrica conductora. La activación de las bobinas se realizará mediante un banco de capacitores inicialmente cargados. Las bobinas se energizan conectando los bancos de condensadores mediante tiristores. Este modelo permite evaluar el comportamiento dinámico del cañón electromagnético con diferentes bancos de condensadores, voltajes de carga, variaciones en las dimensiones de las bobinas y de la armadura, entre otras. La metodología empleada se fundamenta en la técnica *Voltage Behind Reactance* (VBR), que modela cada bobina como un equivalente de Thevenin dinámico, compuesto por una resistencia, una inductancia y una fuente de fuerza electromotriz, cuyos parámetros varían instantáneamente en función de la dinámica del sistema mecánico.

Para comprobar el funcionamiento del modelo propuesto, los resultados de la simulación se contrastan con datos experimentales reportados en la literatura, asegurando que las respuestas obtenidas sean coherentes en relación a otras experimentaciones de cañones electromagnético existentes. Este estudio, además de reforzar el conocimiento teórico sobre la propulsión electromagnética, también proporciona una base analítica para el diseño y optimización de futuros sistemas de lanzamiento.

La implementación de esta metodología abre nuevas oportunidades para el desarrollo de aplicaciones avanzadas en el ámbito aeroespacial y militar, consolidando el papel de los cañones electromagnéticos como una tecnología emergente con un amplio potencial.

CAPÍTULO 1

METODOLOGÍA Y MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Metodología

1.1.1. Planteamiento del problema teórico

El cañón electromagnético es un dispositivo que permite la propulsión de proyectiles mediante la conversión de energía eléctrica en energía cinética a través de fuerzas electromagnéticas. Su funcionamiento se basa en la interacción entre campos eléctricos y magnéticos generados por corrientes de alta intensidad, lo que permite la aceleración de un proyectil sin la necesidad de combustibles químicos o explosivos.

El principio fundamental que rige el funcionamiento de un cañón electromagnético es la fuerza, que experimenta una carga eléctrica en presencia de campos electromagnéticos. En este contexto, al aplicar una corriente eléctrica a un conjunto de bobinas alineadas, se genera un campo magnético que induce una fuerza sobre un proyectil conductor, impulsándolo a través del tubo de lanzamiento.

Para modelar el comportamiento de un cañón electromagnético, es necesario analizar diversas variables eléctricas y mecánicas que determinan su eficiencia y desempeño. Entre ellas, se encuentran la intensidad de la corriente de las bobinas y de la armadura, la configuración y geometría de las bobinas, la variación del campo magnético en el tiempo y la fuerza producida durante la interacción. Asimismo, es crucial calcular las inductancias propias y mutuas del sistema, debido a que estas afectan la transferencia de energía y la aceleración del proyectil.

Desde el punto de vista físico, las fuerzas que actúa sobre la armadura y las bobinas, se obtiene

a partir del principio de los trabajos virtuales, considerando las variaciones de la coenergía del campo magnético [7] con respecto a la posición. Esta fuerza neta produce una aceleración de acuerdo con la segunda ley de Newton [8], cuya velocidad final depende de factores tales como la eficiencia del sistema de conversión de energía, las pérdidas resistivas en las bobinas, la fricción producida entre el proyectil, el tubo de lanzamiento y el aire circundante.

Otro aspecto relevante en la modelación de un cañón electromagnético es la variación de la inductancia con la posición de la pieza móvil. El cálculo de estas inductancias requiere utilizar métodos numéricos eficientes que permitan determinar su valor en cualquier posición. Para este fin se pueden utilizar varios métodos entre los cuales se destacan el de los elementos finitos y el de los filamentos [9]. Los elementos finitos requieren un gran esfuerzo computacional debido a que representan el espacio de la interacción con pequeños elementos tetraédricos donde se resuelven las ecuaciones de Maxwell y posteriormente se interpolan las soluciones a cualquier punto del espacio de solución. Por otra parte el método de los filamentos utiliza la partición de las bobinas en aro, cuya interacción se resuelve mediante la ley de Biot-Savart. Estos aros interactúan entre si y mediante reducciones de las matrices que configuran esta geometría a los puntos de interés que pueden los extremos de las bobinas o de la armadura, determinan las diferentes inductancias. El método de los filamentos reduce significativamente el esfuerzo computacional requerido para la determinación de las inductancias con respecto a la posición y simplifica la definición de las condiciones de contorno de ellas.

El modelado computacional de un cañón electromagnético permite analizar estos fenómenos de manera más detallada, facilitando el cálculo de las fuerzas involucradas y la predicción del comportamiento del proyectil. A través de herramientas de simulación, es posible estudiar cómo la disposición de las bobinas, la magnitud de la corriente y la geometría del sistema afectan la velocidad y eficiencia del cañón. Este tipo de análisis resulta esencial para diseñar dispositivos más eficientes y optimizar su rendimiento.

En este contexto, el problema teórico que se plantea es cómo modelar un cañón electromagnético de manera que se integren correctamente las variables electromagnéticas y mecánicas involucradas. Para ello, se deben analizar los efectos de las corrientes y la fuerza electromagnética sobre la armadura, con el fin de calcular con precisión la aceleración, velocidad y posición del proyectil. Este modelo permite evaluar eficiencias, cambios en los diseños de las bobinas y armaduras, así como variaciones de los circuitos de energización.

1.1.2. Modelo Dinámico

Para modelar la dinámica de un cañón electromagnético es necesario incorporar las ecuaciones internas que determinan las fuerzas electromotrices en las bobinas y la fuerza eléctrica en la pieza móvil o armadura. Las fuerzas electromotrices se obtienen a partir de la derivada de los enlaces de flujo en la bobina y la fuerza eléctrica mediante el principio de los trabajos virtuales. La ecuación de mallas de Kirchoff permiten conectar las fuerzas electromotrices con la red eléctrica del cañón y la segunda ley de Newton [8] relaciona la aceleración con las fuerzas que interactúan en este dispositivo.

La ecuación que representa el modelo de una bobina constituida por un solenoide concéntrico, separada

por una distancia x de una armadura cilíndrica sólida, puede expresarse como [10]:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_c \\ v_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c \\ i_a \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \lambda_c \\ \lambda_a \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} R_c & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c \\ i_a \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_c & M_{ca}(x) \\ M_{ca}(x) & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c \\ i_a \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

donde:

R_c Es la resistencia de la bobina fija.

R_a Es la resistencia de la armadura.

L_a Es la inductancia de la armadura.

L_c Es la inductancia de la bobina fija.

M_{ca} Es la inductancia mutua, que es función de la distancia x entre la bobina fija y la armadura.

Para calcular la fuerza ejercida por el campo magnético de la bobina sobre la armadura (proyector), se utiliza el principio de los trabajos virtuales [11],

$$F_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_c & i_a \end{bmatrix} \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} L_c & M_{ca}(x) \\ M_{ca}(x) & L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_c \\ i_a \end{bmatrix} = i_c i_a \frac{d}{dx} M_{dp} = m_a \frac{dv}{dt}, \quad (1.2)$$

La ecuación (1.2) permite determinar la magnitud de la fuerza generada por el campo magnético. La corriente que circula a través de la bobina equivalente a la carga almacenada en el condensador que la alimenta, lo que determina la intensidad del campo magnético producido. Esto incorpora la ecuación del comportamiento del condensador C_c en este circuito,

$$C_c \frac{dv_a}{dt} = -i_c. \quad (1.3)$$

Finalmente se incorpora la ecuación cinemática,

$$\frac{dx}{dt} = v, \quad (1.4)$$

donde,

F_e es la fuerza eléctrica entre la bobina y armadura.

m_a es la masa de la armadura.

C_c es la capacitancia la que excita a la bobina.

1.1.3. Cálculo de parámetros

1.1.3.1. Resistencias

Para el cálculo de la resistencia de la bobina es necesario utilizar la ecuación general para hallar la resistencia de un conductor la cual está dada de la siguiente forma [11].

$$R = \rho \frac{L}{A}, \quad (1.5)$$

donde:

R es la resistencia de la bobina (Ω)

ρ es la resistividad del material del alambre ($\Omega \cdot m$)

L es la longitud del alambre (m)

A es el área de la sección transversal del alambre (m^2)

Es importante resaltar que las bobinas que inducen el campo magnético se consideran de alambre de cobre y por lo tanto su resistividad es:

$$\rho = 1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

Para determinar la longitud de la bobina a partir del número de vueltas N y el diámetro D de el alambre que constituye la bobina se utiliza la siguiente ecuación [11]:

$$L = N \cdot \pi \cdot D \quad (1.6)$$

Hay que tener en cuenta que el área de sección transversal de un alambre de cobre es un círculo por lo tanto, la ecuación del área de una circunferencia es,

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (1.7)$$

1.1.3.2. Fricción

Para estimar la fricción dentro de la trayectoria de la pieza móvil hay que tener en cuenta el coeficiente de rozamiento dinámico en un plano inclinado que reduce la velocidad de la armadura. Para el caso del análisis de la velocidad y la aceleración del proyectil es esencial conocer dicho parámetro porque este afecta a estas variables.

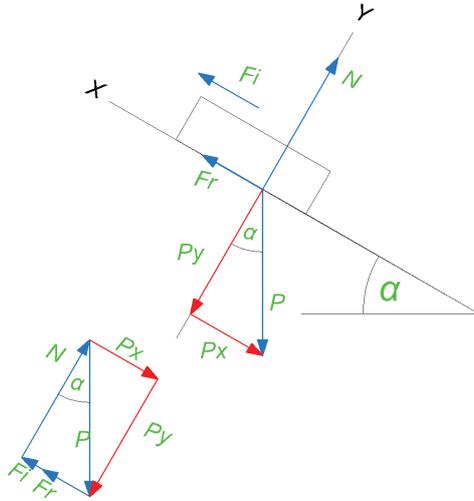


Figura 1.1: Análisis físico de la fuerza de rozamiento (diagrama de cuerpo libre) .

Cuando el proyectil se encuentra dentro del tubo y se produce una inclinación con un ángulo α , experimenta dos fuerzas que se oponen al movimiento, siendo F_r la fuerza de fricción y F_i la fuerza producida por la inercia [8].

La ecuación de equilibrio de fuerzas se expresa como:

$$\vec{P} + \vec{F}_r + \vec{N} + \vec{F}_i = 0 \quad (1.8)$$

Desglosando los vectores en sus componentes tangenciales y normales se tiene lo siguiente

$$\begin{cases} P_y = N \\ P_x - F_r = F_i \end{cases}$$

Teniendo en cuenta

$$\begin{cases} F_r = \mu_d N \\ P = mg \\ F_i = ma \end{cases}$$

Descomponiendo las componentes de cada vector tenemos que :

$$\begin{cases} P_y = P \cos(\alpha) \\ P_x = P \sin(\alpha) \end{cases}$$

A partir de las ecuaciones físicas que describen las condiciones de equilibrio dinámico , al tener cuenta que el cuerpo se desliza a una velocidad constante la fuerza de inercia puede ser despreciada entonces tenemos que :

$$P \sin(\alpha) = \mu_d P \cos(\alpha)$$

Semejante al caso estático:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\cos(\alpha)} = \tan(\alpha) = \mu_d$$

1.1.3.3. Dimensiones de la bobina y la armadura

Las dimensiones de la bobina y la armadura utilizadas en este proyecto técnico se basan en las investigaciones de Niu [3], que estudian la sincronización del disparo cuando la armadura atraviesa la bobina. Dado que el modelo de Niu es distinto, estas dimensiones se adoptan para aplicarlas al modelo desarrollado en este proyecto y comparar los resultados obtenidos con los de su investigación.

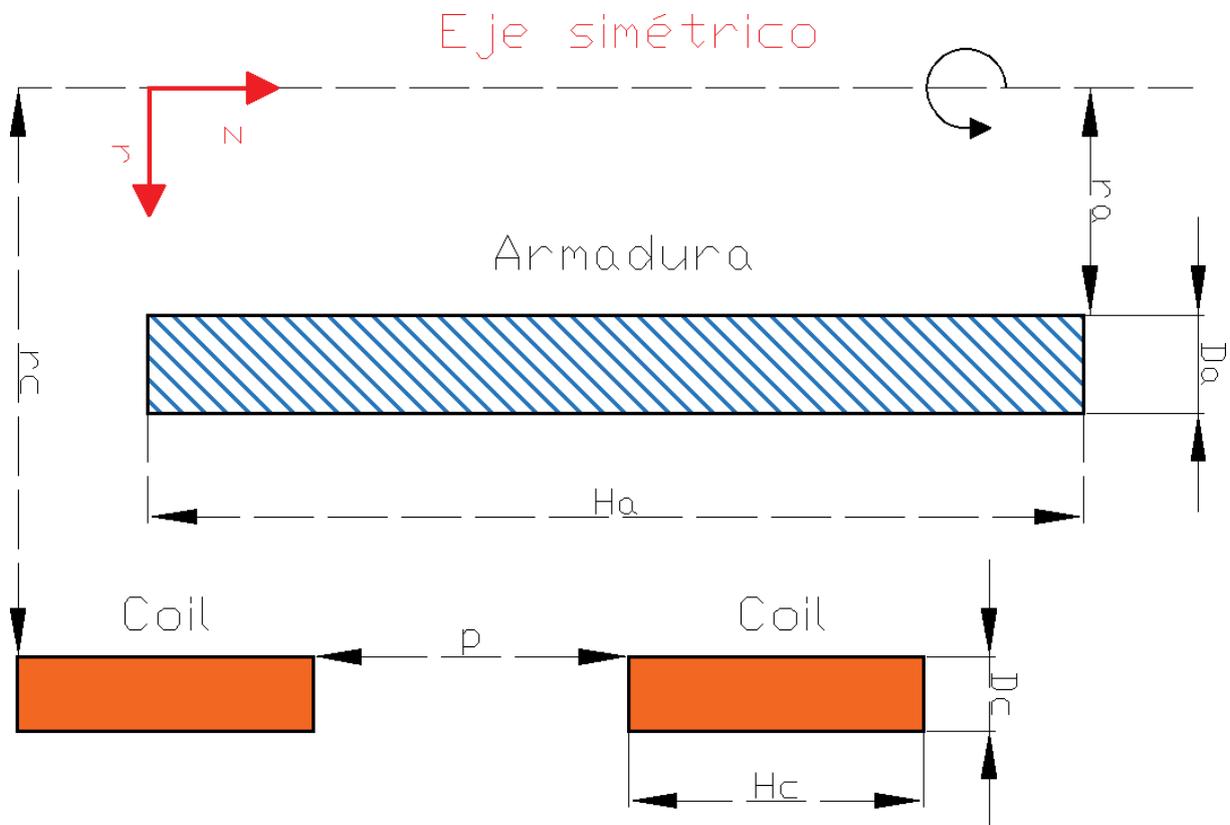


Figura 1.2: Análisis físico de la fuerza de rozamiento (diagrama de cuerpo libre) .

Las dimensiones se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 1.1: Valores de los parámetros del cañón electromagnético

	Parámetros	Valores
Bobina	r_c	10.5 cm
	H_c	6 cm
	p	300 mm
	N	55
Armadura	m_a	1.46 kg
	r_a	8 cm
	H_a	19 cm
	D_a	1 cm
PPS	C	4 mF
	U_0	1.87 kV
	R_c	20 m Ω

1.1.3.4. Inductancia Mutua bobina-armadura

Las inductancias mutuas de dos anillos concéntricos (bobina-armadura) separados por una distancia z que se obtiene de la expresión:

$$M_{ij} = \frac{2\mu_0\sqrt{R_i R_j}}{k} \left[\left(1 - \frac{k^2}{2}\right) K(k) - E(k) \right] \quad (1.9)$$

donde,

$$k^2 = \frac{4R_i R_j}{(R_i + R_j)^2 + c^2} \quad (1.10)$$

$K(k)$ es la integral elíptica completa de primer orden y $E(k)$ es la integral elíptica completa de segundo orden.

Para determinar la inductancia mutua, es necesario calcular el flujo total vinculado entre todos los filamentos y dividirlo por la corriente que los produce [4]:

$$\lambda_{ac} = \frac{N_{\text{arm}}}{v w} \sum_j \left(\sum_i \phi_{ij} \right) = \frac{N_{\text{arm}}}{v \times w} \sum_j \left(\sum_i M_{ij} I_i \right) \quad (1.11)$$

$$I_i = \frac{N_{\text{coil}} I_{\text{coil}}}{m \times n} \quad (1.12)$$

$$M_{ac} = \frac{\lambda_{ac}}{I_{\text{coil}}} = \frac{N_{\text{coil}} N_{\text{arm}}}{n \times m \times v \times w} \sum_j \sum_i M_{ij} \quad (1.13)$$

Se puede calcular la inductancia mutua entre la bobina y la armadura cuando todos los filamentos de la bobina y la armadura tienen una densidad de corriente uniforme, por formar parte de un solenoide. No obstante, para el caso de una armadura sólida, cada filamento tiene una densidad de corriente diferente y no es posible sumar directamente todas las contribuciones. En este caso, se puede determinar la

inductancia mutua de la bobina con cada uno de los filamentos constituyentes de la armadura y se puede encontrar la siguiente relación entre todos los enlaces de flujo [\[11\]](#):

$$p \begin{bmatrix} \lambda_{\text{coil}} \\ \lambda_{a1} \\ \lambda_{a2} \\ \vdots \\ \lambda_{a(v \times w)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\text{coil}} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\text{coil}} & M_{ca1} & M_{ca2} & \cdots & M_{ca(v \times w)} \\ M_{ca1} & L_f & M_{a1a2} & \cdots & M_{a1(v \times w)} \\ M_{ca2} & M_{a2a1} & L_f & \cdots & M_{a2(v \times w)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{ca(v \times w)} & M_{a(v \times w)a1} & M_{a(v \times w)a2} & \cdots & L_f \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{\text{coil}} \\ i_{a1} \\ i_{a2} \\ \vdots \\ i_{a(v \times w)} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

Aplicando la reducción de Kron, la inductancia propia y mutua de la armadura son referidas al coil:

$$\begin{bmatrix} v_{\text{coil}} = p\lambda_{\text{coil}} \\ p[\lambda_a]_{(vw) \times 1} = [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\text{coil}} & [M_{ca}]_{1 \times (vw)} \\ [M_{ac}]_{(vw) \times 1} & [M_{aa}]_{(vw) \times (vw)} \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{\text{coil}} \\ [i_a]_{(vw) \times 1} \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} [M_{ac}]_{(vw) \times 1} p i_{\text{coil}} + [M_{aa}]_{(vw) \times (vw)} p [i_a]_{(vw) \times 1} &= [0]_{(vw) \times 1} \\ p [i_a]_{(vw) \times 1} &= -([M_{aa}]_{(vw) \times (vw)})^{-1} [M_{ac}]_{(vw) \times 1} p i_{\text{coil}} \end{aligned} \quad (1.16)$$

Se reemplaza [\(1.16\)](#) en [\(1.15\)](#):

$$v_{\text{coil}} = p\lambda_{\text{coil}} = (L_{\text{coil}} - [M_{ca}][L_{aa}]^{-1}[M_{ca}]^T) p i_{\text{coil}} = L_{\text{eq}} p i_{\text{coil}} \quad (1.17)$$

donde,

$$[M_{ca}] = \begin{bmatrix} M_{ca1} & M_{ca2} & \cdots & M_{ca(v \times w)} \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

Con ello, se obtiene:

$$[L_{aa}] = \begin{bmatrix} L_f & M_{a1a2} & \cdots & M_{a1(v \times w)} \\ M_{a2a1} & L_f & \cdots & M_{a2(v \times w)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{a(v \times w)a1} & M_{a(v \times w)a2} & \cdots & L_f \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

1.1.3.5. Inductancia Propia de la bobina

El cálculo de la inductancia propia de la bobina se obtiene usando la expresión para un solenoide [\[11\]](#),

$$L_{\text{coil}} = \mu_0 \left(\frac{N_{\text{coil}}}{l_{\text{coil}}} \right)^2 \left\{ l_{\text{coil}}^4 + \frac{4L_{\text{coil}}^2 R_{\text{coil}}^2}{3D} K(k_{\text{coil}}) + (4R_{\text{coil}}^2 - L_{\text{coil}}^2) \frac{D}{3} E(k_{\text{coil}}) - \frac{8}{3} R_{\text{coil}}^3 \right\} \quad (1.20)$$

donde,

$$k_{\text{coil}} = \sqrt{\frac{4R_{\text{coil}}^2}{D}} \quad \text{y} \quad D = \sqrt{4R_{\text{coil}}^2 + l_{\text{coil}}^2} \quad (1.21)$$

1.1.3.6. Inductancia Propia de Armadura

La inductancia propia de un filamento puede ser determinada usando la expresión desarrollada por Maxwell, calculando la inductancia mutua entre dos filamentos circulares iguales separados por su GMD (Distancia Media Geométrica), para un conductor de radio r [1]:

$$\text{GMD} = e^{-\frac{1}{4}} r = 0,7788r$$

$$L_a = \mu_o r \left((1 + 0,1137 \frac{R^2}{r^2}) \ln \left(\frac{8r}{R} \right) - 0,0095 \frac{R^2}{r^2} - 1,75 \right) \quad (1.22)$$

Para determinar la inductancia propia de la armadura L_a , es necesario determinar la inductancia mutua con la expresión [1.13], por lo que, para dos armaduras separadas axialmente por la GMD. Para ello, se debe calcular la GMD de un cilindro coaxial con radio exterior r_u y radio interior r_d . Esto se puede hacer aplicando el método de Monte Carlo para determinar la media geométrica de un gran número de pares de puntos entre los dos cilindros, tal como se indica [1]:

$$\text{GMD} \approx \exp \left(\sum_{i=1}^N \ln \left(\sqrt{(s_{x_i} - t_{x_i})^2 + (s_{y_i} - t_{y_i})^2} \right) \right), \quad (1.23)$$

donde las variables s_{x_i} , s_{y_i} , t_{x_i} y t_{y_i} , son pares de puntos determinados aleatoriamente que se encuentran dentro del área del conductor. Con una cantidad muy grande de puntos, como por ejemplo $N \rightarrow \infty \approx 10^8$ puntos, el valor GMD de la sección en consideración puede ser determinado con suficiente precisión.

1.1.4. Modelo VBR del cañón

El modelo VBR (Voltage Behind Reactance) es una representación eléctrica y matemática del cañón electromagnético, útil para describir cómo la resistencia e inductancia de la bobina varían a medida que el proyectil se desplaza a lo largo de su trayectoria. Estas variaciones dependen de la posición del proyectil, ya que la proximidad de un material ferromagnético puede afectar la impedancia del circuito.

Para desarrollar un modelo de circuito dinámico, se puede emplear la técnica VBR (Voltage Behind Reactance). Utilizando la ecuación del enlace de flujo de armadura de [1.1], se tiene [1],

$$\lambda_a = M_{ca}(x) i_c + L_a i_a \Rightarrow i_a = \frac{\lambda_a - M_{ca}(x) i_c}{L_a} \quad (1.24)$$

Y con la ecuación de armadura de [1.1] se determina,

$$0 = R_a i_a + p \lambda_a \Rightarrow \lambda_a = -\frac{R_a}{L_a} \lambda_a + \frac{R_a}{L_a} M_{ca}(x) i_c \quad (1.25)$$

Con la ecuación de la bobina de (1.1) se obtiene,

$$v_c = R_c i_c + L_c p i_c + M_{ca} p i_a + v \frac{dM_{ca}}{dx} i_a \quad (1.26)$$

Reemplazando (1.24) y (1.25), en (1.26), se obtiene:

$$v_c = R_c i_c + L_c p i_c + \frac{M_{ca}}{L_a} (p \lambda_a - p (M_{ca} i_c)) + v \frac{dM_{ca}}{dx} i_a$$

$$v_c = R_c i_c + L_c p i_c + \frac{M_{ca}}{L_a} \left(-\frac{R_a}{L_a} \lambda_a + \frac{R_a}{L_a} M_{ba} i_c - \left(M_{ca} p i_c + v \frac{dM_{ca}}{dx} i_c \right) \right) + v \frac{dM_{ca}}{dx} \left(\frac{\lambda_a - M_{ca} i_c}{L_a} \right)$$

$$v_c = \left(R_c + R_a \frac{M_{ca}^2}{L_a^2} \right) i_c + \left(L_c - \frac{M_{ca}^2}{L_a} \right) p i_c + \left(-R_a \frac{M_{ca}}{L_a^2} + v \frac{1}{L_a} \frac{dM_{ca}}{dx} \right) \lambda_a - 2v \frac{M_{ca}}{L_a} \frac{dM_{ca}}{dx} i_c$$

Con lo cual se obtiene el modelo VBR del cañón electromagnético:

$$v_c = R_{eq} i_c + L_{eq} p i_c + e_c, \quad (1.27)$$

$$R_{eq} = R_c + \frac{M_{ca}^2}{L_a^2} R_a \quad (1.28)$$

$$L_{eq} = L_c - \frac{M_{ca}^2}{L_a} \quad (1.29)$$

$$e_c = \left(v \frac{1}{L_a} \frac{dM_{ca}}{dx} - \frac{M_{ca} R_a}{L_a^2} \right) \lambda_a - 2v \frac{M_{ca}}{L_a} \frac{dM_{ca}}{dx} i_c \quad (1.30)$$

Representando el modelo VBR en forma canónica, se obtiene:

$$\begin{cases} p \lambda_a = -\frac{R_a}{L_a} \lambda_a + \frac{R_a}{L_a} M_{ba} i_c \\ p u = \frac{1}{m_a} \frac{\lambda_a i_c - M_{ba} i_c^2}{L_a} - \frac{dM_{ca}}{dx} \\ p x = u \end{cases}, \quad (1.31)$$

donde R_{eq} , L_{eq} y e_c se definen en (1.28), (1.29) y (1.30).

En la Fig. 1.3 se presenta el modelo VBR obtenido para la modelación del cañón electromagnético a partir de las expresiones (1.28) - (1.30). Este modelo es un equivalente de Thevenin dinámico.

Finalmente, las condiciones iniciales del enlace de flujo de la armadura. $\lambda_a(0)$, corriente en la bobina $i_f(0)$, velocidad inicial $u(0)$, posición inicial $x(0)$, y voltaje inicial del capacitor $v_f(0) = V_c$ debe ser definido.

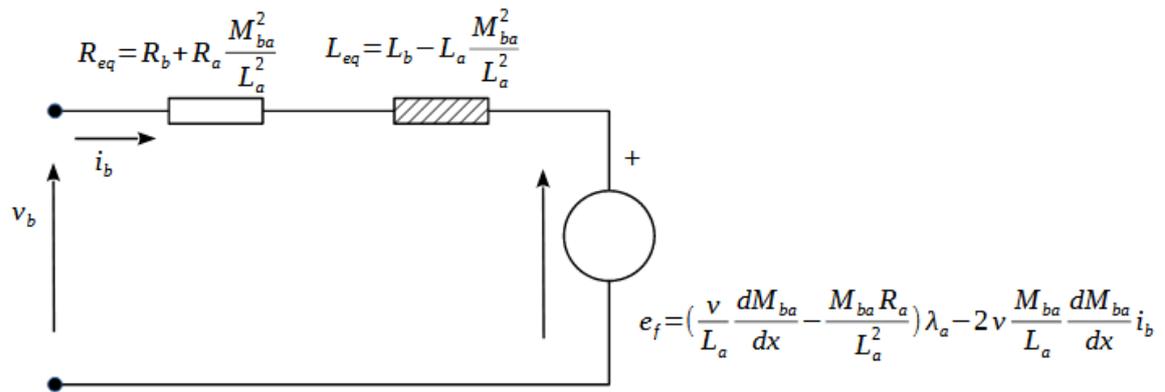


Figura 1.3: Circuito VBR del modelo entre bobina y armadura [1]

CAPÍTULO 2

RECONSTRUCCION DE INDUCTANCIA MUTUA

2.0.1. Modelación en ATPDraw

El programa ATPDraw es una interfaz visual hombre-máquina que permite utilizar de manera eficiente la herramienta ATP-EMTP. En este software, es posible integrar circuitos eléctricos complejos, sistemas de control TACS y elementos de programación en el lenguaje MODELS. Para desarrollar el modelo del comportamiento del cañón electromagnético en esta herramienta, se combinarán estas tres partes. El circuito, constituido por el condensador, el tiristor y la bobina, se modela mediante elementos circuitales propios de ATP-EMTP. Los controles de las fuentes y el disparo del tiristor se activan mediante elementos TACS. Por otro lado, la dinámica del sistema y el cálculo de las inductancias en función de la posición se realizan mediante programación en el lenguaje MODELS.

2.0.1.1. Circuito

En la Fig. 2.1 se presenta el circuito utilizado en ATPDraw para modelar una etapa del cañón electromagnético. Este circuito contiene el condensador donde se almacena la energía para el disparo. Un tiristor activado mediante TACS con su respectivo circuito Snubber para evitar sobre voltajes transitorios y unas componentes variables mediante TACS R , L y la fuerza electromotriz E_{eq} , las cuales obtendrán sus valores instantáneos a partir de los modelos realizados en programas MODELS. Este circuito se fundamenta en el modelo VBR propuesto y tiene como objetivo determinar la corriente en la bobina. Esta variable es utilizada como entrada para los cálculos realizados dentro del bloque MODELS ($dM - M$).

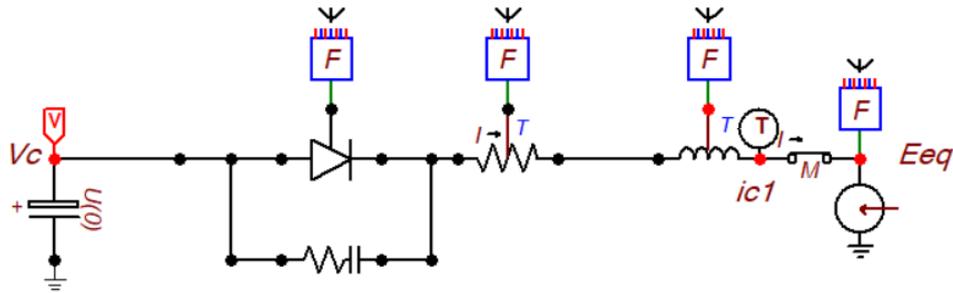


Figura 2.1: Circuito equivalente basado en el modelo BVR

2.0.1.2. Modelación de la inductancia mutua en MODELS

Para la modelación del comportamiento de la inductancia mutua se partió de la reconstrucción del cálculo de la inductancia mutua entre la bobina y la armadura con respecto a la posición. Esta gráfica fue obtenida mediante un programa de MATLAB el cual reproduce el desempeño del cañón electromagnético para cada una de las variables de interés considerando el acoplamiento entre bobinas al momento de efectuar el disparo.

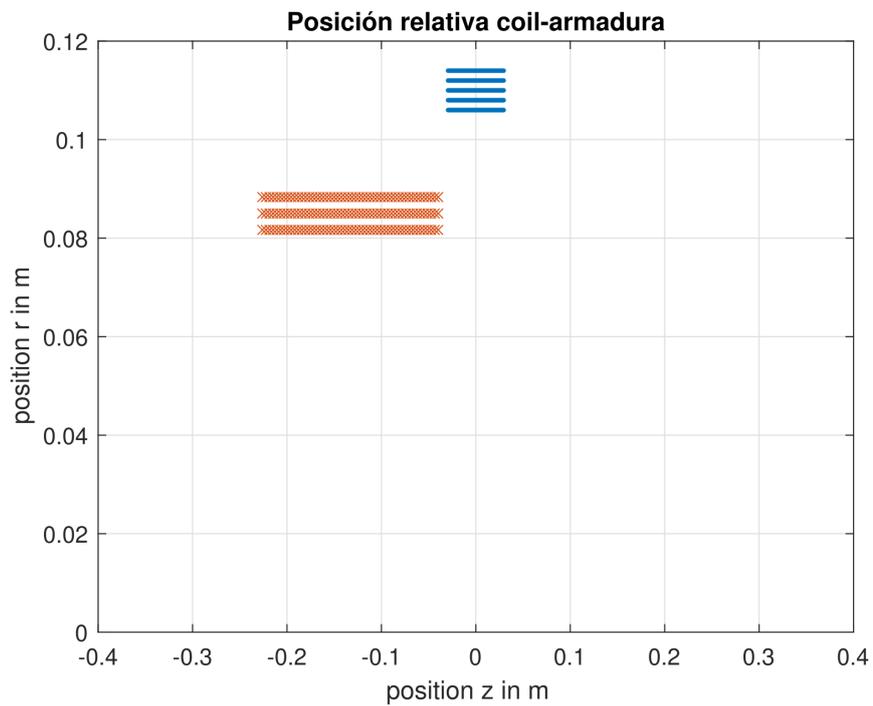


Figura 2.2: Posición relativa bobina y armadura.

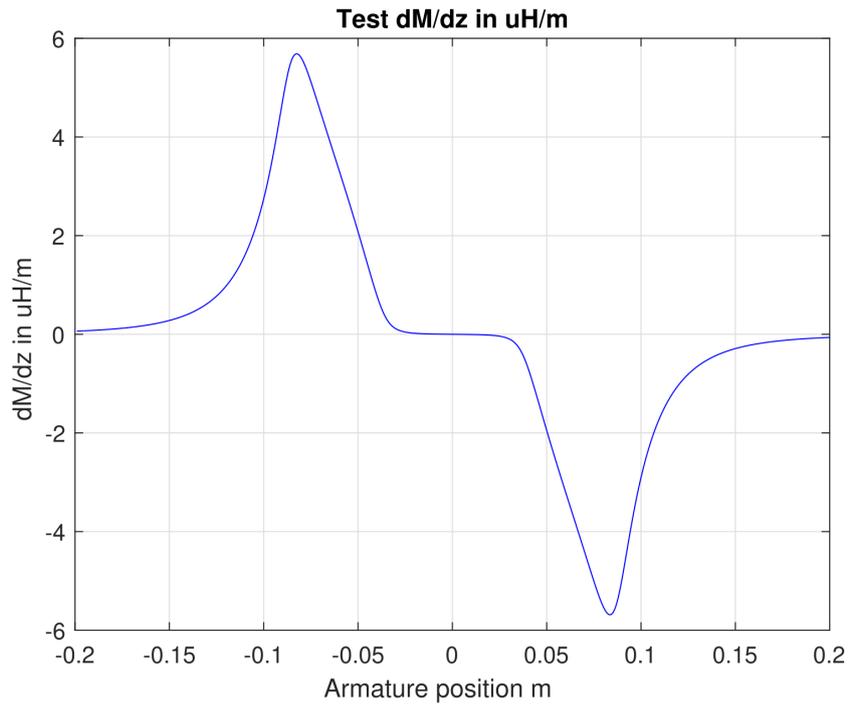


Figura 2.3: Gráfica comportamiento de la inductancia mutua entre la bobina y el armadura con respecto a la posición .

A partir de la gráfica presentada en la Fig. 2.3 se aproximó la función mediante rectas y funciones exponenciales. Para facilitar la reconstrucción algebraica se parte de seleccionar los tres puntos de la gráfica inicial y se colocan todos positivos para facilidad de cálculo. Con ello, se logra replicar el comportamiento de la gráfica inicial de donde se escogieron los puntos indicados en la Fig. 2.4

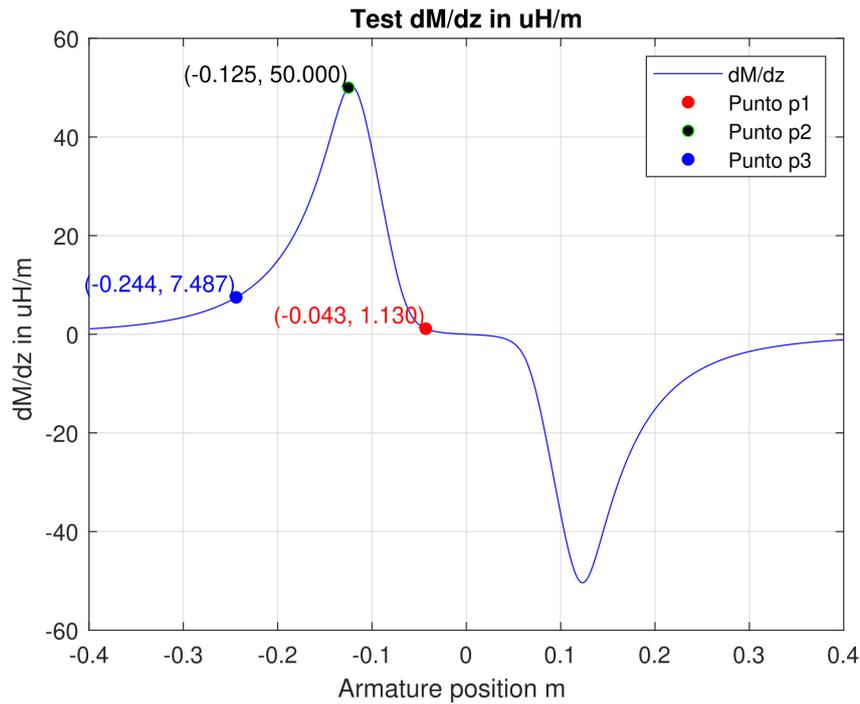


Figura 2.4: Adquisición de puntos de interés para la reconstrucción gráfica

El comportamiento detectado en la Fig. 2.4 indica que para P_1 habrá una recta en cero; entre el P_1 y P_2 se obtiene una recta; y, para el punto P_2 y P_3 se observa un comportamiento exponencial.

Los puntos seleccionados para la reconstrucción son:

$$P_1 : (x_1 = 0,043; y_1 = 1,13 \times 10^{-6})$$

$$P_2 : (x_2 = 0,125; y_2 = 5 \times 10^{-5})$$

$$P_3 : (x_3 = 0,244; y_3 = 7,487 \times 10^{-6})$$

Se establece esta ecuación para aproximar el comportamiento exponencial a partir de los puntos P_2 y P_3 :

$$y = Ae^{B(x-x_2)}$$

Para y_2 se tiene:

$$y_2 = Ae^{B(0)}$$

$$y_2 = A$$

Para y_3 se despeja B :

$$y_3 = y_2 e^{B(x_2-x_3)} \tag{2.1}$$

$$\log y_3 = \log y_2 + B(x_2 - x_3)$$

$$B = \frac{\log y_3 - \log y_2}{x_2 - x_3} \quad (2.2)$$

La función de y_B es la que se va a integrar. El criterio de integración parte de analizar la gráfica de derecha a izquierda, es decir, de infinito a un valor x general de la gráfica:

$$y = y_2 e^{\left(\frac{\log y_3 - \log y_2}{x_2 - x_3}\right) \cdot (x - x_2)} \quad (2.3)$$

Para reconstruir la gráfica de manera más eficiente, se utilizó la herramienta de programación MATLAB debido a su interfaz intuitiva y su simplicidad. Una vez obtenido el comportamiento deseado, se implementó el código en el lenguaje de programación del bloque MODELS en ATPDraw, con el objetivo de que las gráficas generadas en ATPDraw coincidieran con las obtenidas en MATLAB.

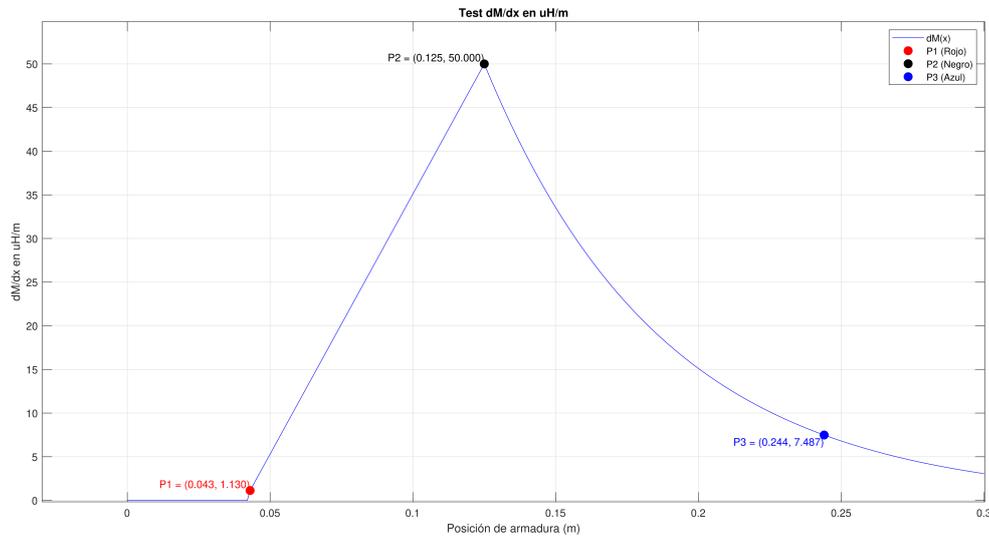


Figura 2.5: Gráfica de la derivada de la inductancia mutua con respecto a la posición a partir del método algebraico en matlab (valores positivos).

Es importante mencionar que para calcular la inductancia mutua entre la bobina y el armadura con respecto a la posición es necesario realizar la integración de cada tramo obtenido de la derivada de la inductancia mutua con respecto a la posición, por lo que se tiene:

Se integra del infinito hasta x :

$$\int_{\infty}^x y_2 e^{\left(\frac{\log y_3 - \log y_2}{x_2 - x_3}\right) \cdot (x - x_2)} dx$$

$$f(x_2) = \left[y_2 \left(\frac{1}{B} \right) e^{B(x - x_2)} \right]_{\infty}^{x_2}$$

$$f(x_2) = y_2 \left[\frac{e^{B(x_2 - x_2)}}{B} - \frac{e^{B(\infty - x_2)}}{-B} \right]$$

$$f(x_2) = \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} \quad (2.4)$$

Para la ecuación de la recta se obtiene la pendiente:

$$m = \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \quad (2.5)$$

Con la ecuación punto-pendiente se obtiene la ecuación de la recta, se toma la pendiente anteriormente encontrada y el punto $(x_1; y_1)$:

$$y = \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 \right) \quad (2.6)$$

Continuando con la integración de la gráfica reconstruida, se evalúa la integral de la ecuación de la recta antes encontrada en un intervalo de x_1 y x_2 , además se suma el resultado de la integral anterior correspondiente al intervalo de infinito a x :

$$\begin{aligned} f(x) &= \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 \right) dx + \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} \\ f(x) &= \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} + \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x^2}{2} \right) + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \cdot x \right]_{x_1}^{x_2} \\ f(x) &= \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} + \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x_2^2}{2} \right) + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \cdot x_2 \right] \\ &\quad - \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x_1^2}{2} \right) + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \cdot x_1 \right] \\ f(x) &= \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot (x_2^2 - x_1^2) + \left(y_1 - \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \right) \cdot (x_2 - x_1) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Ahora se hace la integración de la ecuación de la recta para el intervalo de x a x_2 , de la misma forma, se suma el resultado de la primera integración de la función exponencial en el intervalo de ∞ a x :

$$\begin{aligned} f(x_2) &= \int_x^{x_2} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 \right) dx + \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} \\ f(x_2) &= \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} + \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x^2}{2} \right) + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \cdot x \right]_x^{x_2} \\ f(x_2) &= \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} + \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x_2^2}{2} \right) + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \cdot x_2 \right] \\ &\quad - \left[\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \left(\frac{x^2}{2} \right) + \left(y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \cdot x \right] \\ f(x_2) &= \frac{y_2(x_2 - x_3)}{\log y_3 - \log y_2} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot (x_2^2 - x^2) + \left(y_1 - \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \cdot x_1 \right) \cdot (x_2 - x) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Como resultado de la integración realizada se obtiene el comportamiento mostrado en la Figura 8, que corresponde a la integración de la derivada de la inductancia mutua con respecto a la posición solo para valores positivos.

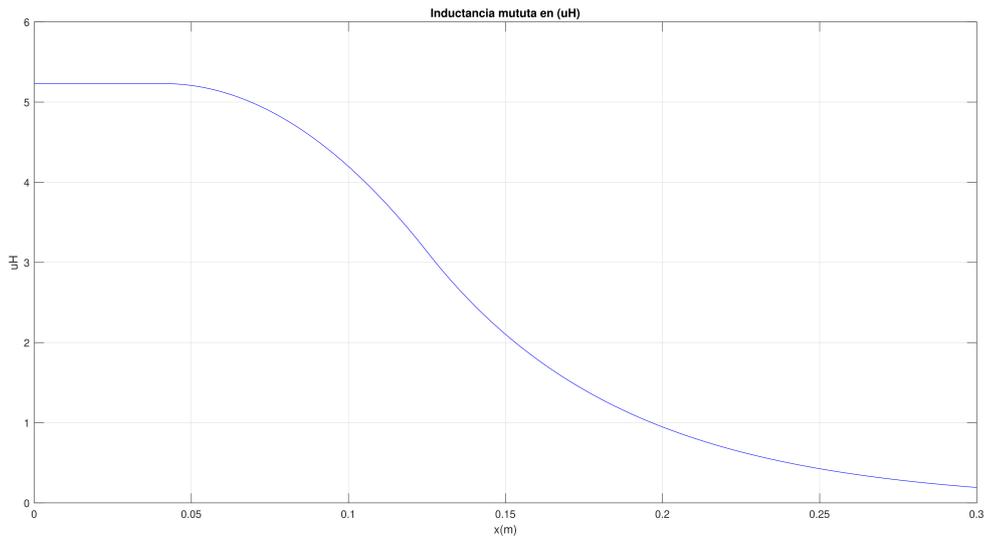


Figura 2.6: Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos)

Dado que la reconstrucción original considera valores positivos y negativos, se empleó la función `sign` para extender el comportamiento a valores negativos, logrando así una aproximación gráfica completa.

Posteriormente, a partir de la representación obtenida en MATLAB de la derivada de la inductancia mutua con respecto a la posición y la inductancia mutua se procede a modelar la rutina correspondiente para cada parámetro en ATPDraw.

La reconstrucción gráfica de la inductancia mutua en MATLAB y la obtención de la inductancia mutua se realizó definiendo límites de graficación mediante la estructura condicional `if`. Se establecieron tres segmentos principales tanto para dM/dx como para M :

- **Primer tramo:** Inicia en cero.
- **Segundo tramo:** Sigue una relación lineal.
- **Tercer tramo:** Exhibe un comportamiento exponencial.

Tras verificar la correcta representación gráfica en MATLAB, se adaptó la rutina en el lenguaje de programación de MODELS dentro de ATPDraw. En este proceso, se definieron las entradas y salidas relevantes, se asignaron valores iniciales y se implementaron los parámetros necesarios para la representación gráfica. Se establecieron condiciones para delimitar los puntos de transición entre los distintos segmentos de la gráfica, fijando el último tramo en cero y utilizando una entrada genérica en este caso una fuente de corriente alterna como se muestra en Fig. 2.7 para validar la reconstrucción tanto para valores positivos como negativos, la cual será sustituida posteriormente por el cálculo real de la posición del proyectil a partir de un modelo externo de la dinámica. Además, se realizó el cálculo de la inductancia mutua entre la bobina y la armadura del cañón mediante la integración de su derivada con respecto a la posición,

lo que permitió obtener su comportamiento a lo largo del recorrido del proyectil. El código desarrollado integra ambos cálculos, posibilitando la generación simultánea de las dos gráficas necesarias para analizar el sistema. En la Tabla 2.1 se muestran todos los parámetros utilizados para la programación de esta rutina así como la inicialización de variables mostrada en la Tabla 3.2 que permitirán calcular el comportamiento de la inductancia mutua a partir de la posición.

Tabla 2.1: Parámetros del modelo en ATPDraw

Sección	Parámetros	Valor
DATA	x_1	0,043
	y_1	$1,13 \times 10^{-6}$
	x_2	0,125
	y_2	5×10^{-5}
	x_3	0,244
	y_3	$7,487 \times 10^{-6}$

Tabla 2.2: Inicialización de variables para el cálculo

Variables dm_m1		
Sección	Parámetros	Valor
INIT	$dM1$	0
	$M1$	0
	$A1$	y_2
	$B1$	$\frac{\ln(y_3) - \ln(y_2)}{x_3 - x_2}$
	$mm1$	$\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$

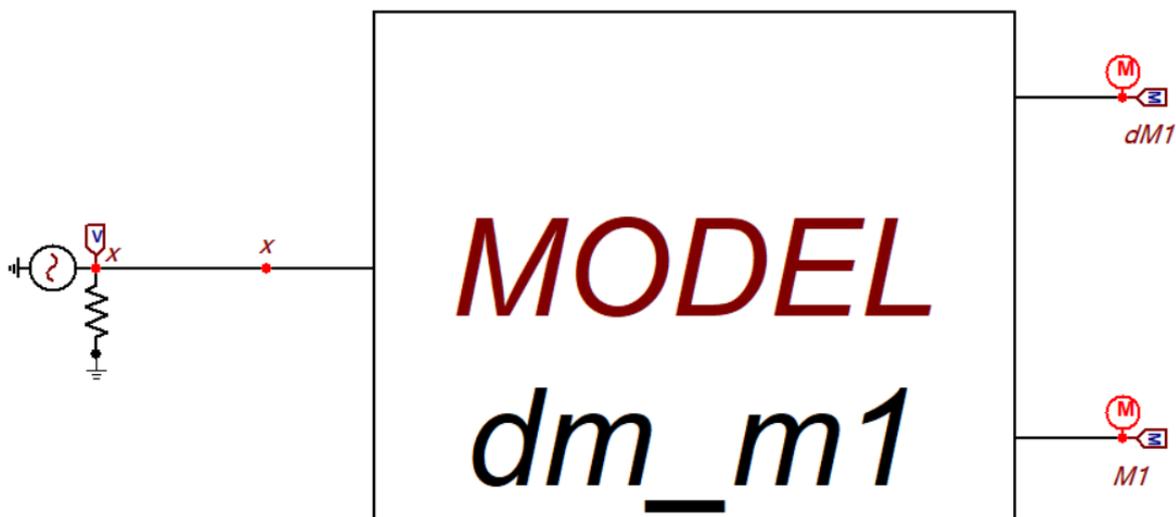


Figura 2.7: Modelo utilizado para representar $\frac{dM}{dx}$ y M a partir de una entrada genérica.

Todas las variables y parámetros fueron incorporados en ATPDraw mediante un programa en MODELS que se muestra en el Código 2.1, donde se determina el comportamiento de la derivada de la inductancia con respecto a la posición dM/dx y, a su vez, se realiza su integración para obtener la inductancia mutua $M(x)$.

```

MODEL dM_M1
DATA
x1,y1,x2 ,y2 ,x3 ,y3
INPUT x,
OUTPUT dM1, M1
VAR dM1, M1, A1, B1, mm1

INIT --Inicializaci0n de variables
dM1:=0
M1:=0
A1:=y2
B1:=(ln(y3)-ln(y2))/(x3-x2) --Constantes de la ecuacion exponencial
mm1:=(y2-y1)/(x2-x1)

ENDINIT

EXEC
--rutina para reconstruir dm/dx y M
if (abs(x)<x1) then
dM1:=0
M1:= y2*(x2-x3)/(ln(y3)-ln(y2))
M1:=M1+(0.5*mm1*((x2*x2)-(x1*x1))+((y1-mm1*x1)*(x2-x1)))
elseif (abs(x)>=x1) and (abs(x)<x2) then
dM1:= mm1*((abs(x))-x1)+y1
M1:= y2*(x2-x3)/(ln(y3)-ln(y2))
M1:= M1+0.5*mm1*(x2*2-abs(x)2)+(y1-mm1*x1)(x2-abs(x))
elseif (abs(x)>=x2) then
dM1:=A1*exp(B1*(abs(x)-x2))
M1:=y2*(x2-x3)exp(B1(abs(x)-x2))/(ln(y3)-ln(y2))
endif

dM1:=-sign(x)*dM1
M1:=M1*55

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Código 2.1: Reconstrucción de la gráfica de dM y M .

Una vez ingresados todos los parámetros y variables mostrados en la Tabla 2.1 y Tabla 3.2 Se obtiene la Fig. 2.8, en la que se muestra la aproximación del comportamiento de la derivada de la inductancia mutua con respecto de la posición.

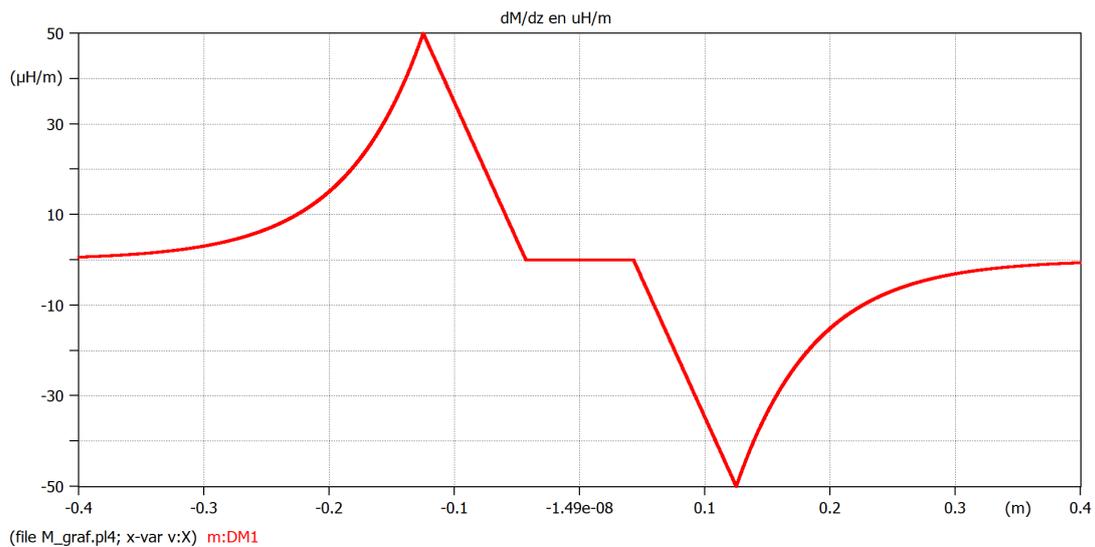


Figura 2.8: Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).

Esta rutina fue programada también en MATLAB con el objetivo de corroborar que el resultado del comportamiento es igual. Como se puede observar la Fig. 2.9 es idéntica a la Fig. 2.8 lo que indica que su modelamiento ha sido correcto.

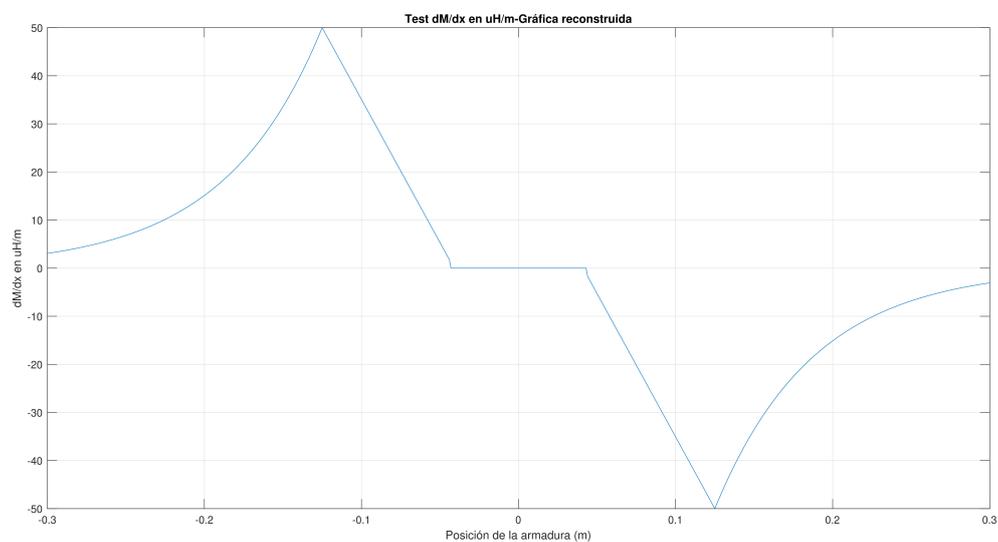


Figura 2.9: Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).

De la misma forma de esta rutina se obtiene la Fig. 2.10 de la inductancia mutua que se consigue con la integración de dM .

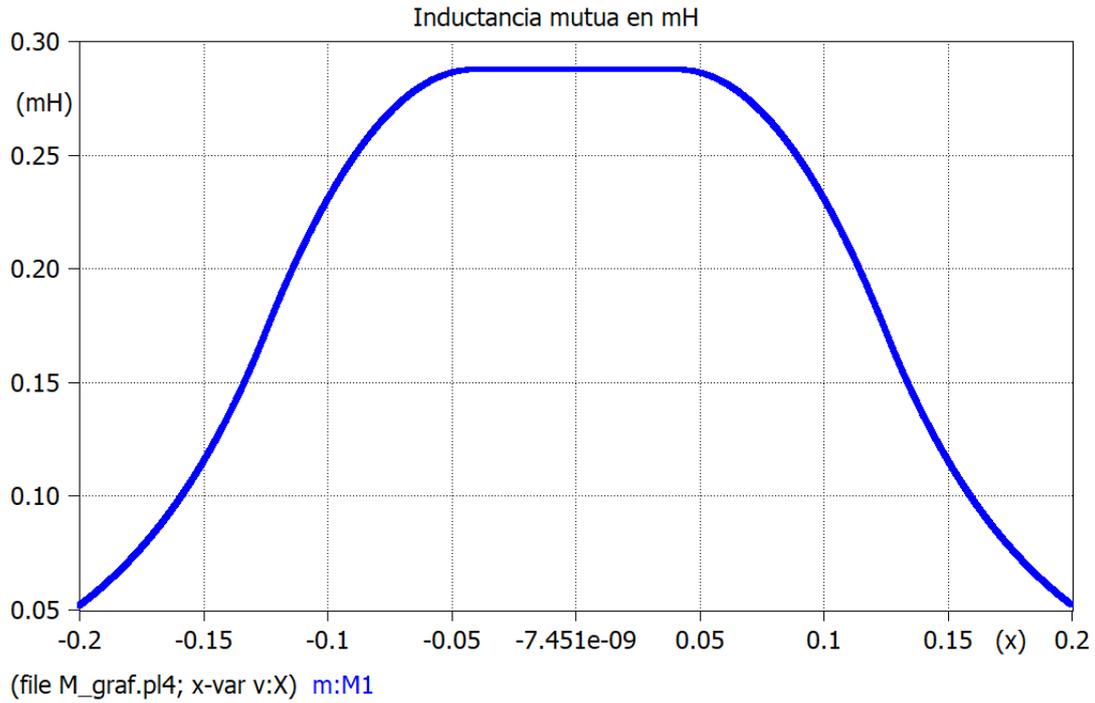


Figura 2.10: Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).

En la rutina de Matlab, también se integró la inductancia mutua, obteniendo así la Fig. 2.11 la cual es idéntica a la gráfica generada en ATPDraw. Esto confirma que tanto la modelación como la integración fueron correctas.

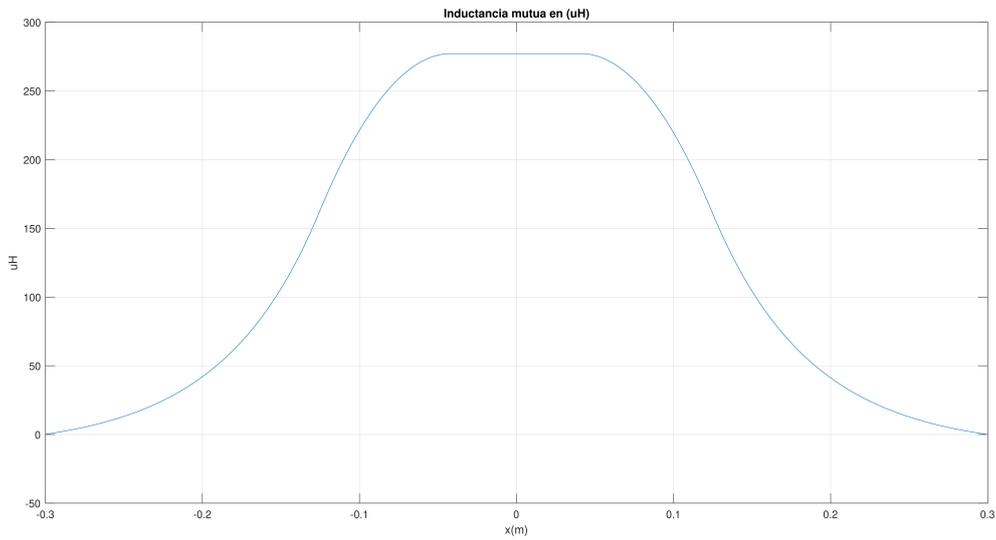


Figura 2.11: Gráfica de la inductancia mutua a partir de la integración de dm/dx (valores positivos).

Para la modelación del comportamiento dinámico del cañón electromagnético se siguen ciertas direc-

trices. En primer lugar, se definen las entradas necesarias para el bloque de dinámica, como la corriente de la bobina, la fuerza desarrollada en cada bobina y la inductancia mutua. También se definen los datos de la masa de la armadura, el coeficiente de fricción, la posición inicial de disparo, la inductancia de la armadura y la resistencia de la armadura, esto se muestra en la Tabla 2.3. Posteriormente, se especifican las salidas del bloque de dinámica, que incluyen la posición, la velocidad de la armadura, la corriente de la armadura y el enlace, estos datos son mostrados en la Tabla 2.4. Se asignan valores iniciales a diversas variables como la aceleración, la velocidad, la posición, y la corriente, lo que permite iniciar la integración de las variables. El siguiente paso consiste en la integración de estas variables, donde se utiliza un History en ATPDraw para que las integrales se mantengan a lo largo del tiempo de simulación. Primero se determina la aceleración, que depende de la fuerza, el coeficiente de fricción, la masa y la gravedad. Luego, se procede a integrar la aceleración para determinar la velocidad y, posteriormente, se integra la velocidad para encontrar la posición. Durante esta integración, se establece un valor predeterminado de la posición inicial.

Tabla 2.3: Parámetros para la simulación dinámica del sistema

Sección	Parámetros	Valor
DATA	$mass$	1,46 kg
	C_{fri}	0,35
	x_{ini}	0,03
	L_a	7×10^{-8}
	R_a	$1,1667 \times 10^{-5}$

Tabla 2.4: Inicialización de variables para el cálculo dinámica

Variables dm_m1		
Sección	Parámetros	Valor
INIT	a	0
	u	0
	x	x_{ini}
	$p\lambda$	0
	λ	0
	i_a	0

Todos los datos mostrados en la Tabla 2.3 y la Tabla 2.4 serán utilizados en el Código 2.2 referente al comportamiento dinámico del cañón electromagnético:

```

MODEL Dinamica
DATA mass, Cfri, xini, La, Ra    --valores de simulacion
INPUT ic1,Fe,M1
OUTPUT x, u, ia, Lambda
VAR u, x, a, ia, Lambda, pLambda
INIT    --inicializacion de variables
  a:=0
  u:=0
  x:=xini
  pLambda:=0
  Lambda:=0
  ia:=0
ENDINIT

HISTORY --creacion de historial para definir variables iniciales de integracion
a {dflt:0}
integral(a) {dflt:0}

```

```

u {dflt:0}
integral(u) {dflt:xini}
x {dflt:0}
pLambda {dflt:0}
integral(pLambda) {dflt:0}

EXEC --calculo de velocidad aceleracion y posicion
a:=(Fe-Cfri*mass*9.81)/mass
u:=integral(a)
x:=integral(u)
pLambda:=Ra*(-Lambda+M*ic)/La --calculo de la derivada del enlace
Lambda:=integral(pLambda) --calculo del enlace
ia:=(Lambda-M1*ic1)/La --corriente de armadura
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Código 2.2: Programación de la dinámica del cañón electromagnético.

CAPÍTULO 3

MODELACIÓN DE LA PRIMERA ETAPA

3.0.0.1. Modelo de la primera etapa

Para la resolución de la primera etapa, es fundamental lograr la unificación del modelo dinámico con el modelo que describe el comportamiento de las inductancias mutuas y los parámetros de interés ($dM - M$). Esto se integra con el circuito equivalente del cañón electromagnético basado en el modelo VBR, a partir del cual se medirá la corriente en la bobina, la cual servirá como dato de entrada para el bloque de dinámica.

Cabe destacar que los parámetros del circuito, como la resistencia equivalente R_{eq} , la inductancia equivalente L_{eq} y la fuente de excitación equivalente E_{eq} , se determinan en función de la posición obtenida en el modelo dinámico. Es decir, ya no se utilizará una entrada genérica como se hizo para lograr la reconstrucción de la inductancia mutua sino que ahora la entrada será el cálculo real de la posición. Posteriormente, estos valores serán utilizados en el modelo " $dM - M$ " para calcular los parámetros mencionados y transferirlos al circuito equivalente mediante la opción TACS en lenguaje Fortran. Este procedimiento garantiza la actualización y transferencia continua de información a lo largo de la simulación, asegurando la coherencia entre los modelos involucrados.

En la Fig. [3.1](#) se presenta el diagrama del modelo realizado en ATPDraw para la primera etapa, donde se muestra el circuito eléctrico del modelo VBR, el módulo MODEL que determina la dinámica del sistema a partir del módulo que calcula las inductancias, resistencias y fuerzas electromotrices de este circuito.

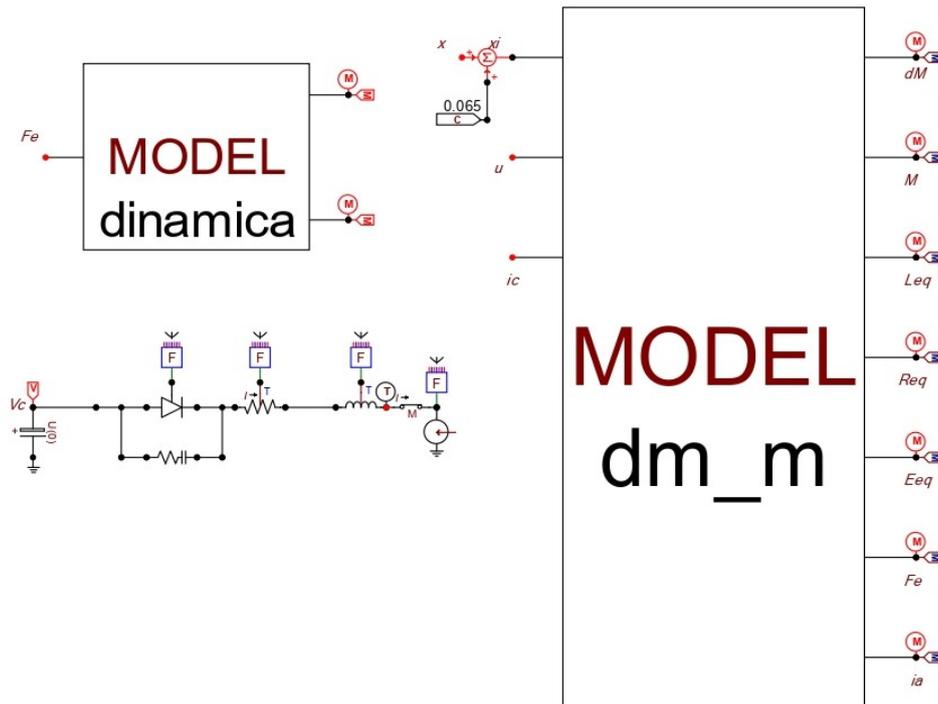


Figura 3.1: Circuito y modelos usados para la solución de la primera etapa

Para la modelación, se establecieron las pautas de programación que implican la incorporación de nuevas entradas, datos y salidas con el fin de unificar el modelo. Se definieron como entradas parámetros como la posición, la velocidad, la corriente de la bobina, la corriente de la armadura y el enlace. Además, se incluyeron datos relacionados con las constantes de inductancia de la bobina, la resistencia de la bobina y la resistencia de la armadura. Las salidas se determinaron como la derivada de la inductancia mutua, la inductancia mutua, la inductancia y la resistencia equivalentes, así como la fuerza electromotriz y la fuerza eléctrica. Los parámetros utilizados para la simulación de la primera etapa se muestran en la Tabla 3.1, y las demás variables fueron inicializadas con valores predefinidos para garantizar el correcto funcionamiento de las simulaciones, como se muestra en la Tabla 3.2

A continuación, las variables y ecuaciones necesarias fueron integradas para permitir que todas las entradas y salidas interactuaran en función de la posición inicial, reproduciendo así el comportamiento teórico del sistema durante la simulación.

El modelo descrito en la Sección 3.0.0.1, representa el funcionamiento completo de la primera etapa del cañón electromagnético. En él, todas sus variables, entradas y salidas interactúan simultáneamente en función de la posición inicial para reproducir, dentro de la simulación, el comportamiento previsto en la base teórica del proyecto técnico.

El capacitor suministra un voltaje V_c , y mediante el tiristor y la red Snubber se efectúa el disparo, lo que genera un flujo de corriente denominado corriente de la bobina. Debido a que es la primera etapa, esta corriente se representa como i_{c1} . Esta corriente es una de las entradas del bloque de dinámico, junto con

la fuerza eléctrica calculada en la etapa Fe y la inductancia mutua M . Con estos parámetros y variables, el bloque de dinámica determina la posición de la armadura a lo largo de la simulación. También calcula tanto la velocidad instantánea de la armadura como su enlace de flujo.

En el bloque $dM - M$ se recopilan todos los datos y ecuaciones de la inductancia mutua, los cuales permiten describir el comportamiento de la bobina del cañón electromagnético a medida que la armadura se desplaza a través de él. Es fundamental que esta inductancia mutua se realimente como entrada al bloque de dinámica para calcular el enlace de flujo. Además, la fuerza eléctrica debe ser realimentada como entrada para calcular la aceleración y, a través de integraciones, determinar la posición de avance de la armadura. Así mismo, se calculan las resistencia, inductancia y fuerza electromotriz equivalentes derivadas del modelo VBR.

Tabla 3.1: Parámetros para la simulación de la primera etapa

Sección	Parámetros	Valor
DATA	x_1	0,043
	y_1	$1,13 \times 10^{-6}$
	x_2	0,125
	y_2	5×10^{-5}
	x_3	0,244
	y_3	$7,487 \times 10^{-6}$
	L_c	925×10^{-6}
	R_c	0,0334
	R_a	$1,667 \times 10^{-5}$
	L_a	7×10^{-8}
	x_{ini}	0,03

Tabla 3.2: Inicialización de variables para la simulación de la primera etapa

Inicialización de Variables		
Sección	Parámetros	Valor
INIT	dM	0
	M	0
	$A1$	$y2$
	$B1$	$\frac{\log(y3) - \log(y2)}{x3 - x2}$
	$m1$	$\frac{y2 - y1}{x2 - x1}$
	R_{eq}	R_c
	L_{eq}	L_c
	i_a	0
	λ	0
	$p\lambda$	0

Este modelo se encuentra transcrito en el Código [3.1](#) realizado en lenguaje MODELS de ATPDraw.

```

MODEL dM_M
DATA
x1,y1,x2 ,y2 ,x3 ,y3 ,La ,Lc ,Rc ,Ra
INPUT xi, u, ic
OUTPUT dM, M, Leq, Req, Eeq, Fe, ia
VAR dM, M, A1, B1, m1
VAR LEQ,REQ,Eeq, Lambda, pLambda, Fe, ia

HISTORY --historial

pLambda {dflt:0}
integral(pLambda) {dflt:0} -- definicion de integrales

INIT --inicializacion de variables
dM:=0
M:=0
A1:=y2
B1:=(ln(y3)-ln(y2))/(x3-x2)
m1:=(y2-y1)/(x2-x1)
Req:=Rc
Leq:=Lc
ia:=0
Lambda:=0
pLambda:=0
--x:=xini

ENDINIT

EXEC --rutina que calcula dm/dx y M
if (abs(xi)<x1) then
dM:=0
M:= y2*(x2-x3)/(ln(y3)-ln(y2))
M:=M+(0.5*m1*((x2*x2)-(x1*x1))+((y1-m1*x1)*(x2-x1)))
elseif (abs(xi)>=x1) and (abs(xi)<x2) then
dM:= m1*((abs(xi))-x1)+y1
M:= y2*(x2-x3)/(ln(y3)-ln(y2))
M:= M+0.5*m1*(x2**2-abs(xi)**2)+(y1-m1*x1)*(x2-abs(xi))
elseif (abs(xi)>=x2) then
dM:=A1*exp(B1*(abs(xi)-x2))
M:=y2*(x2-x3)*exp(B1*(abs(xi)-x2))/(ln(y3)-ln(y2))
endif

dM:=-sign(xi)*dM
M:=M

pLambda:=-Ra*Lambda/La+Ra*M*ic/La
Lambda:=integral(pLambda) --obtencion del enlace

ia:=(Lambda-M*ic)/Lac --corriente de armadura
Fe:=ia*ic*dM ---fuerza electrica
Req:=Rc+Ra*(M**2/La**2) --resistencia equivalente
Leq:=Lc-M**2/La --inductancia equivalente
Eeq:=(u*dM/La-M*Ra/La**2)*Lambda-2*u*M*dM*ic/La ----fuerza electromotriz equivalente

```

Código 3.1: Programación de la primera etapa

En la Fig. 3.2 se observa que la velocidad alcanzada por el proyectil en la primera etapa del cañón electromagnético muestra una evolución típica de aceleración inducida por un campo magnético pulsado. En los primeros 3 ms , la velocidad aumenta de manera casi exponencial, alcanzando su valor máximo alrededor de los 4 ms . Este comportamiento está directamente relacionado con la interacción entre la corriente que circula por la bobina y la armadura, el cual experimenta una fuerza electromagnética creciente mientras la corriente se mantiene elevada. Dado que la alimentación del sistema proviene de la descarga rápida de un capacitor a través de un tiristor de control, la corriente en la bobina disminuye después de alcanzar su pico, lo que explica la reducción en la tasa de aceleración del proyectil. A medida que la corriente decae, el campo magnético pierde intensidad, limitando la capacidad de seguir acelerando la armadura.

Después de los 4 ms , la velocidad se estabiliza, lo que indica que el proyectil ha abandonado la región de influencia del campo magnético generado por la bobina. La ligera disminución en la velocidad observada tras el pico sugiere la posible presencia de fuerzas resistivas o efectos de fricción.

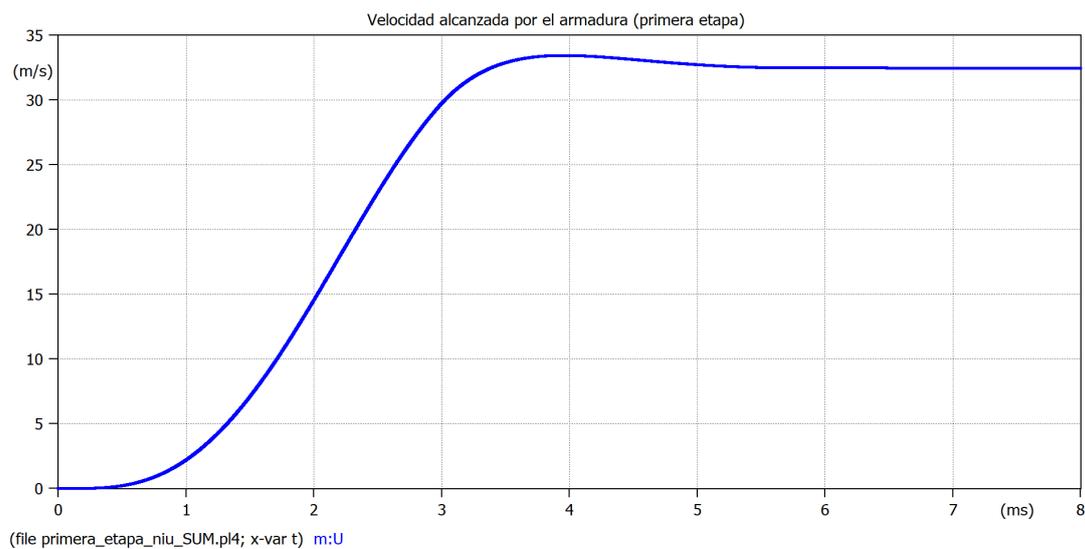


Figura 3.2: Gráfica de la velocidad punta alcanzada con la primera etapa.

En la Fig. 3.3 se muestra la gráfica resultante de la corriente de armadura. El comportamiento de la corriente es resultado de la interacción entre la inductancia de la bobina, la resistencia del circuito y la FEM inducida en la armadura. En la gráfica se empieza con corriente negativa lo que indica que hay autoinducción debido al súbito cambio en el campo magnético. La inversión de la corriente de valores negativos a positivos está asociada con la transición de la etapa de atracción a la de aceleración. Por lo que, la estabilización indica que la corriente alcanza su valor máximo positivo, alrededor de $57,35\text{ kA}$, y comienza a disminuir gradualmente. Esto se debe a que la armadura se aleja de la bobina y la inductancia mutua disminuye, lo que reduce la capacidad del sistema para seguir transfiriendo energía eléctrica en

forma de corriente.

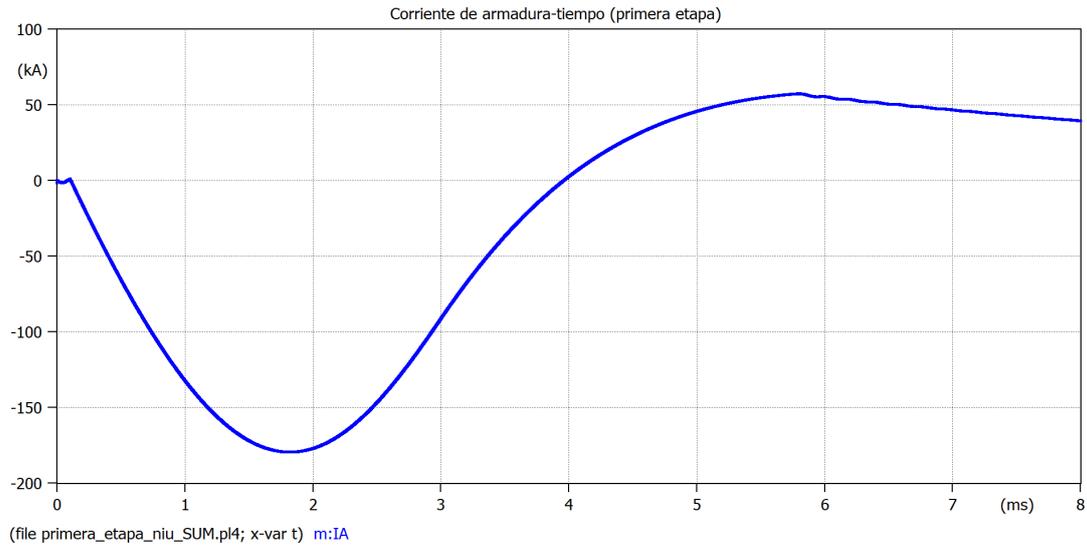


Figura 3.3: Gráfica de la corriente de armadura alcanzada con la primera etapa.

En la Fig. 3.4 se muestra el comportamiento del voltaje en el capacitor. El capacitor empieza estando cargado previamente antes de la activación del circuito. Conforme avanza la simulación, se observa una disminución casi lineal del voltaje del capacitor hasta llegar a valores negativos. Esto sugiere que, al activarse el circuito, el capacitor empieza a descargarse rápidamente a través de la bobina, suministrando una corriente. La caída de voltaje se debe a la conversión de la energía almacenada en el campo magnético de la bobina, lo que impulsa la armadura.

El voltaje sigue disminuyendo hasta volverse negativo. Esto ocurre porque la corriente en el circuito no se interrumpe instantáneamente cuando el capacitor llega a $0V$. En un circuito RLC resonante, la energía intercambiada entre el inductor y el capacitor genera una inversión de la polaridad del voltaje, indicando que el capacitor ahora está cargándose en sentido opuesto. La magnitud del voltaje negativo se reduce gradualmente hasta acercarse a un valor casi constante. Esto indica que la oscilación natural del circuito ha sido amortiguada, pro efecto de la resistencia del sistema y la disipación de energía en forma de calor y movimiento de la armadura.

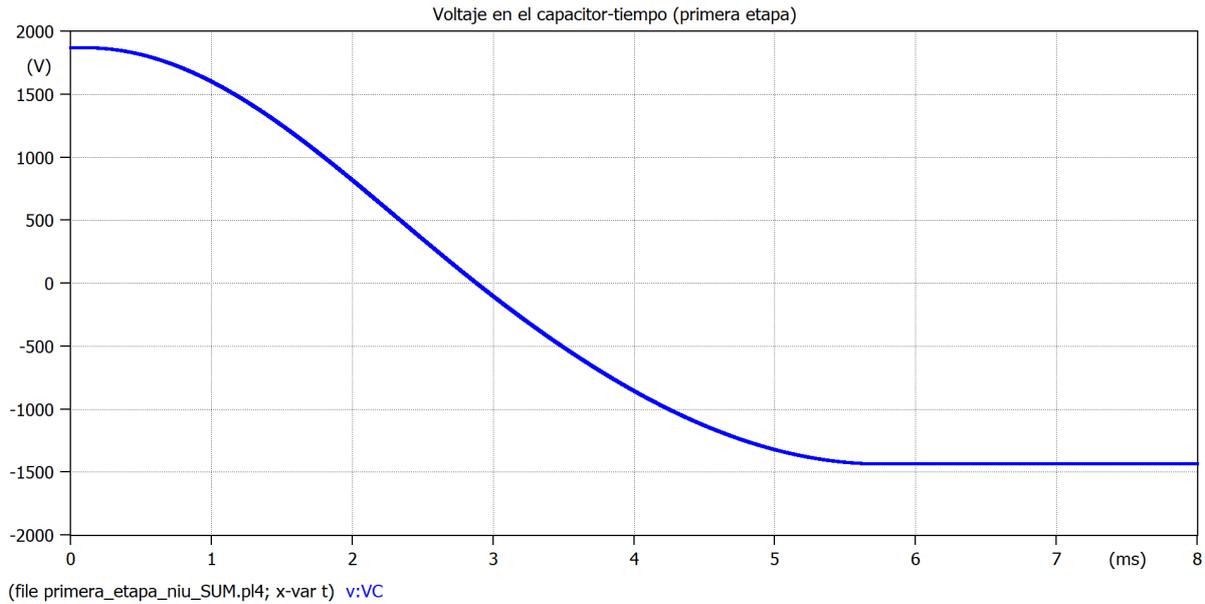


Figura 3.4: Gráfica de el voltaje en el capacitor en la primera etapa .

En la Fig. 3.5 se muestra que la corriente en la bobina comienza desde cero y aumenta rápidamente debido a la descarga del capacitor, cuya energía se transfiere al inductor, generando un campo magnético que impulsa la armadura. Durante esta fase, la inductancia limita la tasa de crecimiento de la corriente.

Al alcanzar su máximo, la corriente comienza a disminuir a medida que el capacitor se vacía y la armadura, al moverse, induce una *FEM* opuesta que restringe el flujo de corriente. Conforme la energía almacenada en el sistema se disipa, la corriente sigue decreciendo y presenta pequeñas oscilaciones características de un circuito *RLC* subamortiguado, hasta finalmente estabilizarse debido a la resistencia y pérdidas en el sistema.

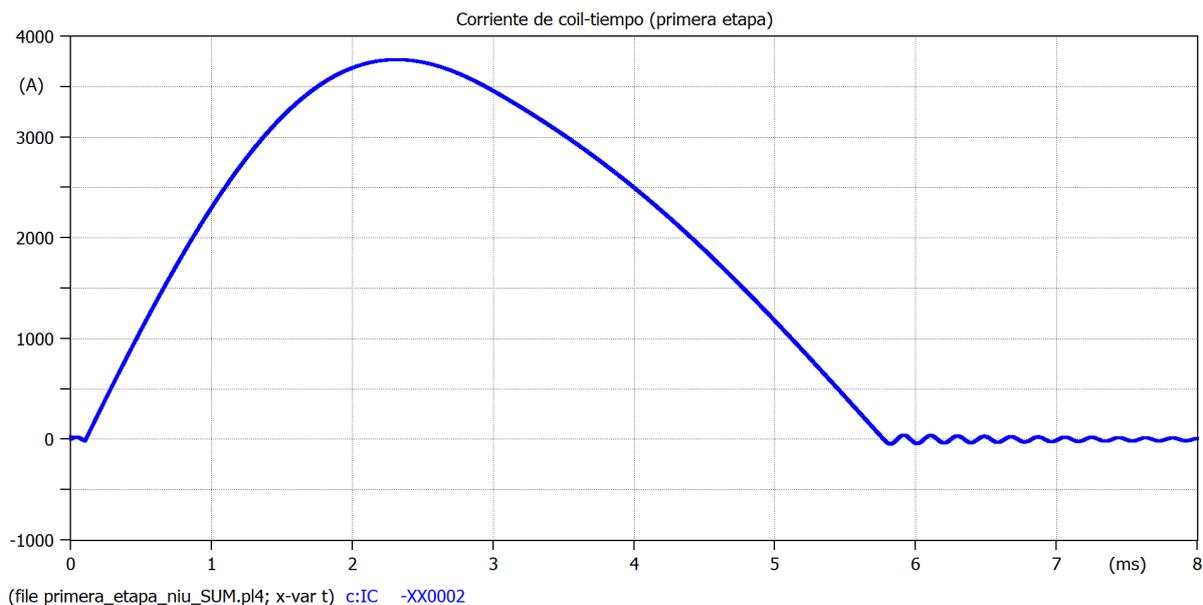


Figura 3.5: Gráfica de la corriente de bobina en la primera etapa.

En la Fig. 3.6 se muestra la fuerza eléctrica desarrollada en la primera etapa, inicialmente, la fuerza crece rápidamente hasta alcanzar un máximo de $24,64 \text{ kN}$ en aproximadamente 2 ms , debido a la descarga brusca del capacitor a través del tiristor, generando un intenso campo magnético que acelera la armadura. Posteriormente, la fuerza disminuye abruptamente, cruzando a valores negativos en torno a 4 ms , lo que sugiere la influencia de efectos de inducción o una inversión parcial del campo magnético. Por consiguiente, la fuerza se estabiliza cerca de 0 N después de 6 ms , indicando que la armadura ha salido de la bobina y que la corriente en la bobina se ha disipado. La presencia de la red Snubber ayuda a mitigar sobretensiones y mejorar la estabilidad del sistema.

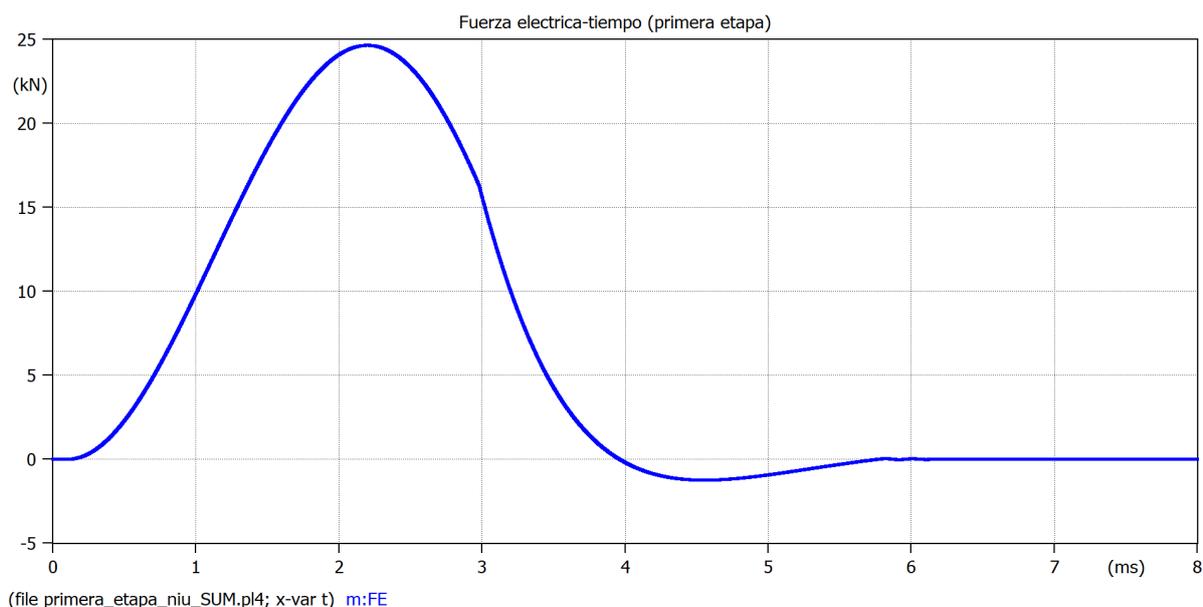


Figura 3.6: Gráfica de fuerza eléctrica en la primera etapa.

CAPÍTULO 4

MODELACIÓN DE LAS MÚLTIPLES ETAPAS

4.0.0.1. Generación de múltiples etapas

Para la generación de múltiples etapas es necesario replicar el modelo explicado en la sección [3.0.0.1](#) correspondiente a la solución de la primera etapa. Considerando que en la modelación de las múltiples etapas se repiten varias variables importantes que deben ser retroalimentadas como entrada hacia el bloque de dinámica, tales como la corriente de la bobina, la inductancia mutua de cada etapa, y la fuerza eléctrica como sumatoria de fuerzas de cada etapa, esto se consigue con un módulo TACS-Fortran que permite sumarlas e ingresarlas como una sola entrada al bloque antes indicado. Es por ello, que cada una debe ser expresada por un subíndice numérico que corresponde al número de etapa a la que pertenece, de este modo, estas variables pueden ser puestas como entrada en el bloque de dinámica y pueden ser incluidas sin problema en las ecuaciones en las que se encuentran presentes en el programa.

Para aumentar significativamente la velocidad en cada etapa, es fundamental calcular las posiciones de activación de los tiristores en cada circuito. El primer tiristor se activa por tiempo, considerando que la armadura se encuentra en la posición adecuada para el disparo. Las subsiguientes etapas realizan el disparo cuando la parte trasera de la armadura se encuentra aproximadamente en la mitad de la bobina de la etapa correspondiente, para incrementar el desempeño del sistema como se ilustra en la Fig. [4.1](#)

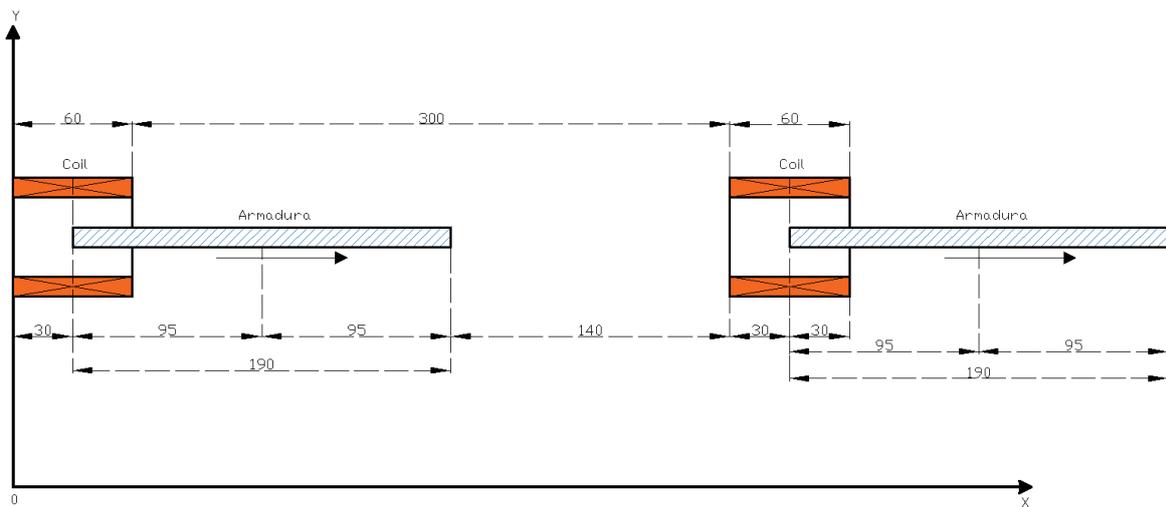


Figura 4.1: Determinación de las posiciones de las bobinas y la armadura al momento del disparo.

A continuación se muestran las ecuaciones deducidas a partir de la Fig. 4.1 que corresponde a las posiciones de cada bobina en el cañón electromagnético.

$$\begin{aligned}
 x + 95 - 390 &= x - 295 \text{ mm} \\
 x + 95 - 750 &= x - 655 \text{ mm} \\
 x + 95 - 1110 &= x - 1015 \text{ mm} \\
 x + 95 - 1470 &= x - 1375 \text{ mm} \\
 x + 95 - 1830 &= x - 1925 \text{ mm}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Estos valores son referenciales para definir la posición de las bobinas. Al ser referenciales, estos valores pueden ajustarse hasta obtener la mayor velocidad posible. Como resultado de aplicar estos criterios, se obtiene la Fig. 4.2, en la que se ilustra el cañón electromagnético de cinco etapas en ATPDraw.

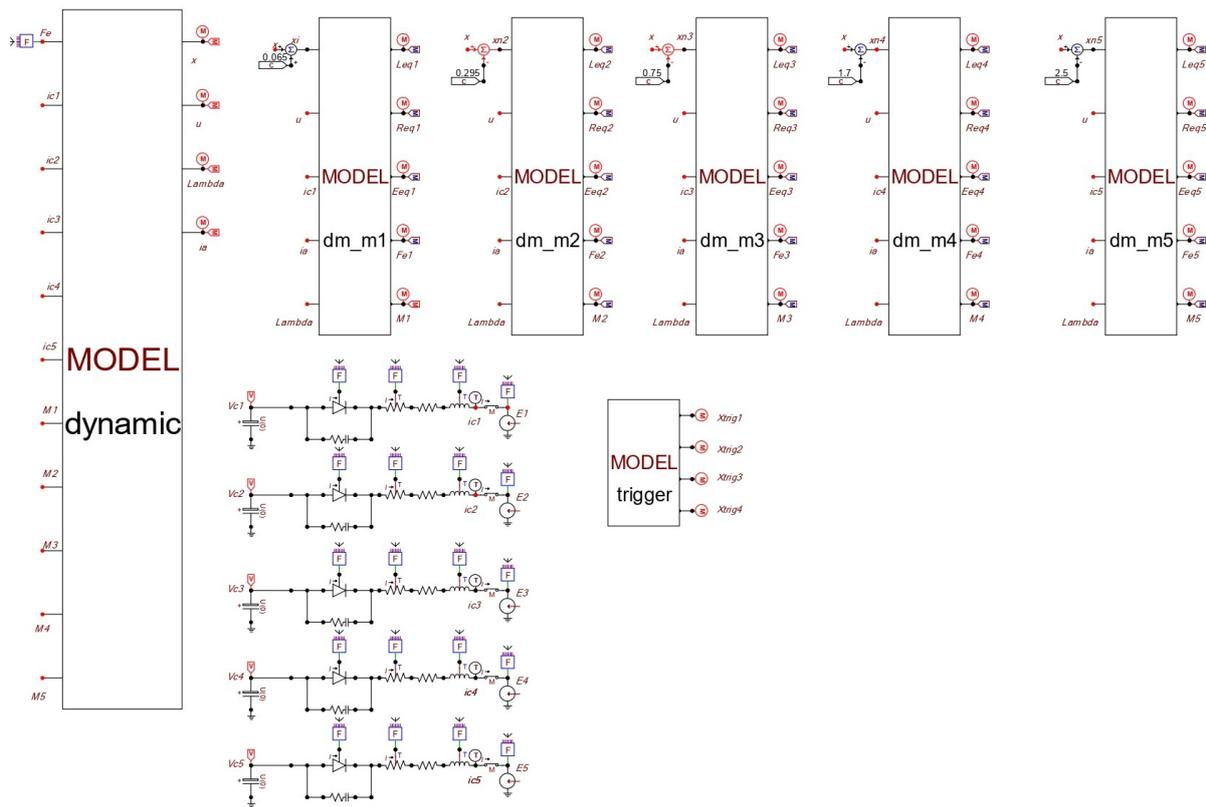


Figura 4.2: Cañón Electromagnético de cinco etapas

El modelo de la primera etapa está transcrito en el Código [4.1](#) realizado en el lenguaje MODELS de ATPDraw. Se presenta la primera etapa debido a que las demás etapas siguen la misma rutina, con la diferencia de que las variables de corriente de la bobina, inductancia mutua y fuerza eléctrica tienen un subíndice que corresponde a la etapa a la que pertenecen.

```

MODEL dm_M1
DATA
x1,y1,x2 ,y2 ,x3 ,y3 ,La ,Lc ,Rc ,Ra, xini
INPUT xi, u, ic1, ia, Lambda
OUTPUT Leq1, Req1, Eeq1, Fe1, M1
VAR dM, M, A1, B1, mm1, M1
VAR Leq1,Req1,Eeq1,Fe1
--variables con subíndice 1 que indica la etapa a la que pertenece

INIT --inicializacion de variables
dM:=0
M:=0
A1:=y2
B1:=(ln(y3)-ln(y2))/(x3-x2)
mm1:=(y2-y1)/(x2-x1)
Req1:=Rc
Leq1:=Lc

ENDINIT

```

```

EXEC --rutina que calcula dm/dx y M

if (abs(xi)<x1) then
  dM:=0
  M:= y2*(x2-x3)/(ln(y3)-ln(y2))
  M:=M+(0.5*mm1*((x2*x2)-(x1*x1))+((y1-mm1*x1)*(x2-x1)))
elseif (abs(xi)>=x1) and (abs(xi)<x2) then
  dM:= mm1*((abs(xi))-x1)+y1
  M:= y2*(x2-x3)/(ln(y3)-ln(y2))
  M:= M+0.5*mm1*(x2**2-abs(xi)**2)+(y1-mm1*x1)*(x2-abs(xi))
elseif (abs(xi)>=x2) then
  dM:=A1*exp(B1*(abs(xi)-x2))
  M:=y2*(x2-x3)*exp(B1*(abs(xi)-x2))/(ln(y3)-ln(y2))
endif

dM:=-sign(xi)*dM
M:=M
M1:=M
--fuerza obtenida
Fe1:=ia*ic1*dM
--valores del circuito en primera etapa
Req1:=Rc+Ra*(M**2/La**2)
Leq1:=Lc-M**2/La
Eq1:=(u*dM/La-M*Ra/La**2)*Lambda-2*u*M*dM*ic1/La

ENDEXEC
ENDMODEL

```

Código 4.1: Rutina para Cálculo de derivadas de las inductancia

Para la sincronización del disparo, es fundamental considerar que el disparo del cañón electromagnético se inicia cuando el extremo trasero de la armadura alcanza el centro de la bobina. En la primera etapa, dado que la armadura parte desde el reposo, se posiciona a 30 mm , que corresponde a la mitad de la bobina de 60 mm . En este caso, el tiristor se activa por tiempo.

Sin embargo, en las etapas siguientes, la sincronización no puede basarse únicamente en el tiempo, ya que el aumento progresivo de la velocidad haría que el punto de disparo sea impreciso. Por ello, a partir de la segunda etapa, el disparo se establece en función de la posición. Como se mostró en la deducción de la ubicación de las bobinas, estas referencias permiten programar los tiristores para activarse ligeramente antes del punto teórico de referencia. Esto compensa el incremento de velocidad y asegura que la armadura cruce el punto de disparo en el momento adecuado, minimizando el error en la sincronización.

Para lograr esto en ATPDraw, se crea un bloque MODELS denominado "Trigger". Este bloque permite definir la posición en la que se desea activar el disparo. La posición se ingresa como una variable de entrada al MODELS, donde se establece su equivalencia con una variable de salida. Estas salidas se programarán en los tiristores de cada etapa según corresponda. A continuación, se muestra el Código [4.2](#) que implementa esta funcionalidad:

```

MODEL Trigger --modelo que ajusta los disparos en cada tiristor
DATA XtrigA, XtrigB, XtrigC, XtrigD

```

```

OUTPUT Xtrig1, Xtrig2, Xtrig3, Xtrig4
VAR Xtrig1, Xtrig2, Xtrig3, Xtrig4 --
INIT --inicializacion de variables
  Xtrig1:=0
  Xtrig2:=0
  Xtrig3:=0
  Xtrig4:=0
ENDINIT
EXEC
  Xtrig1:=XtrigA
  Xtrig2:=XtrigB
  Xtrig3:=XtrigC
  Xtrig4:=XtrigD
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Código 4.2: Rutina de programación del Trigger

Como resultado de la programación anterior en la Fig. 4.3 se muestra el incremento de velocidad producido por cada una de las etapas del cañón electromagnético en forma de escalones, obteniendo una velocidad final de disparo de $79,64 \text{ m/s}$ en un tiempo aproximado de $5,5 \text{ ms}$. En comparación con la primera etapa se observa que cuando se efectúa el switcheo de las siguientes etapas se produce un incremento de tendencia ascendente de velocidad, lo que en la gráfica se observan como escalones cuando la armadura ha pasado por cada bobina.

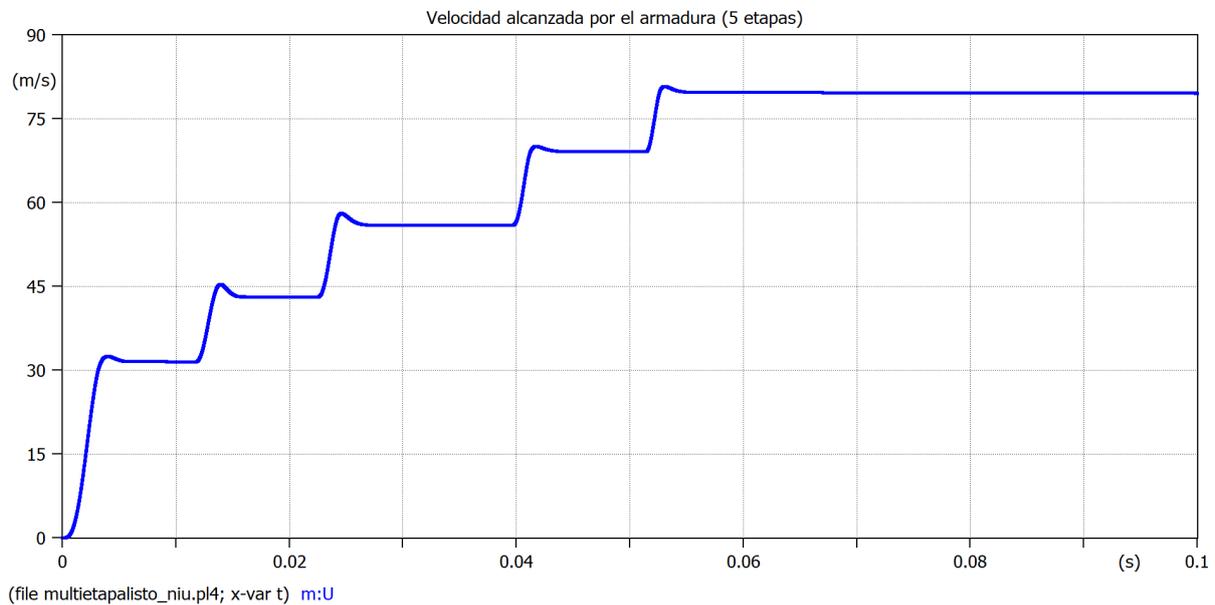


Figura 4.3: Velocidad obtenida de las cinco etapas.

En la Fig. 4.4 se muestra la corriente de armadura producida en cinco etapas en donde al igual que en el modelo de la primera etapa la corriente inicia con un valor negativo debido a la autoinducción por el cambio súbito del campo magnético y transiciona a valores positivos lo que indica la incidencia de la fuerza de aceleración sobre la armadura debido al campo repulsivo, esto se repite para cada una de las

etapas aprovechando así el semiciclo positivo obtenido cinco picos en la gráfica correspondientes a cada bobina.

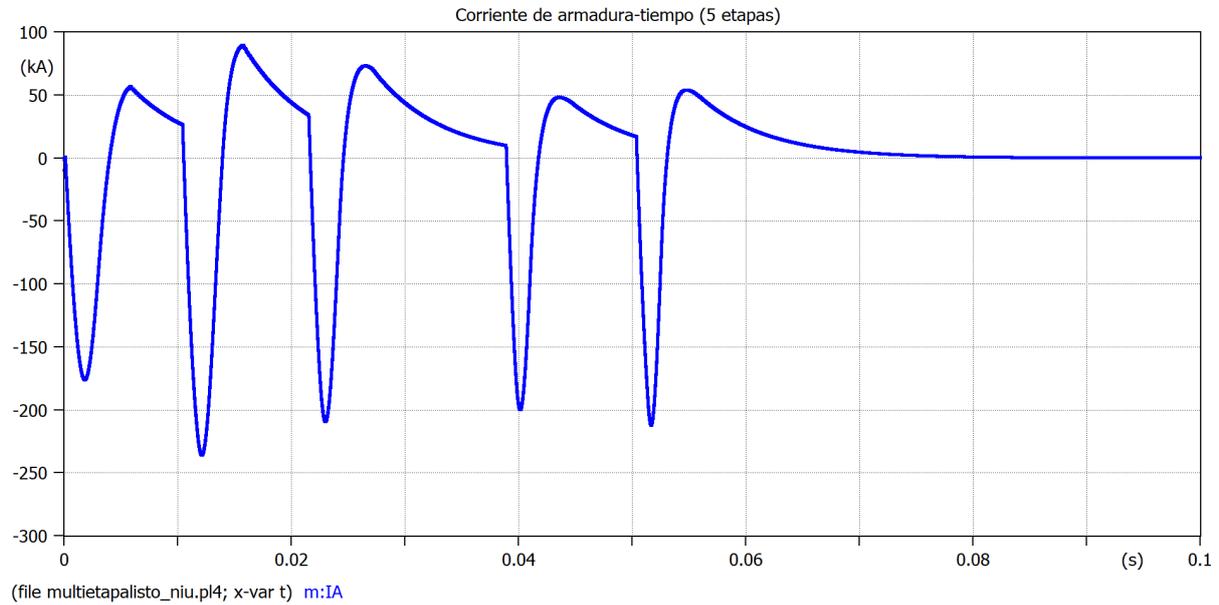


Figura 4.4: Corriente de armadura de las cinco etapas.

La Fig. 4.5 muestra la evolución temporal de la corriente en cada una de las cinco bobinas del cañón electromagnético durante el disparo. Se observa que la activación de las bobinas ocurre de manera secuencial, con picos de corriente cercanos a los 4 kA en cada etapa. Cada bobina se energiza brevemente, alcanzando su máximo en milisegundos y desactivándose rápidamente para evitar efectos adversos como la atracción inversa de la armadura. Este comportamiento indica un control preciso del sistema de conmutación, que haga que la aceleración de la armadura sea continua a lo largo del cañón.

Además, se observa un solapamiento parcial en la activación de las bobinas, lo que permite minimizar interrupciones en la fuerza eléctrica y mantener una aceleración constante. Tras la última etapa, no se registran más pulsos de corriente, lo que confirma que el sistema completa el disparo.

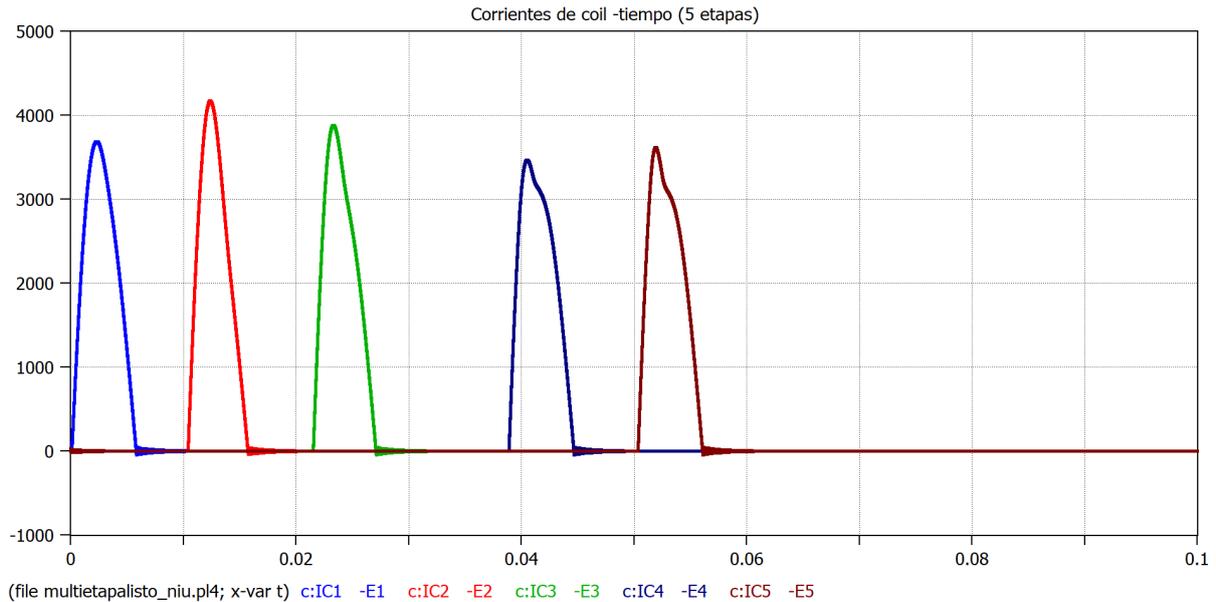


Figura 4.5: Corriente de la bobina en las cinco etapas

La Fig. 4.6 muestra la evolución del voltaje en los capacitores de cada una de las cinco etapas del cañón electromagnético durante el proceso de disparo. Se observa que, inicialmente, cada capacitor se encuentra cargado a un voltaje elevado y constante. En el instante en que se activa el tiristor correspondiente, la energía almacenada en el capacitor se transfiere rápidamente a la bobina, lo que provoca una caída abrupta del voltaje hasta valores negativos antes de estabilizarse.

El proceso se repite secuencialmente para cada etapa, asegurando la transferencia de energía de manera escalonada a medida que la armadura avanza dentro del cañón electromagnético. Se evidencia que las transiciones de voltaje están bien definidas y sin oscilaciones prolongadas, lo que indica que la red snubber implementada cumple su función de mitigar sobrevoltajes transitorios y proteger el dispositivo de conmutación.

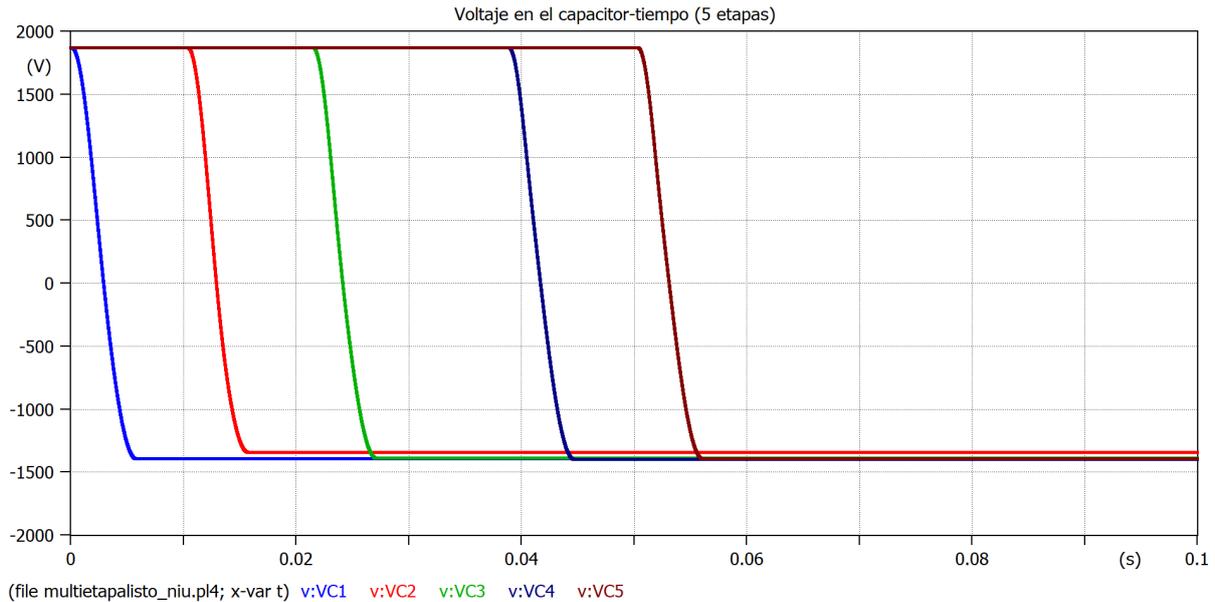


Figura 4.6: Voltaje del capacitor en las cinco etapas

La Fig. 4.7 representa la evolución temporal de la fuerza eléctrica generada en cada una de las cinco etapas del cañón electromagnético. Se observa que la fuerza presenta picos bien definidos y de corta duración, lo que indica una transferencia de energía concentrada en intervalos específicos de tiempo. La activación secuencial de las etapas sigue el mismo patrón que el comportamiento de la corriente en las bobinas Fig. 4.5, lo que confirma que la magnitud de la fuerza es directamente proporcional a la corriente inducida en cada bobina y a la interacción del campo magnético generado con la armadura.

El comportamiento transitorio de la fuerza obedece a la naturaleza pulsante de la corriente en cada bobina, la cual es suministrada por los capacitores Fig. 4.6. La descarga abrupta de los capacitores, controlada por los tiristores, genera un fuerte pulso de corriente en la bobina, lo que a su vez induce una fuerza electromagnética sobre la armadura.

Esta fuerza decrece rápidamente a medida que la corriente cae, evitando efectos de frenado. La sincronización precisa entre cada etapa asegura que la fuerza neta aplicada al proyectil sea progresiva y acumulativa. Este comportamiento es importante para garantizar que la armadura reciba la máxima energía posible en cada etapa sin interrupciones en su desplazamiento.

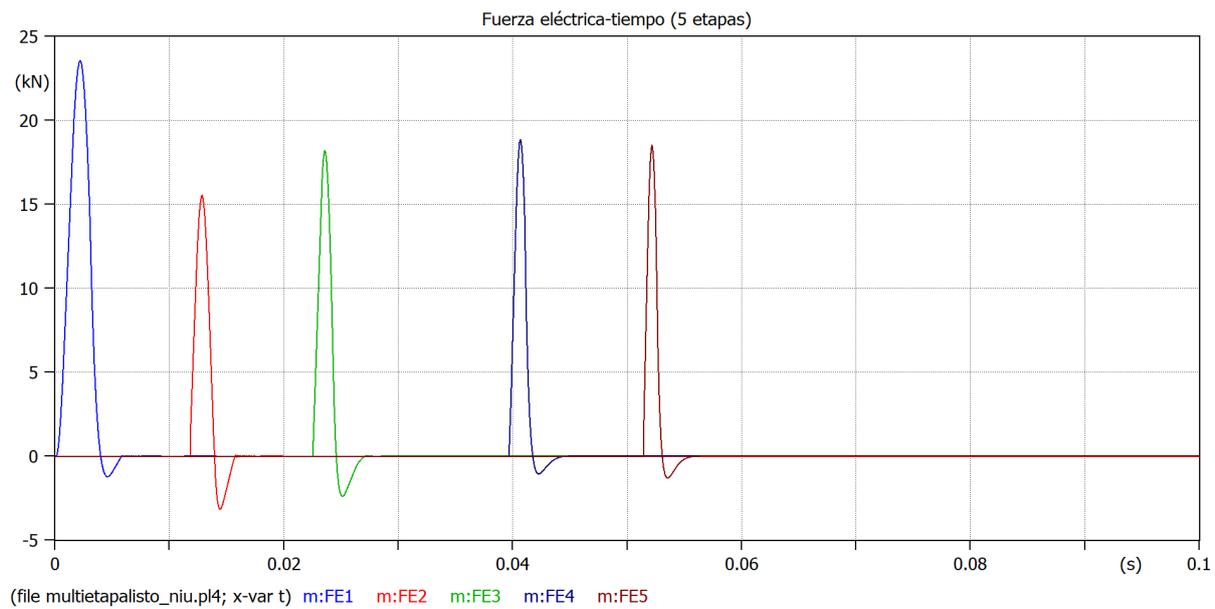


Figura 4.7: Fuerza eléctrica de las cinco etapas

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.0.1. Resultados de la primera etapa

En la Fig. 3.2 se muestra la gráfica de la velocidad vs el tiempo. Para la primera etapa la armadura desarrolla una velocidad máxima de $33,45 \text{ m/s}$ durante un tiempo de 2 ms , luego de ello, tiende a estabilizarse en una velocidad de $32,47 \text{ m/s}$. Es importante acotar que la activación de la primera etapa del cañón electromagnético con el tiristor se da por un tiempo de $0,1 \times 10^{-3} \text{ s}$ y que la posición de inicio debe ser cuando el extremo trasero de la armadura esté a la mitad de la primera bobina, por lo tanto, la posición inicial de disparo es a los 30 mm .

En la Fig. 3.3 se muestra el comportamiento de la corriente en la armadura durante la primera etapa. Inicialmente, la corriente presenta valores negativos debido a la autoinducción generada por el cambio repentino en el campo magnético. Tras esta fase transitoria, la corriente alcanza un valor máximo de $57,34 \text{ kA}$ y posteriormente comienza a disminuir gradualmente a medida que la armadura se aleja de la bobina, reduciendo el enlace magnético.

En la Fig. 3.5 se muestra el comportamiento de la corriente en la bobina durante la primera etapa. Al alcanzar su valor máximo de $3,769 \text{ kA}$, la corriente comienza a decrecer simultáneamente con la descarga del capacitor y la disminución del enlace debido al avance de la armadura. Es importante destacar que el enlace entre la bobina y la armadura alcanza su valor máximo cuando la armadura se encuentra en la mitad de la bobina, lo que se traduce en la máxima corriente inducida en la armadura.

Con la Fig. 3.6 se observa el comportamiento de la fuerza eléctrica generada en la primera etapa. Esta aumenta rápidamente debido a la descarga repentina del capacitor cuando el tiristor ejecuta el disparo, alcanzando un valor máximo de $24,64 \text{ kN}$. Posteriormente, la fuerza comienza a disminuir hasta estabilizarse en 0 N , lo que indica que la armadura ha atravesado completamente la bobina del cañón electromagnético.

Todos los resultados obtenidos se presentan en la siguiente Tabla 5.1

Tabla 5.1: Resultados obtenidos para la velocidad en la primera etapa

Variable	Resultado
Velocidad	32,47 m/s
i_c	3769,3 A
i_a	56,8 kA
F_e	24,64 kN

5.0.2. Resultados de las múltiples etapas

En la Fig. 4.3 se muestra la evolución de la velocidad de la armadura a medida que atraviesa cada una de las cinco etapas del cañón. El incremento de velocidad se observa en forma de escalones, alcanzando un valor máximo de $79,7 \text{ m/s}$. Este comportamiento es consecuencia directa de la sincronización del disparo de los tiristores, que permite una transferencia secuencial de energía desde los capacitores a las bobinas.

En la primera etapa, el disparo del tiristor se programa en función del tiempo, pero en las siguientes etapas se adopta un criterio basado en la posición de la armadura. Para ello, se implementa un bloque MODEL con un trigger que activa el tiristor en función de la ubicación de la armadura. Dado el aumento progresivo de velocidad, el disparo debe anticiparse ligeramente respecto a los puntos referenciales para minimizar errores de sincronización y garantizar una transición eficiente entre etapas. Este ajuste es clave para optimizar la transferencia de energía y maximizar la aceleración.

Además, la relación entre la velocidad y la fuerza electromagnética Fig. 4.7 confirma que el impulso en cada etapa coincide con los picos de fuerza generados en las bobinas, lo que refuerza la importancia de una activación precisa del sistema de conmutación. Todos los resultados se muestran en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Resultados de cada etapa del proceso

Etapa	Variable	Resultado
Etapa 1	Velocidad	32,47 m/s
	i_c	3769,3 A
	i_a	56,8 kA
	F_e	24,64 kN
Etapa 2	Velocidad	44,32 m/s
	i_c	4169,23 A
	i_a	88,91 kA
	F_e	15,516 kN
Etapa 3	Velocidad	58,032 m/s
	i_c	3879 A
	i_a	73,124 kA
	F_e	18,174 kN
Etapa 4	Velocidad	70 m/s
	i_c	3467,4 A
	i_a	48,189 kA
	F_e	18,797 kN
Etapa 5	Velocidad	80 m/s
	i_c	3601,4 A
	i_a	54,06 kA
	F_e	17,9 kN

Los resultados de la simulación del cañón electromagnético en sus cinco etapas muestran una clara tendencia de aumento en la velocidad del proyectil, que va desde $32,47 m/s$ en la etapa uno hasta alcanzar un máximo de $80 m/s$ en la quinta etapa. Este aumento sostenido en la velocidad indica que el sistema es eficiente en la conversión de energía electromagnética en energía cinética, lo que es fundamental para la eficacia del cañón. Sin embargo, se observa que la corriente de la bobina i_c y la corriente del proyectil i_a presentan variaciones a lo largo de las etapas. Mientras que i_a muestra un aumento en las etapas dos y cinco, lo que sugiere un incremento en la fuerza de propulsión del proyectil, i_c fluctúa, con un notable descenso en la etapa 3 y un ligero aumento hacia el final. Esto podría indicar una un ajuste correcto ajuste del sistema en el manejo de la energía, donde se prioriza la velocidad en lugar de mantener constantemente alta la corriente de la bobina.

En cuanto a la fuerza eléctrica generada F_e , se evidencia un comportamiento que refleja la dinámica del sistema, con valores que oscilan entre $15,516 kN$ en la etapa dos y $24,64 kN$ en la etapa uno. La fuerza tiende a estabilizarse en torno a $18 kN$ en las etapas tres, cuatro y cinco, lo que indica que, aunque la velocidad del proyectil sigue aumentando, el sistema está adaptando su capacidad de generación de fuerza para mantener la eficacia en el lanzamiento.

5.0.3. Comparación con resultados experimentales

En su investigación sobre el cañón electromagnético, Niu [3] se enfoca en la optimización de la sincronización de disparo. Sin embargo, en este proyecto técnico se han adoptado las mismas dimensiones utilizadas por el autor en sus experimentos, con el objetivo de observar los resultados obtenidos mediante un modelo propio de cañón electromagnético. Es importante destacar que Niu emplea un modelo de cañón mucho más complejo, lo que hace que la contrastación de resultados sea especialmente relevante en esta área de conocimiento.

Los resultados del experimento se muestran en la siguiente Tabla 5.3:

Tabla 5.3: Resultados de corriente de bobina y velocidad experimental

Etapa	Resultado
Etapa 1	$i_c \approx 5,66 \text{ kA}$
Etapa 2	$i_c \approx 6,82 \text{ kA}$
Etapa 3	$i_c \approx 7,38 \text{ kA}$
Etapa 4	$i_c \approx 8,11 \text{ kA}$
Etapa 5	$i_c \approx 9 \text{ kA}$
Final	Velocidad experimental = 88 m/s

En la Tabla 5.3 se muestra la comparación de las corrientes de bobina i_c por etapa para los modelos de Niu y el propuesto en este proyecto técnico. Se observa que en todas las etapas, la corriente de bobina en el modelo propuesto es considerablemente más baja en comparación con los valores reportados por Niu. En el modelo de Niu, la corriente aumenta progresivamente a medida que avanza en las etapas, alcanzando un máximo de 9 kA en la quinta etapa. Por el contrario, en el modelo de este proyecto, la corriente fluctúa, destacándose la disminución en las etapas intermedias, lo que sugiere un enfoque distinto en la distribución de la energía y la optimización de la transferencia electromagnética.

La velocidad final alcanzada por el modelo de este proyecto es de 80 m/s , mientras que el modelo de Niu logra una velocidad experimental final de 88 m/s . Esta diferencia de 8 m/s podría estar relacionada con la variación en las corrientes de bobina, ya que el sistema de Niu, al ser más complejo, podría generar una mayor eficiencia en la conversión de energía electromagnética a cinética. Aunque la velocidad final en el modelo propuesto es ligeramente inferior, los resultados están dentro de un rango similar.

Por consecuencia, aunque el modelo propuesto presenta una corriente de bobina más baja y una velocidad final ligeramente inferior en comparación con el modelo de Niu, la comparación resulta útil para evaluar el rendimiento y la eficiencia de ambos sistemas. Los resultados sugieren que el modelo de Niu, al ser más complejo, alcanza una mayor eficiencia, pero el modelo propuesto también demuestra ser efectivo en la conversión de energía, destacando su potencial en aplicaciones prácticas de cañones electromagnéticos. Es importante señalar que el modelo utilizado en este proyecto técnico está enfocado únicamente en el funcionamiento del cañón electromagnético, sin abordar la optimización del disparo, que es el principal objetivo de Niu. Por lo tanto, al reconocer esta diferencia, se puede concluir que el modelo desarrollado en este proyecto tiene un buen margen de mejora, especialmente si se considerara la

optimización de los tiempos de conmutación del tiristor entre bobinas.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se han dividido en cuatro partes referentes a: La modelación de las inductancias, la implementación del modelo desarrollado en ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw, El desarrollo de un modelo con múltiples etapas y finalmente la contrastación con resultados experimentales:

- **Modelado y validación de la inductancia mutua en función de la posición:**

El proceso de modelado y validación de la inductancia mutua en función de la posición permitió establecer una metodología precisa para la reconstrucción gráfica de esta magnitud. A partir de un conjunto de puntos representativos obtenidos de la gráfica experimental, se definieron tres tramos principales: un primer tramo con una pendiente nula, un segundo tramo con un comportamiento lineal y un tercer tramo que sigue una tendencia exponencial.

Para la reconstrucción, se emplearon técnicas de interpolación y ajuste de curvas, utilizando MATLAB para la verificación inicial de los cálculos y ATPDraw para su implementación final. Se aplicó un enfoque algebraico para definir ecuaciones que describen cada tramo, asegurando la continuidad en la representación matemática de la inductancia mutua y su derivada. Posteriormente, la integración de la derivada permitió obtener la inductancia mutua en función de la posición, validando así la consistencia del modelo desarrollado.

El código implementado en ATPDraw reprodujo fielmente los resultados obtenidos en MATLAB, lo que confirma la validez del método empleado. La comparación entre ambas herramientas evidenció una concordancia total en las gráficas generadas, demostrando que la metodología utilizada es adecuada para modelar con precisión la variación de la inductancia mutua en un cañón electromagnético.

- **Implementación y simulación del cañón electromagnético en ATPDraw:**

La implementación del modelo en ATPDraw se realizó mediante la construcción de un circuito equivalente basado en el modelo BVR, el cual incluye la resistencia equivalente R_{eq} , la inductancia equivalente L_{eq} y la fuerza electromotriz equivalente E_{eq} . Este modelo permitió representar el comportamiento del sistema de forma dinámica, ajustando los parámetros eléctricos conforme avanzaba la armadura dentro del cañón. Se diseñó un esquema de alimentación compuesto por un capacitor cargado, un tiristor de

control y una red snubber, lo que permitió una correcta transferencia de energía desde la fuente hasta la bobina que produce la aceleración.

Un aspecto clave en la simulación fue la correcta integración de la inductancia mutua en función de la posición dentro del bloque MODELS de ATPDraw, lo que permitió obtener una representación fiel de dicho parámetro. La corriente de la bobina obtenida en el circuito equivalente se utilizó como entrada principal, junto con la sumatoria de fuerzas eléctricas y la variación de inductancia. La simulación permitió modelar la trayectoria de la armadura con precisión, mostrando cómo la velocidad y la aceleración evolucionan a lo largo del desplazamiento. La correcta implementación de las condiciones de disparo del tiristor, junto con la sincronización de la alimentación de las bobinas, garantizó que el sistema operara de manera funcional y replicara el comportamiento esperado de un cañón electromagnético.

■ **Desarrollo y análisis del modelo de múltiples etapas:**

La implementación del modelo de múltiples etapas permitió estudiar el comportamiento del cañón electromagnético en escenarios más complejos y realistas. En este esquema, cada bobina actúa como una etapa de aceleración independiente, contribuyendo al incremento progresivo de la velocidad del proyectil. Para lograr una correcta sincronización, se estableció un sistema de disparo basado en la posición de la armadura en lugar de un control por tiempo, mejorando la eficiencia del proceso.

Se determinó que la activación de cada bobina debía ocurrir cuando el extremo trasero de la armadura alcanzara el centro de la bobina siguiente. Este ajuste se implementó en ATPDraw mediante el bloque MODELS "Trigger", lo que permitió una transición suave entre etapas sin pérdida significativa de energía. Los resultados de la simulación evidenciaron que la velocidad del proyectil aumentaba progresivamente con cada etapa, alcanzando un máximo de 80 m/s en la quinta etapa del sistema.

Además, la redistribución de la energía eléctrica dentro del sistema mostró que la corriente de la bobina y la corriente en la armadura presentan variaciones significativas a lo largo del proceso de aceleración, reflejando la dinámica del intercambio energético.

■ **Comparación con el modelo de Niu y optimización del desempeño:**

Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en este estudio y los reportados en el modelo de Niu. Se observó que el cañón electromagnético desarrollado en este trabajo alcanzó una velocidad máxima de 80 m/s en la quinta etapa, mientras que el modelo de Niu reportó una velocidad final de 88 m/s, lo que representa una diferencia del 9%. Sin embargo, un aspecto clave identificado en esta comparación es que el modelo propuesto en este trabajo requiere una menor corriente en las bobinas, lo que sugiere una mayor eficiencia en términos de consumo energético.

Mientras que en el modelo de Niu la corriente de bobina aumenta progresivamente hasta alcanzar 9 kA, en el modelo desarrollado en esta investigación la corriente máxima registrada durante el disparo fue de 4.169 kA, con una corriente en la armadura de 88.91 kA. Este comportamiento indica que el sistema diseñado en este trabajo logra una aceleración eficiente con una menor demanda de corriente, lo que representa una ventaja en términos de optimización energética.

Además, la implementación de un disparo sincronizado basado en la posición de la armadura permitió mejorar la precisión en la activación de las bobinas, asegurando una mejor transferencia de energía al proyectil en cada etapa. A pesar de que la velocidad final obtenida es ligeramente inferior a la del modelo de Niu, los resultados obtenidos validan la efectividad del modelo desarrollado y demuestran que es posible optimizar la eficiencia del cañón electromagnético mediante ajustes en la sincronización de disparo y la distribución de la corriente en las bobinas.

En conclusión, este estudio logró desarrollar e implementar un modelo funcional de cañón electromagnético en ATPDraw, validando su precisión mediante comparaciones con datos experimentales y estudios previos. La metodología empleada permitió simular con éxito la dinámica de la armadura, asegurando que la aceleración y la sincronización de disparo fueran representadas correctamente. Los resultados obtenidos no solo confirman la viabilidad del modelo, sino que también sientan las bases para futuras investigaciones enfocadas en la optimización de la eficiencia energética y el mejoramiento de las condiciones de operación del sistema.

6.1. Tabla de criterios ABET

Tabla 6.1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:			
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad		Estética
	Códigos	<input checked="" type="checkbox"/>	Constructibilidad
	Costos		Ergonomía
	Extensibilidad		Funcionalidad
	Interoperabilidad	<input checked="" type="checkbox"/>	Consideraciones Legales
	Mantenibilidad		Manufacturabilidad
	Mercadeo		Política
	Regulaciones		Cronogramas
	Normativas		Sostenibilidad
	Impacto Ambiental		Impacto Social
	Usabilidad		Otros:
Normas relevantes (dos o más)	IEEE Std C37.90-2016	<input checked="" type="checkbox"/>	
	IEEE Std C62.41.2-2002	<input checked="" type="checkbox"/>	
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades		Generación de soluciones múltiples
	Desarrollo de requerimientos		Evaluación de soluciones
	Procesos iterativos		Consideración de riesgos
	Realizar compromisos o tratos		
Basado en trabajos anteriores	Protecciones		Iluminación
	Optimización de sistemas		Alta Tensión
	Energías alternativas		Distribución
	Máquinas eléctricas	<input checked="" type="checkbox"/>	Otros temas

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. M. Aller, “Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general,” *Editorial Equinoccio*, 2006.
- [2] I. McNab, “Early electric gun research,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 1, pp. 250–261, 1999.
- [3] X. Niu, L. Chen, Y. An, and Y. Hu, “Research on critical trigger criterion of multistage synchronous induction coilgun,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 51, no. 9, pp. 2667–2675, 2023.
- [4] E. Zapico, “Análisis estructural preliminar de un nanosatélite lanzado por cañón electromagnético,” *Mecánica Computacional Vol. XXIV*, 2005.
- [5] J. Schroeder, J. Gully, and M. Driga, “Electromagnetic launchers for space applications,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 25, no. 1, pp. 504–507, 1989.
- [6] H. K. Høidalen, L. Prikler, and J. Hall, “Atpdraw-graphical preprocessor to atp, windows version,” in *Proceedings of International Conference on Power Systems Transients, IPST*, pp. 20–24, 1999.
- [7] J. C. MAXWELL, *A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM*, vol. 1. Oxford University press series, 1873.
- [8] F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young, R. H. Vara, M. G. García, E. R. Güemes, P. M. Cook, and F. G. Benites, *Física universitaria*. Fondo Educativo Interamericano Naucalpan de Juárez, México, 1986.
- [9] L. Shoubao, R. Jiangjun, P. Ying, Z. Yujiao, and Z. Yadong, “Improvement of current filament method and its application in performance analysis of induction coil gun,” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 382–389, 2011.
- [10] K. McKinney and P. Mongeau, “Multiple stage pulsed induction acceleration,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 20, no. 2, pp. 239–242, 1984.
- [11] M. A. Sadiku, *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Mc Graw Hill, 2006.
- [12] IEEE Standards Association, “IEEE Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus,” *IEEE Standards*, no. C37.90-2016, 2016.
- [13] J. C. MAXWELL, *A TREATISE ON ELECTRICITY AND MAGNETISM*, vol. 2. Oxford University press series, 1873.

- [14] M. G. Song, D. V. Le, B. S. Go, M. Park, and I. K. Yu, "Design of an attractive force circuit of pulsed power system for multistage synchronous induction coilgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, no. 10, pp. 3606–3611, 2018.
- [15] IEEE Standards Association, "IEEE Recommended Practice on Characterization of Surges in Low-Voltage (1000 V and Less) AC Power Circuits," *IEEE Standards*, no. C62.41.2-2002, 2002.
- [16] S. Babic, C. Akyel, and S. Salon, "New procedures for calculating the mutual inductance of the system: elementary circular coil-massive circular solenoid," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 3, pp. 1131–1134, 2003.
- [17] Z. Yadong, W. Ying, and R. Jiangjun, "Capacitor-driven coil-gun scaling relationships," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 220–224, 2011.
- [18] IEEE, "IEEE Standard for Trip Systems for Low-Voltage (1000 V and below) AC and General Purpose (1500 V and below) DC Power Circuit Breakers," *IEEE Std C37.17-2022 (Revision of IEEE Std C37.17-2012)*, 2022.
- [19] L. Cohen, "Self-inductance of a solenoid of any number of layers," *US Department of Commerce and Labor*, 1908.
- [20] V. Pankrac, "The algorithm for calculation of the self and mutual inductance of thin-walled air coils of general shape with parallel axes," *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, 2012.
- [21] E. R. Grover, *Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance*. US Government Printing Office, 1912.
- [22] H. D. Fair, "Advances in electromagnetic launch science and technology and its applications," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 225–230, 2009.