



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Doctorado

**Implementación de Estrategias de Mejora del
Aprovechamiento de Energía en un Acelerador de
Reluctancia Portátil**

presentada por

MC. Jorge Luis Rivas Camacho

como requisito para la obtención del grado de
**Doctor en Ciencias de la Ingeniería
Electrónica**

Director de tesis

Dr. Mario Ponce Silva

Codirector de tesis

Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino

Cuernavaca, Morelos, México. Diciembre de 2019.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

ESC\FORDOC09

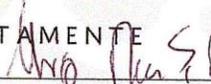
ACEPTACIÓN DEL TRABAJO DE TESIS DOCTORAL

Cuernavaca, Morelos a 5 de diciembre de 2019.

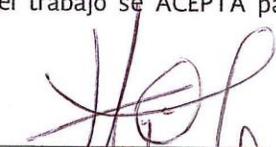
Dr. Mario Ponce Silva
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica
Presente

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la Tesis Doctoral del alumno **Jorge Luis Rivas Camacho**, manifiestan que después de haber revisado su trabajo de tesis doctoral titulado **"Implementación de estrategias para la mejora de aprovechamiento de energía de un acelerador de reluctancia portátil"** realizado bajo la dirección del **Dr. Mario Ponce Silva** y codirección del **Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino**, el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE



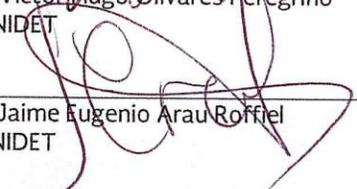
Dr. Mario Ponce Silva
CENIDET



Dr. Víctor Hugo Olivares Peregrino
CENIDET



Dr. Abraham Claudio Sánchez
CENIDET



Dr. Jaime Eugenio Arau Roffiel
CENIDET



Dr. Gabriel Calzada Lara
Profesor externo

Reciba un cordial saludo.

c.c.p: M.E. Guadalupe Garrido Rivera / Jefa del Departamento de Servicios Escolares.

c.c.p: Dr. Gerardo Vicente Guerrero Ramírez / Subdirector Académico.

c.c.p: Expediente.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

ESC\FORDOC010

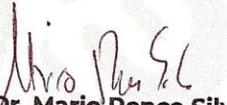
Cuernavaca, Morelos a 6 de diciembre de 2019.

M.C. Jorge Luis Rivas Camacho
Candidato al grado de Doctor
en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Presente

Después de haber sometido a revisión su trabajo final de tesis titulado **"Implementación de estrategias para la mejora de aprovechamiento de energía de un acelerador de reluctancia portátil"**, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que el jurado revisor de tesis le hizo, le comunico que se le concede autorización para que proceda a la impresión de la misma, como requisito para la obtención del grado.

Reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
Excelencia en Educación Tecnológica®
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"


Dr. Mario Ponce Silva
Jefe del Departamento de Ingeniería Electrónica



c.c.p.: M.E. Guadalupe Garrido Rivera.- Jefa del Departamento de Servicios Escolares.
c.c.p.: Expediente.

Resumen

En este trabajo de tesis se describe el desarrollo, el diseño, y la elaboración de un acelerador de reluctancia, un tipo de lanzador electromagnético que lanza proyectiles fabricados con materiales ferromagnéticos, portátil y con características (concernientes al tipo de proyectil y a su velocidad de salida) similares a las observadas en herramientas lanzadoras de clavos comercialmente disponibles.

Se tomaron en cuenta los factores que podían mejorar la portabilidad y la eficiencia de conversión (la relación entre la energía cinética desarrollada por el proyectil a la salida del lanzador y la energía eléctrica utilizada para realizar un disparo) a la hora de seleccionar las topologías y los componentes apropiados para el lanzador electromagnético.

Para cumplir con los objetivos estipulados en este trabajo de tesis, se desarrolló un nuevo tipo de bobina de lanzamiento para un acelerador de reluctancia, cuya estructura y modelado matemático son descritos en este documento.

Finalmente, se construyó un prototipo con las características indicadas, y se realizaron disparos para evaluar su desempeño, y la exactitud del modelo matemático desarrollado para este lanzador electromagnético.

Abstract

In this thesis is described the development, design, and the construction of a reluctance accelerator, a kind of electromagnetic launcher which launches projectiles made of ferromagnetic materials, portable and with similar characteristics (concerning to the kind of projectile launched and its muzzle speed) to those observed in nail gun tools commercially available.

The factors that could improve portability and conversion efficiency (the relationship between the kinetic energy developed by the projectile at the end of the launcher and the electric energy used to make a firing) were taken into account when selecting the topologies and the appropriate components for the electromagnetic launcher.

To meet the objectives stipulated in this thesis, a new type of launch coil was developed for a reluctance accelerator, whose structure and mathematical modeling are described in this document.

Finally, a prototype with the indicated characteristics was built, and firings were made to evaluate its performance, and the accuracy of the mathematical model developed for this electromagnetic launcher.

Agradecimientos

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos:

A mis más grandes razones para seguir siempre adelante: Elina, Lola (la gata), Susana y Yolanda.

Al doctor Mario Ponce Silva, por el gran apoyo, la confianza, y los conocimientos compartidos durante todo el desarrollo de este proyecto.

A los doctores Marco Antonio Oliver Salazar, Víctor Hugo Olivares Peregrino, Jaime Eugenio Arau Roffiel y Gabriel Calzada Lara, y Abraham Claudio Sánchez. Gracias por sus consejos, y por el tiempo que se tomaron en revisar este trabajo de tesis para poder desarrollar un trabajo comprensible, coherente y relevante dentro de los límites de mis capacidades.

A los doctores Jorge Hugo Calleja Gjumlich, Carlos Aguilar Castillo, Jesús Darío Mina Antonio, y Jesús Aguayo Alquicira. Gracias por todas sus enseñanzas, que fueron mucho más allá de la electrónica de potencia.

A toda mi familia que me ha apoyado en los momentos más difíciles.

A todas las personas que trabajan en el CENIDET.

A Lorena Ruiz por su gran ayuda para los trámites de titulación.

A mis compañeros del CENIDET, especialmente a José González por compartir con generosidad equipo y material, y por amenizar el día en el laboratorio con su música de elevador.

Al Tecnológico Nacional de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT.

Contenido

Lista de figuras	i
Capítulo 1:.....	i
Capítulo 2:.....	i
Capítulo 3:.....	ii
Capítulo 4:.....	iii
Capítulo 5:.....	iv
Anexo B:.....	v
Anexo C:.....	vi
Lista de tablas	vii
Capítulo 1:.....	vii
Capítulo 2:.....	vii
Capítulo 4:.....	vii
Capítulo 5:.....	vii
Anexo A:.....	vii
Anexo B:.....	viii
Anexo C:.....	viii
Nomenclatura	ix
Lista de variables, constantes y símbolos empleados.....	ix
Lista de siglas y acrónimos empleados.....	xviii
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Los lanzadores electromagnéticos	1
1.1.1 El acelerador de reluctancia	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Planteamiento del problema de investigación	5
1.4 Objetivos	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos particulares	6
1.5 Revisión del estado del arte.....	6

1.5.1	Determinación de la velocidad de salida de una herramienta lanzadora de clavos.....	6
1.5.2	Revisión de las eficiencias de conversión de los aceleradores de reluctancia reportadas en la literatura.	7
1.6	Conclusiones del estado del arte.....	10
1.7	Estructura del documento.....	11
Capítulo 2: El acelerador de reluctancia: un sistema energizado por pulsos de alta potencia.....		12
2.1	Elementos que actúan durante la etapa de carga de un acelerador de reluctancia	13
2.1.1	La fuente de suministro de energía para un acelerador de reluctancia.....	14
2.1.2	El circuito elevador de tensión de la fuente de suministro de energía.....	16
2.2	El sistema de almacenamiento de energía de un acelerador de reluctancia	23
2.2.1	La selección del sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia portátil	28
2.3	El evento de disparo en un acelerador de reluctancia.....	32
2.3.1	Características de los dispositivos semiconductores de conmutación de disparo que pueden utilizarse en un acelerador de reluctancia.....	33
2.4	Características definidas del prototipo	36
Capítulo 3: El desarrollo y modelado de un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo para un acelerador de reluctancia.....		39
3.2	Desarrollo de un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo para un acelerador de reluctancia	39
3.2.1	Funcionamiento del <i>Ringer</i> , un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo derivado del <i>Meatgrinder</i>	40
3.2.2	La bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada para el acelerador de reluctancia.....	42
3.2.3	El modelado matemático de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.....	44
3.2.3	Integración de la bobina de lanzamiento/almacenamiento al modelo matemático de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento tipo <i>ringer</i>	49
3.3	El modelo implementado en Simulink.....	53

Capítulo 4: El diseño e implementación de un acelerador de reluctancia portátil.....	56
4.1 El banco de baterías empleado.....	57
4.2 El elemento capacitivo del sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia.....	59
4.3 La etapa elevadora de tensión del acelerador de reluctancia.....	64
4.4 Los interruptores de disparo.....	68
4.5 La bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia.....	70
4.5.1 La selección del calibre del alambre de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.....	70
4.5.2 La elaboración de las cubiertas ferromagnéticas de las bobinas de lanzamiento.....	72
4.5.3 El tubo de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.....	74
4.5.4 La bobina de lanzamiento/almacenamiento construida.....	76
Capítulo 5: Resultados experimentales.....	77
5.2 Los sensores de corriente y velocidad.....	77
5.3 Pruebas experimentales del prototipo desarrollado.....	81
5.3.1 Discusión de los resultados experimentales.....	85
Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros.....	87
6.1 Conclusiones.....	87
6.2 Trabajos futuros.....	88
ANEXO A: Características de los lanzadores y disparos reportados en la literatura.....	89
Anexo B: Modelado matemático del <i>STRETCH-Meatgrinder</i> como un sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia.....	92
A.B Desarrollo de un modelo matemático para un acelerador de reluctancia con un circuito <i>STRETCH-Meatgrinder</i> como sistema de almacenamiento.....	92
B.2 Implementación del modelo en Simulink para su simulación.....	100
B.3 Prueba del modelo implementado mediante la comparación con simulaciones hechas con el software <i>PSIM</i>	104
Anexo C: Ecuaciones que describen el comportamiento de las corrientes en un <i>ringer</i>.....	111
C.1 El <i>ringer</i> ideal sin carga.....	111

C.2 El <i>ringer</i> ideal con una carga inductiva no acoplada magnéticamente	113
Anexo D: Productos obtenidos durante el desarrollo del trabajo de tesis	115
Referencias.....	116

Lista de figuras

Capítulo 1:

Figura 1.1: Vista esquemática simplificada de un acelerador de reluctancia.	3
Figura 1.2: Resultado de simulaciones del campo magnético desarrollado por una bobina de lanzamiento energizada de un acelerador de reluctancia, interactuando con su proyectil.	4
Figura 1.3: Velocidades de salida de herramientas lanzadoras de clavos comercialmente disponibles.	7
Figura 1.4: Comportamiento de la energía cinética desarrollada por el proyectil con respecto al valor de la energía eléctrica para cada disparo.	9
Figura 1.5: Comportamiento de la eficiencia de conversión η con respecto a la energía eléctrica empleada para cada disparo.	10

Capítulo 2:

Figura 2.1: Funcionamiento de un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia.	12
Figura 2.2: Relación entre la densidad de energía y la densidad de potencia de diversos dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica.	13
Figura 2.3: Generador <i>Marx</i> con tres etapas.	17
Figura 2.4: Circuito de un cargador de un elevador de tensión, basado en un convertidor puente completo.	17
Figura 2.5: Detalle de circuito elevador de tensión de puente completo resonante en serie.	18
Figura 2.6: Detalle de un circuito elevador de tensión de puente completo resonante en paralelo.	18
Figura 2.7: Detalle de un circuito elevador de tensión de puente completo resonante LLC.	19
Figura 2.8: Convertidor elevador resonante de medio puente empleado para cargar a un banco de capacitores.	20
Figura 2.9: <i>Flyback</i> de conmutación dual que carga que carga a un banco de capacitores.	20

Figura 2.10: Circuito elevador <i>buck-boost</i> con dos IGCTs como dispositivos de conmutación.	21
Figura 2.11: Convertidor <i>boost</i> empleado como elevador de tensión para la carga de un banco de capacitores.	22
Figura 2.12: Topología <i>flyback</i> tradicional utilizada como circuito elevador para cargar a un banco de capacitores.	22
Figura 2.13: Acelerador de reluctancia como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia con un sistema de almacenamiento electrostático.	24
Figura 2.14: Acelerador de reluctancia como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia con un sistema de almacenamiento magnético.	25
Figura 2.15: Circuito equivalente de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento electrostático.	27
Figura 2.16: Comparativa de las formas de onda para la el pulso de corriente en las bobinas de lanzamiento de aceleradores de reluctancia.	28
Figura 2.17: Multiplicador de corriente XRAM de dos etapas.	29
Figura 2.18: Ilustración de la técnica ICCOS.	29
Figura 2.19: <i>Meatgrinder</i> de una etapa.	30
Figura 2.20: Diagrama esquemático de un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo tipo <i>STRETCH-Meatgrinder</i> .	31
Figura 2.21: Ejemplo de un acelerador de reluctancia con truncamiento de pulso de corriente para mejorar la eficiencia de conversión.	34
Figura 2.22: Diagrama a bloques del sistema completo	38

Capítulo 3:

Figura 3.1: Diagrama esquemático del <i>ringer</i> .	40
Figura 3.2: Circuito equivalente de la primera etapa del funcionamiento del <i>ringer</i> .	41
Figura 3.3: Circuito equivalente de la segunda etapa del funcionamiento del <i>ringer</i> .	41
Figura 3.4: Formas de onda de la corriente y el voltaje de un circuito <i>ringer</i> .	42
Figura 3.5: Vista longitudinal de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.	42
Figura 3.6: El circuito equivalente de la bobina propuesta.	43
Figura 3.7: Representación simplificada de las dos secciones de la bobina de lanzamiento como dos cilindros concéntricos.	44

Figura 3.8: Las tres etapas del lanzamiento propuestas por William Slade.	46
Figura 3.9: Saturación característica del proyectil (sin histéresis).	47
Figura 3.10: Vista esquemática longitudinal de la bobina donde se muestra la ruta de integración para la ley de Ampere.	48
Figura 3.11: Circuito equivalente de la bobina de lanzamiento/almacenamiento montada en un sistema de almacenamiento tipo <i>ringer</i> , antes de que el diodo D comience a conducir.	50
Figura 3.12: Circuito equivalente de la bobina de lanzamiento/almacenamiento montada en un sistema de almacenamiento tipo <i>ringer</i> , durante la segunda etapa de la operación de dicha configuración.	52
Figura 3.13: Implementación del modelo matemático del prototipo en <i>Simulink</i> .	53
Figura 3.14: Subsistema “ <i>Bandera cambio de polaridad</i> ”.	54
Figura 3.15: Subsistema “ <i>Selec est</i> ”.	54
Figura 3.16: Subsistema “ <i>Selec esta</i> ”.	55

Capítulo 4:

Figura 4.1: Diagrama esquemático simplificado del prototipo.	56
Figura 4.2: El banco de baterías empleado como fuente de suministro de energía eléctrica.	58
Figura 4.3: Banco de capacitores de película plástica con una capacitancia nominal de 400 μF .	60
Figura 4.4: Circuito equivalente de un capacitor electrolítico de aluminio.	61
Figura 4.5: Elaboración de un capacitor no polarizado a partir de un par de capacitores electrolíticos de aluminio.	61
Figura 4.6: Vista superior y vista lateral del banco de capacitores electrolíticos de aluminio, conectados para generar un capacitor no polarizado.	62
Figura 4.7: Formas de onda del voltaje entre las terminales del banco de capacitores electrolíticos conectados para obtener un capacitor no polarizados en un <i>ringer</i> .	63
Figura 4.8: Elemento capacitivo del sistema de almacenamiento desarrollado.	64
Figura 4.9: Diagrama de flujo del sistema de control de la carga y el disparo del acelerador de reluctancia desarrollado.	66
Figura 4.10: Diagrama del circuito de control de los pulsos de carga y de disparo para el acelerador de reluctancia.	67

Figura 4.11: Circuito de carga y control construido.	68
Figura 4.12: Pistas de la placa de circuito impreso del circuito de control de la carga y el disparo del acelerador de reluctancia.	68
Figura 4.13: Dispositivos de disparo del prototipo construido.	69
Figura 4.14: Comportamiento de las velocidades de salida alcanzadas por proyectiles acelerados por bobinas de lanzamiento elaboradas con alambre AWG #16 y alambre AWG #14.	72
Figura 4.15: Eficiencias de conversión simuladas para distintas bobinas de lanzamiento/almacenamiento elaboradas con alambre AWG #14.	72
Figura 4.16: Bobina de lanzamiento/almacenamiento con una cubierta ferromagnética contenida en una sección de tubo de PVC.	73
Figura 4.17: Cubierta plástica para contener a la cubierta ferromagnética de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.	74
Figura 4.18: Bobina de lanzamiento y su cubierta plástica reutilizable.	74
Figura 4.19: Características de los tubos empleados para enrollar la bobina.	75
Figura 4.20: Corriente I_0 inducida sobre el tubo de un acelerador de reluctancia por un campo magnético transitorio B .	75
Figura 4.21: Tubo de cobre empleado para enrollar la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia.	75
Figura 4.22: Bobina de lanzamiento/almacenamiento elaborada.	76

Capítulo 5:

Figura 5.1: Bobinas Rogowski construidas.	78
Figura 5.2: Circuito construido para obtener, amplificar e integrar la señal de voltaje proveniente de la bobina Rogowski.	79
Figura 5.3: Desempeño de las bobinas Rogowski construidas midiendo una corriente a 60 Hz.	79
Figura 5.4: Sensor reflectivo empleado para estimar la velocidad de salida del proyectil ferromagnético.	80
Figura 5.5: Sensor de velocidad montado a la salida de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.	80
Figura 5.6: Formas de onda obtenidas para el prototipo final cuando el elemento capacitivo se cargó a 353 V.	81
Figura 5.7: Formas de onda simuladas para el disparo hecho a 353 V.	81

Figura 5.8: Formas de onda de la corriente de los inductores de la bobina de lanzamiento, obtenidas con las bobinas Rogowski.	82
Figura 5.9: Formas de onda simulada y medida del voltaje en el capacitor del sistema de almacenamiento, a un voltaje inicial de 353 V.	83
Figura 5.10: Flujo magnético generado por ambos inductores de la bobina de lanzamiento almacenamiento	83
Figura 5.11: Comportamiento de la velocidad del proyectil simulada.	84
Figura 5.12: Evolución de la velocidad del proyectil en una bobina sin cubierta ferromagnética.	84
Figura 5.13: Evolución de la velocidad del proyectil de un lanzador con una bobina de lanzamiento simple.	85
Figura 5.14: Resultados experimentales con un prototipo alejado del ideal de un solenoide largo.	86

Anexo B:

Figura B.1: Diagrama eléctrico equivalente de un sistema de almacenamiento <i>STRETCH-Meatgrinder</i> .	92
Figura B.2: Representación del acelerador de reluctancia modelado por William Slade.	93
Figura B.3: <i>STRETCH-Meatgrinder</i> como un sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia durante las etapas I y II.	94
Figura B.4: Circuito equivalente del <i>STRETCH-Meatgrinder</i> durante la etapa III de su operación.	96
Figura B.5: Etapa IV del funcionamiento del <i>STRETCH-Meatgrinder</i> .	97
Figura B.6: Circuito equivalente de la etapa IV de la operación de <i>un STRETCH-Meatgrinder</i> .	98
Figura B.7: Circuito equivalente del <i>STRETCH-Meatgrinder</i> en la etapa V de su operación.	99
Figura B.8: El modelo matemático desarrollado para un <i>STRETCH-Meatgrinder</i> , implementado en <i>Simulink</i> .	101
Figura B.9: Detalle del subsistema “ <i>Selec esta</i> ”.	102
Figura B.10: Detalle del subsistema “ <i>Selec est</i> ”.	102
Figura B.11: Detalle del subsistema “ <i>Bandera cambio de polaridad</i> ”.	102

Figura B.12: Detalle del subsistema “III-IV”.	103
Figura B.13: Detalle del subsistema “IV-V”.	103
Figura B.14: Detalle del subsistema “IC-V”.	104
Figura B.15: Características físicas de la bobina de lanzamiento simulada.	105
Figura B.16: Circuito de prueba implementado con el software <i>PSIM</i> .	107
Figura B.17: Formas de onda en cada inductor del sistema obtenidas en ambas simulaciones.	107
Figura B.18: Formas de onda de la tensión en el capacitor para cada simulación.	108
Figura B.19: Densidad de campo magnético al interior de la bobina de lanzamiento.	108
Figura B.20: Velocidad de salida simulada del proyectil.	109
Figura B.21: Formas de onda de las corrientes en cada inductor cuando la bobina de lanzamiento se desconecta del <i>STRETCH-Meatgrinder</i> a los 20 μ s.	109
Figura B.22: Formas de onda del voltaje en el capacitor C_M para las simulaciones hechas con <i>Simulink</i> , y la hecha con <i>PSIM</i> .	110

Anexo C:

Figura C.1: Diagrama del <i>ringer</i> ideal sin carga.	111
Figura C.2: Formas de onda de las corrientes en los inductores de almacenamiento de un <i>ringer</i> sin carga.	113
Figura C.3: <i>Ringer</i> con una carga inductiva L_L no acoplada magnéticamente.	113

Lista de tablas

Capítulo 1:

Tabla 1.I: Características requeridas por el proyectil.	10
--	----

Capítulo 2:

Tabla 2.I: Comparativa entre algunos de los parámetros de las baterías de plomo-ácido tipo VRLA y los de iones de litio con cátodos de óxidos metálicos.	15
Tabla 2.II: Resultados de la comparación entre las topologías de almacenamiento inductivo-capacitivo más comunes reportadas en la literatura.	32

Capítulo 4:

Tabla 4.I: Características relevantes de las baterías empleadas en la fuente de suministro.	57
Tabla 4.II: Características relevantes del <i>flyback</i> empleado como etapa elevadora de tensión para el sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia.	65
Tabla 4.III: Características de los interruptores de disparo utilizados para el prototipo construido.	69
Tabla 4.IV: Características de la bobina de lanzamiento construida.	76

Capítulo 5:

Tabla 5.I: Resultados para los valores pico en la corriente de L2, y la velocidad de salida del proyectil.	85
Tabla 5.II: Mejora de la eficiencia de conversión al emplear la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.	86

Anexo A:

Tabla A.I: Características de los disparos reportados en la literatura.	90
--	----

Anexo B:

Tabla B.I: Características de la bobina de lanzamiento y el proyectil simulados. 105

Tabla B.II: Características del circuito *STRETCH-Meatgrinder* simulado. 106

Anexo C:

Tabla C.I: Valores máximos y mínimos de las corrientes y del voltaje en el capacitor en un *ringer* ideal sin carga. 113

Nomenclatura

Lista de variables, constantes y símbolos empleados.

a	Radio de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
a_e	Radio de la sección externa de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
a_i	Radio de la sección interna de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
a_p	Área transversal de un clavo lanzado por una herramienta lanzadora de clavos.
A_w	Área transversal del alambre con el que está construida la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
B	Componente longitudinal de la densidad de campo magnético al interior de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia
B	Densidad de campo magnético.
B_{ia}	Magnitud de la densidad de campo magnético en un inductor de almacenamiento de energía.
B_{sat}	Densidad de campo magnético de saturación del proyectil ferromagnético del acelerador de reluctancia.
C	Elemento capacitivo de un circuito eléctrico.
C_1-C_n	Conjunto de n elementos capacitivos en un circuito eléctrico.
C_a	Capacitor de almacenamiento de energía de disparo.
C_{cc}	Capacitor de un sistema ICCOS.
C_{E1} y C_{E2}	Capacitores electrolíticos conectados para formar un capacitor no polarizado.

C_{ET}	Capacitancia del capacitor equivalente no polarizado resultado de conectar dos capacitores electrolíticos.
C_g	Capacitor a la entrada de un convertidor de potencia.
C_{k1} y C_{k2}	Capacitores resonantes utilizados en una configuración elevadora de medio puente.
C_M	Elemento capacitivo de almacenamiento de energía de un STRETCH-Meatgrinder.
C_{min}	Capacitancia mínima estimada para que un proyectil determinado desarrolle una determinada energía cinética a la salida de la bobina de lanzamiento.
C_{nom}	Carga nominal de una batería.
C_o	Capacitor de salida de un convertidor de potencia.
C_s	Capacitancia en serie equivalente de un elemento de un circuito eléctrico.
d	Diámetro del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
D	Diodo en un circuito.
D_1-D_n	Conjunto de n diodos en un circuito eléctrico.
d_B	Diámetro de una batería.
D_{cc}	Diodo de protección en un sistema ICCOS.
D_f	Diodo de rodada libre para una carga inductiva.
D_L	Diodo LED de un sensor reflectivo.
f_i	Fuerzas generalizadas asociadas a la i -ésima variable dinámica de un sistema.
f_{min}	Frecuencia mínima de la forma de onda de la corriente a medir con una bobina Rogowski.
f_{pi}	Frecuencia del polo de integración del integrador de una bobina Rogowski.
f_{Q1} y f_{Q2}	Fuerzas generalizadas asociadas a la corriente eléctrica en los inductores L_1 y L_2 de un <i>ringer</i> .

F_{QA} y F_{QB}	Fuerzas generalizadas asociadas a la corriente eléctrica en los inductores L_1 y L_2 de un STRETCH-Meatgrinder.
f_{QL}	Fuerzas generalizadas asociadas a la corriente eléctrica común a todo el circuito durante la primera etapa de operación de un <i>ringer</i> .
H	Magnitud de la intensidad del campo magnético en la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
h_B	Altura de una batería.
H_i	Ganancia del circuito integrador de una bobina Rogowski.
$I_A(0)$	Corriente inicial en el inductor de almacenamiento L_1 de un STRETCH-Meatgrinder.
i_{cc}	Corriente de apagado del tiristor de un sistema de apagado ICCOS.
I_{en}	Corriente de entrada de un convertidor flyback.
I_L	Corriente promedio en un inductor de almacenamiento.
i_{L1} e i_{L2}	Corrientes en los inductores L_1 y L_2 de un <i>ringer</i> .
i_{Lex}	Corriente en la sección externa de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
i_{Lin}	Corriente en la sección interna de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
I_{P1}	Magnitud del primer pico de corriente en el inductor L_2 de un <i>ringer</i> .
I_{P2}	Magnitud del segundo pico de corriente en el inductor L_2 de un <i>ringer</i> .
i_T	Corriente en el tiristor apagado mediante un sistema ICCOS.
k	Factor de acoplamiento magnético de un par de inductores magnéticamente acoplados.
l	Longitud de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
L	Elemento inductivo en un circuito eléctrico.
L_1-L_n	Conjunto de n elementos inductivos en un circuito eléctrico.

L_c	Inductancia sin proyectil ferromagnético de una bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
L_d	Inductancia de dispersión de un transformador.
L_{ex}	Inductancia de la sección externa de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
L_{ie}	Inductancia mutua entre las secciones interna y externa de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
L_{ia}	Inductancia de un inductor de almacenamiento.
L_{in}	Inductancia de la sección interna de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
L_k	Inductancia en serie equivalente del lado del primario de un transformador.
L_L	Bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento tipo <i>ringer</i> , con inductores de almacenamiento externos.
L_m	Inductancia magnetizante de un transformador.
L_p	Inductancia del devanado primario de un transformador.
L_Q	Inductor de un convertidor <i>buck-boost</i> .
L_s	Inductancia del devanado secundario de un transformador.
m	Masa del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
M	Magnitud de la magnetización del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
M_0	Magnetización inicial del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
m_B	Masa de un banco de baterías.
n	Número de vueltas por unidad de longitud en una bobina.
N	Número total de vueltas en una bobina.
N_1 y N_2	Número de vueltas en el inductor L_1 y L_2 de un ringer.

n_c	Número de bancos de capacitores en un sistema de almacenamiento.
N_j	Número de vueltas de la j -ésima sección de los devanados de un inductor.
N_{Lex}	Número de vueltas de la sección externa de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
N_{Lin}	Número de vueltas de la sección interna de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
N_P	Número de vueltas del devanado primario de un transformador.
N_S	Número de vueltas del devanado secundario de un transformador.
p	Longitud del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
P	Presión ejercida sobre el clavo por una herramienta lanzadora de clavos.
P_{en}	Potencia de entrada de un convertidor <i>flyback</i> .
P_{sal}	Potencia de salida de un convertidor <i>flyback</i> .
q_1 y q_2	Cargas eléctricas en las ramas de los inductores L_1 y L_2 de un <i>ringer</i> .
Q_1-Q_n	Conjunto de n dispositivos de conmutación activos en un circuito eléctrico.
Q_A	Carga eléctrica en la rama del inductor L_1 de un STRETCH-Meatgrinder.
Q_B	Carga eléctrica en la rama del inductor L_2 de un STRETCH-Meatgrinder.
Q_F	Fototransistor en un sensor reflectivo.
q_j	Carga eléctrica en la j -ésima sección de los devanados de una bobina.
q_L	Carga eléctrica común a todo el circuito durante la primera etapa del funcionamiento de un <i>ringer</i> .
Q_L	Carga eléctrica en la rama de la bobina de lanzamiento conectada a un STRETCH-Meatgrinder.
q_{Lex}	Carga eléctrica en la sección externa de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.

q_{Lin}	Carga eléctrica en la sección interna de los devanados de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
r	Distancia radial desde el centro del tubo de la bobina de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
R	Elemento resistivo en un circuito eléctrico.
R_1 y R_2	Resistencias equivalentes de los inductores L_1 y L_2 de un sistema de almacenamiento de energía.
R_g	Resistencia de compuerta de un dispositivo de conmutación.
R_{i1} - R_{in}	Conjunto de n elementos resistivos en el circuito del integrador a la salida de una bobina Rogowski.
R_{ia}	Resistencia en serie equivalente de un inductor de almacenamiento.
R_o	Resistencia de descarga equivalente de un capacitor electrolítico.
R_s	Resistencia en serie equivalente de un elemento de un circuito eléctrico.
R_{SW}	Resistencia en serie equivalente de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
S	Presión ejercida por la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia sobre su proyectil ferromagnético.
S_1 - S_n	Conjunto de n interruptores en un circuito eléctrico.
S_c	Interruptor de cierre de un sistema de almacenamiento de energía.
S_o	Interruptor de apertura de un sistema de almacenamiento de energía.
T	Energía cinética total de un lanzador electromagnético.
T_c	Energía cinética mecánica de un sistema.
t_{carga}	Tiempo que tarda un <i>flyback</i> en cargar a un banco de capacitores al voltaje de salida definido.
T_{cc}	Tiristor de descarga del capacitor de un sistema de apagado ICCOS.
T_{em}	Energía "cinética" eléctrica de un sistema.

T_m	Tiristor de cierre cuya apertura se consigue con un sistema ICCOS.
T_{P1} y T_{P2}	Tiempos en los que ocurren el primer y el segundo pico de corriente en el inductor L_2 de un <i>ringer</i> .
U	Energía potencial total de un lanzador electromagnético.
U_e	Energía potencial eléctrica de un lanzador electromagnético.
U_m	Energía potencial magnética de un lanzador electromagnético.
u_{sal}	Velocidad de salida de un lanzador electromagnético.
V	Volumen de un inductor de almacenamiento de energía.
V_B	Voltaje presente entre las terminales de una batería.
V_C	Voltaje presente entre las terminales de un banco de capacitores.
VCD	Fuente de tensión de corriente directa.
V_{Ci}	Voltaje entre las terminales de un sistema de almacenamiento capacitivo de un acelerador de reluctancia en el instante anterior a un disparo.
V_{Cf}	Voltaje entre las terminales de un sistema de almacenamiento capacitivo de un acelerador de reluctancia en el instante posterior a un disparo.
V_{en}	Voltaje de entrada de un convertidor <i>flyback</i> .
V_g	Voltaje de excitación de la compuerta de un dispositivo de conmutación de compuerta aislada.
V_i	Voltaje de entrada de la etapa elevadora del sistema de almacenamiento de energía de un lanzador electromagnético.
V_{NC}	Voltaje nominal que puede tolerar el elemento capacitivo del sistema de almacenamiento de energía de un lanzador electromagnético.
V_{nom}	Voltaje nominal de una batería.
V_o	Voltaje de salida de la etapa elevadora del sistema de almacenamiento de energía de un lanzador electromagnético.
x_i	VARIABLES dinámicas de un sistema.

x_L	Distancia entre dos sensores reflectivos.
z	Posición del proyectil ferromagnético dentro de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
z_i	Posición inicial del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia en el instante anterior a la realización de un disparo.
β	Espacios circulares rellenos de aire entre la superficie del proyectil ferromagnético y la cubierta ferromagnética de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
ε_C	Máxima energía capacitiva del sistema de almacenamiento de energía de un lanzador electromagnético.
ε_E	Energía eléctrica tomada del sistema de almacenamiento de energía para realizar un disparo con un acelerador de reluctancia.
ε_{EB}	Energía específica de una batería.
ε_{EC}	Energía eléctrica almacenada en un banco de capacitores.
ε_{EM}	Energía magnética almacenada en un inductor de almacenamiento.
ε_K	Energía cinética desarrollada por el proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
ε_L	Máxima energía inductiva en el sistema de almacenamiento de un lanzador electromagnético.
η	Eficiencia de conversión de un acelerador de reluctancia.
η_{esp}	Eficiencia de conversión esperada para un acelerador de reluctancia con una energía inicialmente almacenada en su sistema de almacenamiento dada.
η_{fb}	Eficiencia de un convertidor <i>flyback</i> .
μ_0	Permeabilidad magnética del vacío: $4\pi \times 10^{-7} TmA^{-1}$.
μ_r	Permeabilidad magnética relativa de cierto material.
ρ_B	Densidad de energía de una batería.
ρ_{Em}	Densidad de energía de un inductor de almacenamiento de energía.

ρ_p	Densidad de un proyectil de un acelerador de reluctancia.
ρ_w	Resistividad del alambre con el que está construida la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
ϕ_1 y ϕ_2	Flujos magnéticos transitorios en los inductores L_1 y L_2 de un <i>ringer</i> .
ϕ_e	Flujo magnético presente solo en la sección externa del núcleo de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
ϕ_i	Flujo magnético presente en la sección interna del núcleo de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
ϕ_j	Flujo magnético generado por la j-ésima sección de los devanados de una bobina de almacenamiento.
ϕ_k	Flujo magnético en la k-ésima sección del núcleo de una bobina de almacenamiento.
ϕ_{Lex}	Flujo magnético generado por los devanados externos de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
ϕ_{Lin}	Flujo magnético generado por los devanados internos de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
χ_p	Susceptibilidad magnética del proyectil ferromagnético de un acelerador de reluctancia.
ω_R	Frecuencia de oscilación de un <i>ringer</i> .
ℓ_L	Lagrangiano para describir el comportamiento eléctrico de los inductores de un acelerador de reluctancia.
\mathcal{L}_1 y \mathcal{L}_2	Lagrangianos para las etapas de operación 1 y 2 de un <i>ringer</i> .
\mathcal{L}_{LEM}	Lagrangiano de un lanzador electromagnético.
\mathcal{R}_{ex}	Reluctancia magnética de la sección externa de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
\mathcal{R}_{in}	Reluctancia magnética de la sección interna de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.
\mathcal{R}_K	Reluctancia magnética de la k-ésima sección del núcleo de una bobina de almacenamiento.

Lista de siglas y acrónimos empleados

ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno (del inglés <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>).
AWG	Calibre de alambre estadounidense (del inglés <i>American wire gauge</i>).
CA	Corriente alterna.
CD	Corriente directa.
DoD	Profundidad de descarga de una batería (del inglés <i>Depth of discharge</i>).
GPW	Pieza de alambre dada (del inglés <i>Given piece of wire</i>).
GTO	Tiristor apagado por compuerta (del inglés <i>Gate turn-off thyristor</i>).
ICCS	Técnica de conmutación de corriente inversa con dispositivos semiconductores (del inglés <i>Inverse current commutation with semiconductor devices</i>).
IGBT	Transistor bipolar de compuerta aislada (del inglés <i>Isulated gate bipolar transistor</i>).
IGCT	Tiristor controlado por compuerta integrada (del inglés <i>Integrated gate-commutated thyristor</i>).
LiFePO ₄	Fosfato de hierro de litio.
LLC	Circuito, o rama de un circuito, que contiene dos inductores (LL) y un capacitor (C).
MAGLEV	Transporte de levitación magnética (derivado del inglés <i>Magnetic levitation</i>).
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor (del inglés <i>Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor</i>).
MOV	Varistor de metal-óxido (del inglés <i>Metal-oxide varistor</i>).
NiCd	Aleación de níquel y cadmio.
NiMH	Níquel hidruro metálico.

PPS	Fuente de pulsos de potencia (del inglés <i>Power pulses source</i>).
PVC	Policloruro de vinilo (del inglés <i>Polyvinyl chloride</i>).
PWM	Modulación por ancho de pulsos (del inglés <i>Pulse width modulation</i>).
RLC	Circuito, o rama de un circuito, que contiene un resistor R, un inductor L y un capacitor C.
<i>STRETCH-Meatgrinder</i>	Transferencia lenta de energía a través de un Meatgrinder híbrido capacitivo (del inglés <i>Slow transfer of energy through capacitive hybrid meat grinder</i>).
SCR	Rectificador controlado de silicio (del inglés <i>Silicon-controlled rectifier</i>).
TVS	Supresores de voltajes transitorios (del inglés <i>Transient voltage suppressor</i>).
VRLA	Batería de plomo-acido regulada por válvula (del inglés <i>Valve-regulated lead-acid battery</i>).
ZCS	Conmutación a cero corriente (del inglés <i>Zero current switching</i>).
ZVS	Conmutación a cero voltaje (del inglés <i>Zero voltage switching</i>).

Capítulo 1

Introducción

En este trabajo de tesis se muestra el modelado, el diseño, y la construcción de un acelerador de reluctancia, un tipo de lanzador electromagnético, con características compatibles con las de una herramienta lanzadora de clavos.

Los lanzadores electromagnéticos tienen varias aplicaciones potenciales, entre las que se destacan las aplicaciones aeroespaciales [1]; el despegue asistido de aeronaves [2]; aplicaciones militares [3]; transporte de carga y personas [4]; investigación a hipervelocidades [5]; herramientas; y actuadores [6], en las que están sustituyendo, o probablemente lleguen a sustituir, a las tecnologías de propulsión dominantes en dichas aplicaciones en la actualidad. Se ha escogido trabajar con un lanzador electromagnético con características compatibles con las de una herramienta lanzadora de clavos, ya que las aplicaciones reportadas para lanzadores electromagnéticos predominantes en la literatura son principalmente de índole militar y/o requieren de lanzadores de grandes dimensiones, como es el caso de los lanzadores electromagnéticos requeridos para las aplicaciones de lanzamiento de cargas al espacio, y para el transporte terrestre de carga y de personas. Además de que en la literatura consultada solo se han encontrado dos ejemplos [7, 8] de lanzadores electromagnéticos con características expresamente compatibles con aplicaciones en herramientas.

En los siguientes párrafos se explicará de forma detallada por qué se eligió este tipo de lanzador para la aplicación seleccionada.

1.1 Los lanzadores electromagnéticos

Los lanzadores electromagnéticos son máquinas diseñadas para acelerar de forma controlada objetos macroscópicos, mediante la conversión de energía electromagnética en energía cinética. La mayoría de los lanzadores electromagnéticos reportados en la literatura pueden ser clasificados en tres grandes grupos: los cañones de riel, los aceleradores lineales, y los cañones de Gauss [9]. Con los cañones de riel, que impulsan a sus proyectiles mediante la fuerza de Lorentz ejercida sobre el proyectil, que básicamente actúa como un corto circuito entre dos rieles conductores energizados, se han conseguido las mayores velocidades, de hasta 5900 m/s, y actualmente predominan las aplicaciones de tipo militar para este tipo de lanzador con potencial para aplicaciones de lanzamiento de cargas al espacio [1]. Los aceleradores lineales, basados en motores lineales de inducción, se han caracterizado por propulsar objetos a velocidades bastante inferiores a 1 km/s, pero con masas en el orden de decenas de

toneladas [9], esta característica, junto con mejores posibilidades para su control, al compararlos con los otros lanzadores electromagnéticos, los ha convertido en las opciones adecuadas para impulsar a los trenes de levitación magnética (MAGLEV) [4] y en el probable reemplazo de los sistemas de lanzamiento basados en vapor para el despegue de aviones desde portaaviones [2]. Con el tercer grupo, los cañones de Gauss, cuyo funcionamiento se basa en la interacción del campo magnético en el interior de una bobina de lanzamiento estacionaria energizada por un pulso transitorio de corriente con su proyectil, las velocidades máximas alcanzadas han sido de hasta 1 km/s para proyectiles de 300 g [10].

De entre estas opciones se eligió al cañón de Gauss como la opción más adecuada para un diseño compatible con una herramienta lanzadora de clavos, porque presenta claras ventajas al compararlo con los otros tipos de lanzadores electromagnéticos: los cañones de riel son los lanzadores que necesitan de mayores corrientes para comenzar a acelerar un objeto determinado, de alrededor de 100 kA para los lanzadores más pequeños [11], por eso necesitan de un sistema de almacenamiento de energía mucho mayor [12], lo cual puede llegar a limitar su portabilidad, una característica fundamental para aplicaciones de herramientas manuales, también presentan niveles considerables de estrés mecánico y térmico en sus rieles y en sus proyectiles [1, 13] lo que implica la necesidad de brindarles mantenimiento con mayor frecuencia; los aceleradores lineales suelen tener una construcción más compleja que los demás tipos de lanzadores, lo que los hace más propensos a sufrir fallas [2]. En los cañones de Gauss de CA, aquellos en donde no se requiere que el proyectil sea energizado directamente, sino que se energiza mediante el campo magnético generado al interior de la bobina de lanzamiento [12], el estrés mecánico y térmico en la bobina de lanzamiento y su proyectil suele ser mínimo al compararlo con los cañones de riel; además, su construcción, aunque más compleja que la de un cañón de riel, es considerablemente más simple que la de un acelerador lineal.

Para este trabajo de tesis se descartó el uso de cañones de Gauss de CD, aquellos cuyos proyectiles son energizados mediante escobillas en contacto con una fuente de corriente [12], ya que pueden presentar los mismos problemas de estrés térmico y mecánico que un cañón de riel.

Los cañones de Gauss de CA pueden clasificarse en dos grupos principales: los cañones de Gauss de inducción, que aceleran a su proyectil mediante la interacción del campo magnético generado en el interior de su bobina de lanzamiento cuando es energizada con un pulso de corriente, con el campo magnético generado en el proyectil por las corrientes superficiales inducidas por la misma bobina de lanzamiento [5]; y los aceleradores de reluctancia que lanzan proyectiles fabricados con materiales ferromagnéticos. De entre los cañones de Gauss se eligió al acelerador de reluctancia, cuyo funcionamiento se detalla en los siguientes párrafos, como la opción adecuada para construir un lanzador con características compatibles con una aplicación de herramienta lanza clavos.

1.1.1 El acelerador de reluctancia

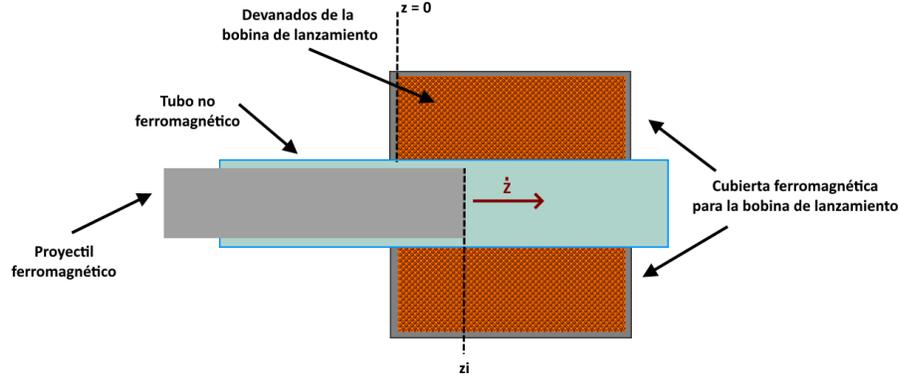


Figura 1.1: Vista esquemática simplificada de un acelerador de reluctancia. En este caso z denota la posición del proyectil ferromagnético dentro de la bobina y z_i la posición inicial del mismo en el instante anterior al disparo.

El acelerador de reluctancia es un cañón de Gauss que lanza proyectiles hechos de materiales ferromagnéticos cuando su bobina de lanzamiento es energizada con un pulso de corriente que, a su vez, genera un campo magnético transitorio en su interior que atrae al proyectil ferromagnético al centro de la bobina [14], posición donde la reluctancia magnética del sistema bobina-proyectil será la mínima para un flujo magnético dado [15].

La estructura básica de un acelerador de reluctancia puede verse en la [Figura 1.1](#), donde se muestra una cubierta ferromagnética rodeando los devanados de la bobina de lanzamiento, que contribuye a concentrar el flujo magnético al interior de la misma con el propósito de mejorar la eficiencia de conversión η del lanzador [16, 17], como puede verse en la [Figura 1.2](#) [18]. Se observa que las líneas de flujo magnético en la [Figura 1.2 \(b\)](#) están concentradas casi en su totalidad al interior del proyectil ferromagnético, la cubierta ferromagnética y al interior de los devanados de la bobina de lanzamiento, mientras en la [Figura 1.2 \(a\)](#) se observa que, en comparación, el flujo magnético al exterior de los devanados de la bobina de lanzamiento es mucho mayor.

La eficiencia de conversión η de un lanzador electromagnético es su figura de mérito más importante, ya que puede tomarse como una medida de su aprovechamiento de energía, y es el cociente de la energía cinética desarrollada por el proyectil al salir del estator del lanzador ε_K , que depende de la masa del proyectil m y su velocidad de salida U_{sal} , entre la energía eléctrica tomada de su sistema de almacenamiento denominada ε_E al realizar un disparo, como se muestra en la [Ecuación \(1.1\)](#).

$$\eta = \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_E} = \frac{mU_{sal}^2}{2\varepsilon_E} \quad (1.1)$$

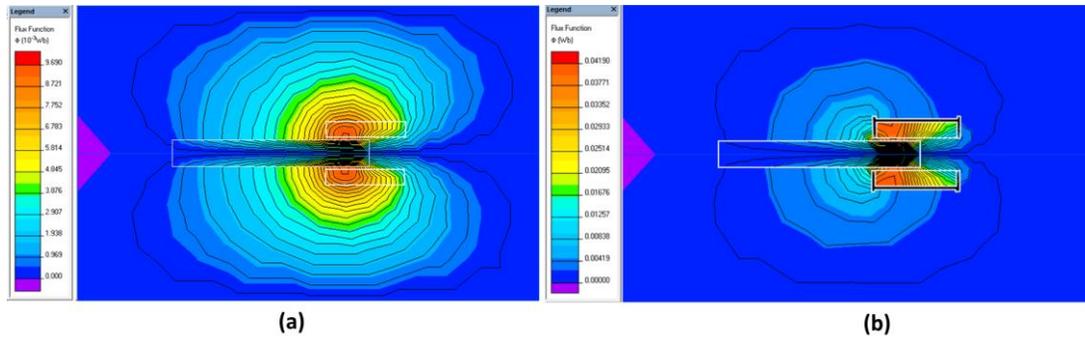


Figura 1.2: Resultado de simulaciones del campo magnético desarrollado por una bobina de lanzamiento energizada de un acelerador de reluctancia, interactuando con su proyectil [18]. En la imagen, el proyectil y los devanados de la bobina de lanzamiento pueden identificarse por su contorno blanco. (a) Líneas de flujo magnético en una bobina sin cubierta ferromagnética, (b) líneas de flujo magnético de una bobina con una cubierta ferromagnética insaturable con una permeabilidad magnética relativa μ_r de 5000.

Una característica inherente de los aceleradores de reluctancia es que presentan las eficiencias de conversión η más bajas entre los cañones de Gauss [15], usualmente muy por debajo del 5 % [14, 18, 19], mientras más baja sea la eficiencia de conversión mayor tendrá que ser la energía eléctrica suministrada y la energía inicialmente almacenada en el sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia, por lo que una eficiencia de conversión muy baja puede incidir negativamente en la portabilidad del lanzador. El comportamiento de la eficiencia de conversión depende de un gran número de variables físicas del lanzador, muchas de ellas compartiendo interrelaciones complejas y no lineales entre sí, lo que hace que su modelado y optimización sea una tarea más complicada que en otros tipos de lanzadores electromagnéticos [14, 20, 21] (probablemente se trata de un sistema no optimizable [22]) Para ciertas aplicaciones potenciales, como el caso del uso de este tipo de lanzador en una herramienta lanzadora de clavos, estas desventajas quedan compensadas por las ventajas que ofrece este tipo de lanzador: entre los cañones de Gauss son los que necesitan un pulso de corriente con la menor magnitud para empezar a acelerar a un objeto determinado, además su construcción es robusta y simple, lo que minimiza su índice de fallas y facilita su reparación [6, 19, 23], y los clavos comercialmente disponibles para una herramienta lanzadora de clavos están hechos con materiales ferromagnéticos.

1.2 Justificación

Debido a que la energía eléctrica es fácil de almacenar y generar, los aceleradores de reluctancia pueden convertirse en una alternativa a las tecnologías dominantes empleadas en las herramientas tipo pistolas de clavos, si pueden cumplir con las características de portabilidad y bajo consumo de energía.

Si se selecciona un conjunto de estrategias para la mejora del aprovechamiento de energía en un acelerador de reluctancias portátil para hacer una valoración de su impacto sobre su consumo de energía; en base a los resultados obtenidos puede

construirse un prototipo cuyas características de portabilidad y consumo de energía sean por lo menos similares a las de las herramientas disponibles en el mercado.

1.3 Planteamiento del problema de investigación

Los aceleradores de reluctancia tienen aplicaciones potenciales en herramientas que requieren generar movimiento lineal sobre un actuador, o disparar objetos hechos de materiales ferromagnéticos a gran velocidad (p. ej. martillos eléctricos y pistolas de clavos). Estas aplicaciones requieren lanzadores portátiles con bajo consumo de energía, para que sean alternativas atractivas a las tecnologías dominantes en la actualidad.

Por las diversas combinaciones de elementos de los prototipos presentados en la literatura, y por la naturaleza misma de este tipo de lanzadores electromagnéticos (su eficiencia de conversión inherentemente baja), no se ha encontrado ninguna propuesta que pueda ser utilizada para una aplicación práctica como herramienta. En los ejemplos brindados por la literatura, a este respecto, se encontraron dos limitaciones mayores que son comunes a todos los prototipos presentados:

1. **Consumo elevado de energía:** la eficiencia de conversión de este tipo de lanzadores depende de una serie de relaciones complejas e interdependientes entre sus componentes, lo que provoca que tengan una baja eficiencia de conversión al compararla con la de otros lanzadores electromagnéticos, y pueden hacer que una mejora significativa en esta figura de mérito llegue a ser una tarea muy compleja. Una eficiencia de conversión baja, debida a las dificultades que plantea la optimización del diseño de este tipo de lanzadores, hace que el lanzador requiera una gran cantidad de energía eléctrica para conseguir transmitirle una determinada energía cinética al proyectil, ya que la mayor parte de la energía tomada del sistema de almacenamiento de energía ϵ_E se disipará como calor en la resistencia de los devanados de su bobina de lanzamiento.
2. **Baja densidad de energía en su sistema de almacenamiento:** En los lanzadores electromagnéticos la energía necesaria para realizar un disparo está inicialmente contenida en un sistema de almacenamiento de energía, y en todos los aceleradores de reluctancia presentados en la literatura se emplearon sistemas de almacenamiento capacitivos. En los sistemas energizados por pulsos de alta potencia, que emplean bancos de capacitores como sistema de almacenamiento, estos representan la mayor contribución al peso y al volumen del sistema [24], lo que hace que resulte muy difícil fabricar un lanzador portátil de este tipo utilizando un sistema de almacenamiento puramente capacitivo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un acelerador de reluctancia portátil con un consumo de energía y una velocidad de salida del proyectil, comparables al de las herramientas lanzadoras de clavos disponibles comercialmente.

1.4.2 Objetivos particulares

- Definir una combinación de las características de los elementos de un acelerador de reluctancia que permitan construir un prototipo portátil.
- Desarrollar un modelo matemático que permita hacer estimaciones de la eficiencia de conversión para el prototipo portátil que se construirá.
- Probar sobre un prototipo provisional, y/o estimar mediante cálculos y simulaciones el efecto de diversas estrategias para la mejora del aprovechamiento de energía, con el fin de seleccionar las que permitan obtener un consumo de energía similar al de las herramientas disponibles en el mercado.
- Implementar un prototipo con las características de portabilidad y consumo de energía, similares a las de una pistola de clavos comercialmente disponible.
- Confirmar experimentalmente que el prototipo cumple con las características de portabilidad y aprovechamiento de energía, definidas durante el desarrollo de este trabajo.

1.5 Revisión del estado del arte

1.5.1 Determinación de la velocidad de salida de una herramienta lanzadora de clavos.

En una búsqueda en los manuales de usuario de varias herramientas lanzadoras de clavos comercialmente disponibles, no se encontró expresada de forma explícita la magnitud de este parámetro. Sin embargo, en estudios de casos clínicos sobre lesiones provocadas por este tipo de herramientas reportados en [25, 26] se determinó experimentalmente la velocidad de un modelo en concreto de este tipo de herramientas: la Craftsman/SEARS 351.183200, que utiliza un compresor de aire para propulsar los clavos. La prueba experimental se realizó con clavos con una longitud de 3 in (7.62 cm), y con masa de 64.7 granos (4.32 g), obteniéndose una velocidad de salida media de 105.5 ft/s (32.15 m/s). Es decir, una energía cinética de salida de 2.23 J. Los resultados experimentales parecen coincidir con el resultado de utilizar la [Ecuación \(1.2\)](#), tomada de [27], con los datos del modelo de lanzador de clavos empleado en los estudios de casos clínicos citados; donde a_p es el área transversal del clavo en in^2 que para el caso de un clavo de tres pulgadas son 1.4826 in^2 , P la presión ejercida sobre el proyectil en PSIG que para una Craftsman/SEARS 351.183200 son 7000 PSIG, l_c la longitud del cañón en ft que en una Craftsman/SEARS 351.183200 es de 1 ft, y m la masa del proyectil en lb que fue de $9.53 \times 10^{-3} \text{ lb}$. La velocidad de salida así estimada fue de 99.79 ft/s (30.42 m/s). Es decir, una energía cinética de salida de 2 J.

$$U_{sal} = \sqrt{\frac{2Pa_p l_c}{m}} \quad (1.2)$$

Finalmente, también se encontraron datos útiles en [28], donde se determinó experimentalmente la velocidad de salida de los clavos de 3 in (76.2 mm), de las mismas características que las de los reportados en los casos clínicos, lanzados por una herramienta lanzadora de clavos propulsada por cartuchos de gas, de la marca Paslode

obteniendo en un primer disparo una velocidad de 94 ft/s (28.65 m/s) y en un segundo disparo 113 ft/s (34.44 m/s). Y También se probó otra herramienta de clavos de la misma marca propulsada por compresor de aire, realizándose tres disparos con clavos de 3 in; los resultados fueron de 125 ft/s (38.1 m/s) para el primer disparo, 117 ft/s (35.66 m/s) para el segundo y 90 ft/s (27.43 m/s) para el tercero.

Con los datos de estas siete estimaciones para la velocidad de salida de una herramienta lanzadora de clavos, lanzando clavos de 3 in, se determinó una velocidad de salida media de 32.41 m/s, por lo que se determinó que la velocidad objetivo sería de 35 m/s, lanzando proyectiles con características similares a las de los clavos de 3 in. Los datos obtenidos se muestran en la [Figura 1.3](#).

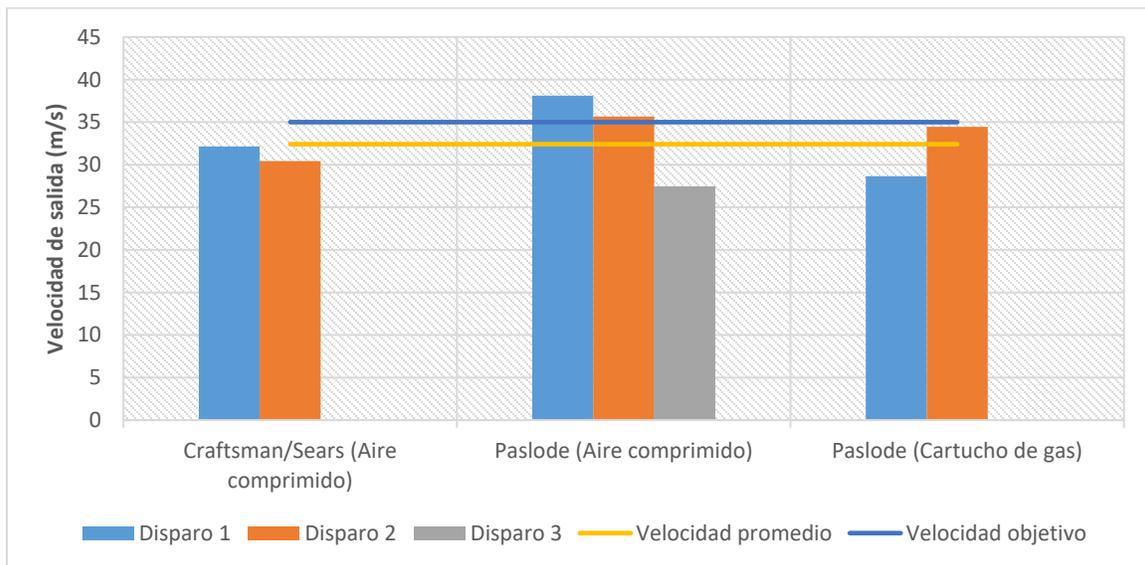


Figura 1.3: Velocidades de salida de herramientas lanzadoras de clavos comercialmente disponibles y velocidad de salida propuesta para el prototipo a construir.

1.5.2 Revisión de las eficiencias de conversión de los aceleradores de reluctancia reportadas en la literatura.

Al hacer una revisión de la literatura se encontraron datos representativos para las eficiencias de conversión η de 38 aceleradores de reluctancia, como se muestra en la [Tabla A.I](#) en la sección *Anexo A* de este trabajo de tesis. Se tomaron como datos útiles los obtenidos a partir de los lanzadores que cumplían con los siguientes criterios sobre la forma y composición de sus proyectiles, que se consideraron compatibles con las características presentadas por los clavos lanzados por una herramienta lanzadora de clavos:

- Que los proyectiles hubieran sido fabricados con hierro o acero.
- Que los proyectiles tuvieran una forma aproximadamente cilíndrica.
- Que los proyectiles no fueran ahuecados (no presentaran una forma tubular).

- Que los proyectiles no presentaran adiciones estructurales para modificar su aerodinámica.

Se consideró irrelevante el hecho de que los proyectiles presentaran muescas en su contorno, o que estuvieran fabricados con materiales laminados. Esto usualmente se hace con el propósito de eliminar el efecto de las corrientes superficiales inducidas sobre el proyectil que, en teoría, tenderían a disminuir su eficiencia de conversión η [29], pero en la práctica, no se ha observado una diferencia significativa en la eficiencia de conversión entre el uso de proyectiles laminados o con muescas en su contorno, y proyectiles hechos con una sola pieza de material ferromagnético con su contorno continuo [22]; y tampoco se ha visto una diferencia discernible entre las predicciones sobre la velocidad de salida U_{sal} hechas por un modelo que no toma en cuenta el efecto de las corrientes superficiales inducidas sobre la superficie del proyectil, con los datos experimentales obtenidos de los disparos hechos por un lanzador que acelera proyectiles sin muescas elaborados en una sola pieza de material ferromagnético [14, 30-32].

Se excluyeron los datos obtenidos en 6 disparos: del Disparo 2, reportados en [6], porque el proyectil estaba fabricado de ferrita; del Disparo 5, reportados en [23], porque el proyectil estaba dotado de aletas; del Disparo 17, reportados en [33], porque el proyectil tenía forma esférica; del Disparo 27, reportados en [34], porque el proyectil tenía forma tubular; de los Disparos 28 y 29, reportados en [22], porque los proyectiles estaban fabricados con Permendur. Al final se obtuvieron datos útiles de 32 disparos.

La eficiencia de conversión η promedio obtenida de los datos útiles fue del 3.00% con una mediana de 1.89%.

Hasta el momento, se ha trabajado con la hipótesis de que la eficiencia de conversión η no está correlacionada con el nivel de energía eléctrica tomada del sistema de almacenamiento del lanzador en cada disparo ϵ_E . Bajo esa premisa se decidió encontrar una relación lineal entre ϵ_E y ϵ_K , para obtener un valor estimado de la energía eléctrica necesaria para desarrollar la energía cinética requerida por el objetivo general de este trabajo de tesis. Para ello se graficaron 17 disparos seleccionados de la [Tabla A.I](#), ya que se decidió utilizar un solo nivel de ϵ_E por referencia y, en caso que se repitieran valores, si el valor se repetía dos veces se seleccionaba al disparo que hubiera desarrollado una energía cinética ϵ_K mayor en su proyectil, en caso de que se presentaran tres o más repeticiones del mismo valor de ϵ_E , se eligió al disparo cuya energía cinética tuviera el valor más acercado al de la mediana para ese grupo de disparos. También se decidió excluir los disparos provenientes de los disparos donde se hubiera empleado un IGBT para interrumpir el pulso de corriente antes de que el proyectil terminara de salir de la bobina de lanzamiento. Los resultados de este ejercicio pueden verse en la [Figura 1.4](#).

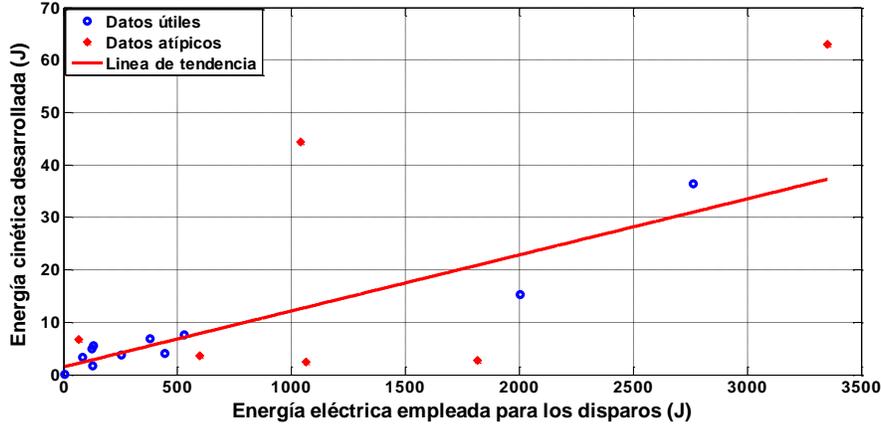


Figura 1.4: Comportamiento de la energía cinética ε_K desarrollada por el proyectil con respecto al valor de la energía eléctrica tomada del sistema de almacenamiento ε_E para cada disparo, proveniente de datos tomados de la Tabla A.I.

De este conjunto de datos se obtuvo una relación lineal con un coeficiente de determinación, antes de hacer la ponderación de las observaciones, R^2 de 0.8938, lo que indica que existe una correlación lineal fuerte entre la energía cinética desarrollada por el proyectil ε_K y la energía eléctrica tomada para realizar cada disparo ε_E , aunque debe tenerse muy en cuenta el efecto de la escasez de datos para niveles de energía ε_E en el intervalo que va de los 675 J a los 3351 J. En este caso se la relación obtenida fue

$$\varepsilon_K = 10.68 \times 10^{-3} \varepsilon_E + 1.488 \quad (1.3)$$

Los datos graficados sugieren que conforme los niveles de ε_E requeridos por cada disparo son más bajos, es más sencillo construir un acelerador de reluctancia con una eficiencia de conversión relativamente η alta, ya que la expresión deducida al sustituir la expresión obtenida para la ε_K en la [Ecuación \(1.3\)](#) en la [Ecuación \(1.1\)](#) se obtiene la expresión

$$\eta = 10.68 \times 10^{-3} + \frac{1.488}{\varepsilon_E} | \varepsilon_E > 1.05 \text{ J} \quad (1.4)$$

que indica que la eficiencia de conversión η sí es sensible al valor de ε_E , pero su impacto sobre η se va reduciendo conforme ε_E aumenta su magnitud, debe tomarse en cuenta que para la [Ecuación \(1.4\)](#) la energía eléctrica tomada del sistema de almacenamiento para realizar un disparo ε_E debe ser mayor a 1.05 J, ya que el valor de la eficiencia de conversión η siempre debe ser menor a 1.

Se dispone de un conjunto muy limitado de datos para corroborar esta hipótesis, pero si se grafican los todos los datos mostrados en la [Tabla A.I](#) se observa que las mayores eficiencias de conversión se presentaron para los niveles de ε_E más bajos, como se muestra en la [Figura 1.5](#).

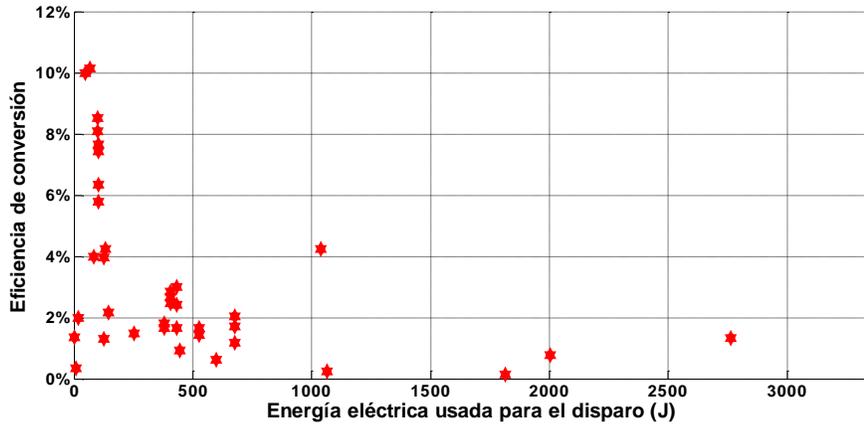


Figura 1.5: Comportamiento de la eficiencia de conversión η con respecto a la energía eléctrica empleada para cada disparo con datos tomados de la [Tabla A.I](#).

1.6 Conclusiones del estado del arte

- Para el cumplimiento del objetivo general se determinó que acelerador de reluctancia desarrollado para este trabajo de tesis debe ser capaz de lanzar proyectiles contruidos con hierro o acero y con características similares a las de un clavo de tres pulgadas, dichas características se muestran en la [Tabla 1.I](#)

Tabla 1.I: Características requeridas para el proyectil.

Variable	Abreviatura	Rango de magnitudes
Longitud del proyectil	p	$70 \text{ mm} < p < 80 \text{ mm}$
Masa del proyectil	m	$4 \text{ g} < m < 5 \text{ g}$
Diámetro del proyectil	d	$3 \text{ mm} < d < 4 \text{ mm}$

- Se ha decidido que la velocidad de salida del proyectil, requerida para cumplir con el objetivo general de este trabajo de tesis es de $\approx 35 \text{ m/s}$.
- A partir de los datos encontrados en la literatura, registrados en la [Tabla A.I](#) del anexo A de este trabajo de tesis. Se han considerado tres criterios para determinar el valor de la eficiencia de conversión η mínima deseable: que se supere a la eficiencia de conversión promedio que tuvo un valor del 3.00%; que se supere a la mediana de la eficiencia de conversión que tuvo un valor del 1.89%; o que se supere la eficiencia de conversión esperada para un acelerador de reluctancia con una energía cinética ϵ_K de 3.0625 J (la energía cinética que desarrollará un proyectil de 5 g lanzado a 35 m/s), empleando la ecuación (4) la cual tuvo un valor del 2.08%. Se decidió utilizar el valor más alto como eficiencia de conversión objetivo, es decir, $\eta = 3\%$.

1.7 Estructura del documento

Este trabajo de tesis se divide en seis capítulos, a continuación se describe el contenido de dichos capítulos:

Capítulo 1: Se da una breve introducción para describir qué es un lanzador electromagnético, qué es un acelerador de reluctancia, y por qué se eligió a este lanzador electromagnético como objeto de estudio para este trabajo de tesis. También se describió la problemática a resolver con este trabajo de tesis y su justificación, y se plantearon los objetivos propuestos para este trabajo. Finalmente evaluó en el estado del arte las características que debía tener el lanzador construido para cumplir con los objetivos propuestos.

Capítulo 2: Se caracteriza al acelerador de reluctancia como un sistema energizado por pulsos de alta potencia para identificar, a partir de este enfoque, qué las características de cada componente que pueden incidir en su eficiencia de conversión η y en su portabilidad, características indispensables a tomar en cuenta para un lanzador con una aplicación como herramienta. Y se mencionan las razones por las que se seleccionó la combinación de componentes y/o dispositivos empleados en el prototipo desarrollado.

Capítulo 3: Se muestra la construcción y el modelo matemático empleado para describir el comportamiento de la bobina de lanzamiento desarrollada para el prototipo.

Capítulo 4: Se muestra el proceso de diseño y las características relevantes del prototipo desarrollado.

Capítulo 5: Se muestran los resultados experimentales obtenidos con el prototipo desarrollado y se comparan con las simulaciones hechas con el modelo matemático desarrollado.

Capítulo 6: Se muestran las conclusiones de este trabajo de tesis y, en base a la experiencia adquirida durante el mismo, se proponen trabajos futuros con aceleradores de reluctancia y modelos lagrangianos para lanzadores electromagnéticos y otros sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia.

Capítulo 2

El acelerador de reluctancia: un sistema energizado por pulsos de alta potencia.

Un acelerador de reluctancia, como cualquier otro tipo de lanzador electromagnético, puede verse como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia, es decir, presenta las siguientes características: tiene un arreglo que le permite almacenar energía durante un periodo de tiempo relativamente largo, cuando el nivel de carga de dicho arreglo llega al nivel deseado, ocurre un evento de disparo que libera la energía almacenada en forma de un pulso o tren periódico de pulsos de corriente o de voltaje de gran magnitud en un tiempo relativamente corto sobre una carga [24], como se muestra en la [Figura 2.1](#). En este caso la carga es la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia, que es energizada por un pulso de corriente transitorio cuya magnitud generalmente está en o sobre el rango de los kA.

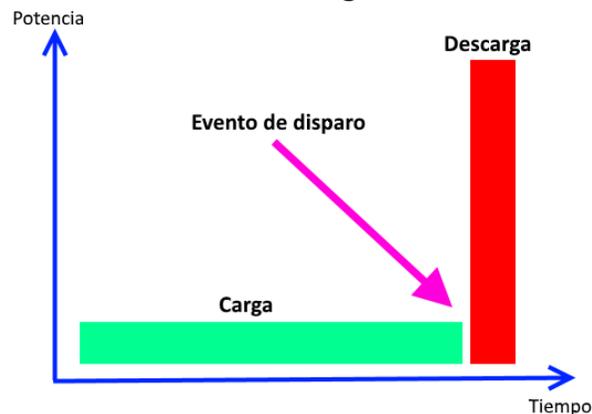


Figura 2.1: Funcionamiento de un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia [24].

Como todo sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia, los aceleradores de reluctancia están constituidos por los siguientes elementos:

1. Una fuente de suministro de energía.
2. Un sistema de almacenamiento de energía.
3. Interruptores capaces de entregar la energía previamente almacenada a la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia, en la forma de un pulso de corriente.
4. Conductores y dispositivos semiconductores con las características adecuadas para conformar y dar la forma deseada al pulso de corriente con las

características deseadas, a la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia

2.1 Elementos que actúan durante la etapa de carga de un acelerador de reluctancia

Durante la etapa de carga de un acelerador de reluctancia, la fuente de suministro de energía eléctrica se encarga de proporcionar la energía requerida para realizar uno o varios disparos, que estará disponible en el sistema de almacenamiento de energía, para posteriormente ser descargada sobre la bobina de lanzamiento.

Generalmente, la fuente de energía eléctrica y el sistema de almacenamiento de energía se consideran dos sistemas separados, ya que tienen características, requerimientos y objetivos diferentes: la fuente de energía cargará al sistema de almacenamiento durante un periodo de tiempo relativamente largo, y debe tener una densidad de energía lo suficientemente alta para proporcionar la energía necesaria para realizar la cantidad de disparos requerida por el diseño, usualmente con una potencia de carga relativamente baja comparada con la potencia instantánea que se desarrollará durante el disparo. En tanto que los sistemas de almacenamiento de energía, con un volumen que permita su portabilidad, deben permitir una descarga de energía rápida, es decir, deben tener una densidad de potencia alta para poder suministrar los pulsos de corriente con los valores elevados de potencia instantánea pico a la bobina del cañón requeridos para propulsar al proyectil ferromagnético.

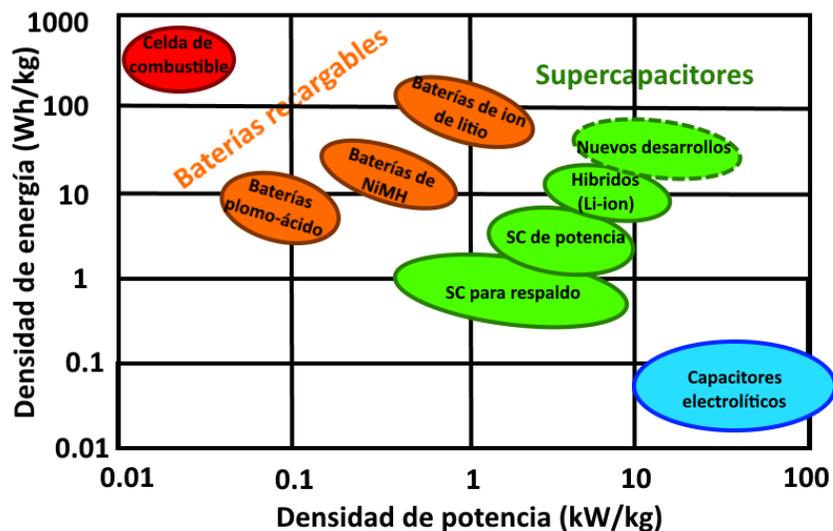


Figura 2.2: Relación entre la densidad de energía y la densidad de potencia de diversos dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica [35].

En la [Figura 2.2](#) [35] puede verse un diagrama de Ragone que muestra la relación entre la densidad de energía y la densidad de potencia de diversos dispositivos de

almacenamiento de energía eléctrica que podrían utilizarse como fuentes de suministro de energía eléctrica o como elementos del sistema de almacenamiento de energía.

2.1.1 La fuente de suministro de energía para un acelerador de reluctancia

De acuerdo a la literatura consultada se han desarrollado una gran cantidad de fuentes de energía eléctrica para cargar al sistema de almacenamiento de lanzadores electromagnéticos, todas basadas en una fuente de CD, a excepción del lanzador reportado en [36]. La mayoría de las fuentes de suministro de energía eléctrica para lanzadores electromagnéticos reportados en la literatura están basadas en bancos de baterías [24, 37-39] ya que, por la naturaleza de sus aplicaciones potenciales, una de las características deseables de los lanzadores electromagnéticos es la portabilidad [40], sobre todo en lanzadores con características compatibles con la aplicación de herramienta manual como el que se ha desarrollado en este trabajo de tesis.

En la literatura se han encontrado otras posibles fuentes de suministro de energía eléctrica portátiles para un acelerador de reluctancia. Los supercapacitores presentan ciertas ventajas sobre las baterías si se usan como una fuente de suministro para un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia, ya que resisten muy bien corrientes de cortocircuito del orden de los kA, su tiempo de vida no se ve acortado si se utilizan hasta descargarse a niveles muy bajos de tensión, y tienen resistencias en serie equivalentes muy bajas (en el orden de las décimas de $m\Omega$) si se comparan con la de las baterías recargables (en el orden de las decenas de $m\Omega$) [35], sin embargo su densidad de energía puede ser de uno o dos órdenes de magnitud menor que la de una batería recargable [35], y el costo por kWh almacenado de energía es alrededor de 41 veces mayor para un supercapacitor si se compara con las baterías de iones de litio, de cerca de \$10000 USD por kWh para los supercapacitores y \$240 USD por kWh para las baterías de iones de litio [41]. En cuanto a las fuentes de suministro de energía basadas en celdas de combustible de hidrógeno, los desarrollos son prometedores en cuanto a la densidad de energía, aunque la tecnología aún no está madura para aplicaciones portátiles [42].

Otras opciones que son transportables, pero que no cumplen con la característica de portabilidad impuesta por una aplicación en una herramienta manual, son los generadores de pulsos homopolares y los alternadores de pulsos [21, 40, 43, 44], a partir de estos últimos, en la actualidad se están desarrollando dispositivos capaces de actuar, a la vez, como fuentes de energía y sistemas de almacenamiento [40, 45].

Por lo anterior se determinó que la fuente de energía apropiada para esta aplicación tuviera como base a un banco de baterías. Los bancos de baterías más reportados en la literatura consultada para suministrar de energía eléctrica a varios tipos de lanzadores electromagnéticos fueron los compuestos por baterías de iones de litio [46] y de plomo-ácido [47, 48]. Estas se consideraron como las opciones más apropiadas de entre las baterías recargables para suministrar de energía al sistema,

porque el otro gran grupo de baterías recargables, las que están fabricadas a base de níquel (NiCd NiMH), ya están siendo desplazadas por las baterías de litio y plomo-ácido por razones ambientales y de costo [49].

En la literatura no se encontró una justificación explícita a la elección de uno u otro tipo de baterías, pero se sabe que el costo de las baterías de plomo ácido por kWh es considerablemente menor al de cualquier tecnología de iones de litio [49] y que todas las tecnologías de baterías de iones de litio tienen una menor resistencia interna, una menor corriente de autodescarga y una vida útil considerablemente mayor a las baterías de plomo-ácido [50]. Dichas características de las baterías de iones de litio pueden suponer un mejor aprovechamiento de energía, aunque el costo de las baterías de plomo-ácido siga siendo considerablemente menor.

En la [Tabla 2.I](#) se muestra una comparativa entre valores típicos presentes en las baterías de plomo ácido tipo VRLA (que son las apropiadas para aplicaciones portátiles ya que no requieren ser colocadas en una orientación específica, ni existe el riesgo de fuga del electrolito) y las baterías de iones de litio con cátodos de óxidos metálicos (con diversas combinaciones de níquel, cobalto, manganeso y aluminio), ya que estas últimas tienen una densidad de energía considerablemente mayor que las baterías de iones de litio con cátodos de fosfato de hierro litio (LiFePO_4) [49].

Tabla 2.I: Comparativa entre algunos de los parámetros de las baterías de plomo-ácido tipo VRLA y los de iones de litio con cátodos de óxidos metálicos.

	Baterías plomo-ácido VRLA	Baterías de iones de litio
Costo por kWh (en USD)	\$ 120 [49]	\$ 240 [41]
Voltaje nominal por celda	2 V [51]	3.6-3.7 V [41, 49]
Resistencia en serie equivalente	~20 mΩ	~10 mΩ [51]
Densidad gravimétrica de energía	30-40 Wh/kg [49, 51]	100-300 Wh/kg [41, 52]
Densidad volumétrica de energía	100 Wh/L [49]	180-693 Wh/L [41, 49, 53]
Número de ciclos de vida	800-1000 [50, 51]	1000-1900 [49, 51]
Ventana de estado de carga	50% [49, 51]	80% [49, 51]
Voltaje en la celda totalmente descargada	1.7 V [54]	2.75 V [54]
Autodescarga	~2% por día [51]	~10% por mes [51]

En la [Tabla 2.I](#) se observa que la ventana de estado de carga es del 80% de profundidad de descarga DoD (del inglés *Depth of Discharge*) de la batería de iones de

litio, y del 50% para las baterías plomo ácido VRLA, lo que en esencia quiere decir que la batería de iones de litio puede descargarse un 80% de su capacidad sin afectar considerablemente su número de ciclos de vida, mientras que para la batería plomo-ácido esta ventana es de solo el 50% de DoD. Esto hace que la energía disponible para un sistema alimentado por un banco de baterías de iones de litio con determinado volumen sea aún mayor que el de uno alimentado por baterías de plomo-ácido con el mismo volumen, de lo que los datos sobre su densidad de energía podrían sugerir [51], haciendo que la portabilidad del sistema sea más fácil de alcanzar con un banco de baterías de iones de litio que con un banco de baterías de plomo-ácido. Teniendo en cuenta los datos plasmados en la [Tabla 2.1](#), se decidió que los dispositivos de suministro de energía primarios más adecuados para un acelerador de reluctancia, con características compatibles con aplicaciones en herramientas manuales lanzadoras de clavos, son los bancos de baterías de iones de litio con cátodos de óxidos metálicos.

2.1.2 El circuito elevador de tensión de la fuente de suministro de energía

Para producir el pulso de corriente de la magnitud necesaria para energizar a la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia, usualmente se necesitan fuentes de suministro de energía eléctrica capaces de suministrar al sistema de almacenamiento de energía tensiones eléctricas en el orden de los cientos de volts o de los kV. Si solo se usan diversas interconexiones de las terminales de las baterías como fuentes de tensión, los bancos resultantes pueden llegar a ser muy grandes, limitando la portabilidad del sistema (se necesitaría un banco de 136 celdas de iones de litio para generar un voltaje de 500 V). Por esta razón se consideró necesario incluir una etapa elevadora de tensión en la fuente de suministro de energía eléctrica.

Una de las configuraciones elevadoras de tensión reportados en la literatura, para funcionar como un sistema de carga para un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia, fueron las basadas en generadores Marx [55-57], que puede verse en la [Figura 2.3](#). Estos, en su forma más básica, consisten en un conjunto de nc bancos de capacitores con la misma capacitancia C que son cargados en paralelo a través de los resistores R_i y R_c por una fuente de tensión de CD V_i , para posteriormente ser conectados en serie, con una capacitancia equivalente de C/nc cuando se activan simultáneamente los interruptores S , para posteriormente ser descargados sobre la carga con una tensión con magnitud ncV_i [55, 58]. De entrada se ha descartado el uso de este tipo de topología elevadora de tensión porque el volumen de los nc bancos de capacitores necesarios para obtener a la tensión requerida por la aplicación, junto con la circuitería asociada puede llegar a ser incompatible con la característica de portabilidad deseada.

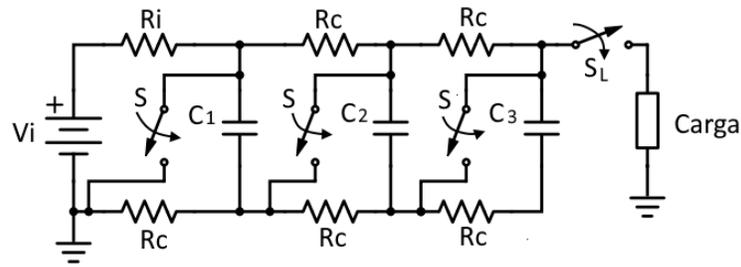


Figura 2.3: Generador Marx con tres etapas, donde la tensión aplicada a la carga será $3V_i$.

En la literatura se encontraron algunas configuraciones para emplearse como circuitos elevadores de tensión en fuentes de suministro de energía para diversos tipos de lanzadores electromagnéticos que emplean bancos de capacitores como sistemas de almacenamiento de energía, principalmente cañones de riel, con miras a aplicaciones militares y espaciales que requieren que la carga del sistema de almacenamiento sea rápida y que manejen una salida del orden de los kV [59-61]. Para este tipo de aplicaciones, por lo general, se utilizan inversores tipo puente completo como elevadores de tensión, porque son los circuitos elevadores de tensión con la mayor densidad de potencia [59]. La configuración más elemental para esta configuración con una aplicación práctica encontrada en la literatura [59], puede verse en la [Figura 2.4](#). Puede lograrse que esta configuración funcione en condiciones ZVS o ZCS en el primario, para aumentar la eficiencia total del sistema disminuyendo las pérdidas por conmutación, ajustando los valores de los componentes empleados con respecto al banco de capacitores, y también puede mejorarse la eficiencia al utilizar redes *snubbers* capacitivas en conjunción con los interruptores de conmutación del puente H durante el apagado de los mismos para lograr la condición ZVS [62]. Una desventaja que presentan estos elevadores de tensión de puente completo es que al inicio de la carga se puede llegar a tener un corto circuito en el secundario que puede hacer que el núcleo magnético del transformador elevador llegue a saturarse, por lo que pueden llegar a requerirse estrategias para la desmagnetización del núcleo [62].

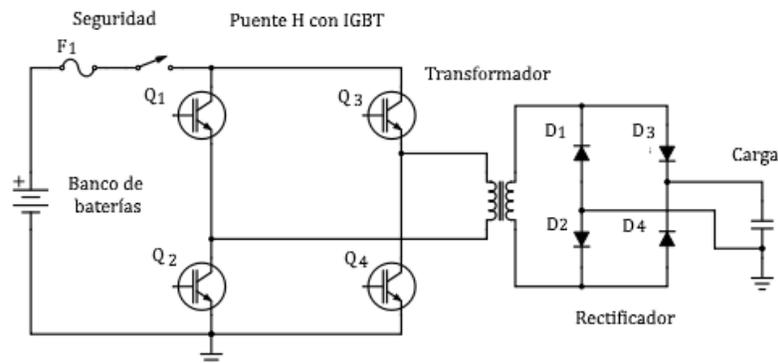


Figura 2.4: Circuito de un cargador de un elevador de tensión, basado en un convertidor puente completo, para un lanzador electromagnético ideado para aplicaciones militares, donde el sistema de almacenamiento que se está cargando es el banco de capacitores designado como *Carga* [59].

Una versión de los circuitos puente completo como elevadores de tensión, para un lanzador electromagnético, encontrada en la literatura con características compatibles con aplicaciones militares y espaciales, consiste en hacer que el convertidor sea resonante, con lo que disminuyen las pérdidas por conmutación y puede aumentarse la frecuencia de operación del circuito, lo que a su vez aumenta la eficiencia y mejora el aprovechamiento de la energía proveniente del banco de baterías [60]. En la literatura se encontraron tres configuraciones resonantes: la configuración en serie mostrada en la [Figura 2.5](#) [60-62], que tiene un capacitor y un inductor resonantes conectados en serie, una de sus desventajas es que por sí sola no ofrece una protección frente a cortocircuitos. Otra configuración resonante encontrada en la literatura para un elevador de tensión tipo convertidor puente completo, es la configuración en paralelo, donde el capacitor resonante se conecta en paralelo con el devanado primario del transformador elevador, como se muestra en la [Figura 2.6](#). Con esta configuración pueden reducirse las pérdidas de conmutación hasta en un 82% [60], si se comparan con las de la configuración mostrada en la [Figura 2.4](#).

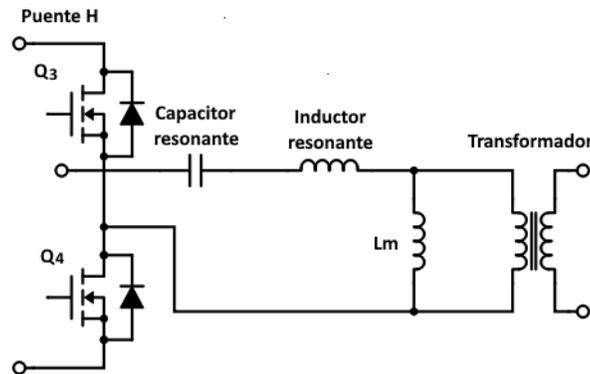


Figura 2.5: Detalle de circuito elevador de tensión de puente completo resonante en serie. En este circuito Q_3 y Q_4 son transistores de la parte derecha del puente H y L_m es la inductancia magnetizante del transformador elevador.

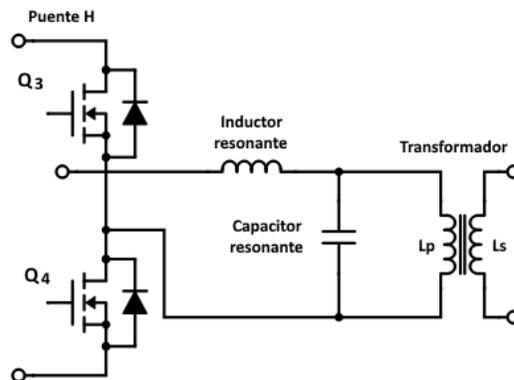


Figura 2.6: Detalle de un circuito elevador de tensión de puente completo resonante en paralelo. En este diagrama Q_3 y Q_4 son los transistores de la parte derecha del puente H, y L_p y L_s son las inductancias equivalentes del devanado primario y del devanado secundario del transformador elevador respectivamente.

Otra configuración resonante de un circuito elevador resonante, tipo puente completo, es la topología LLC [60], que es una variante del circuito resonante en serie, pero hace uso de las inductancias magnetizante L_m y de dispersión L_d del transformador elevador, en lugar de un conjunto de inductores resonantes adicionales, como se muestra en la [Figura 2.7](#), esta topología puede disminuir, si se le compara con la topología de la [Figura 2.4](#), hasta en un 86% las pérdidas de conmutación, de esta configuración existe una versión en medio puente llamada *Flyback híbrido resonante* que al igual que la topología LLC se beneficia del reciclaje de energía en los elementos parásitos más importantes en un transformador o par de inductores magnéticamente acoplados [63]. Todas las topologías resonantes son más eficientes que la topología mostrada [Figura 2.4](#), pero su control y construcción se hacen considerablemente más complicados.

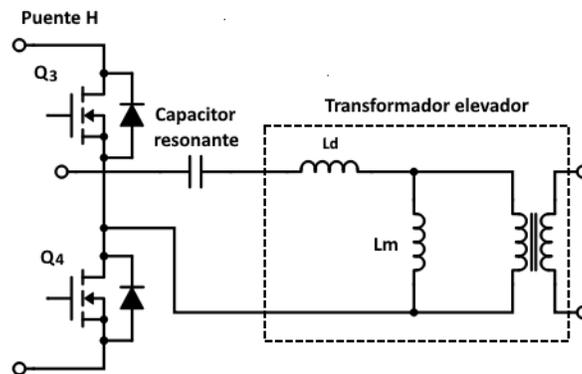


Figura 2.7: Detalle de un circuito elevador de tensión de puente completo resonante LLC. En este diagrama Q_3 y Q_4 son los transistores de la parte derecha del puente H, y L_d y L_m son las inductancias de dispersión y magnetizante del transformador elevador respectivamente.

En la literatura también se encontraron circuitos elevadores de medio puente para lanzadores electromagnéticos [62, 64, 65], estas topologías suelen destacar por su relativa simplicidad y robustez. En la [Figura 2.8](#) se muestra la topología elevadora medio puente resonante mostrada en las referencias [62, 64, 66], en ella el tanque resonante está integrado por C_{K1} y C_{K2} , y por el inductor resonante consta de las inductancias en serie con el transformador L_K , incluyendo entre estas a su propia inductancia de dispersión L_d , el efecto de capacitancia del banco de capacitores que se está cargando en la aplicación mostrada en la [Figura 2.8](#) es despreciable en la resonancia del circuito porque es muy grande comparada con los valores de C_{K1} y C_{K2} . Este circuito actúa como fuente de corriente, y la corriente de carga tiene un valor promedio constante y la tensión crece de manera lineal, esta característica hace que a niveles bajos de voltaje tenga una potencia de carga menor que un convertidor de puente completo.

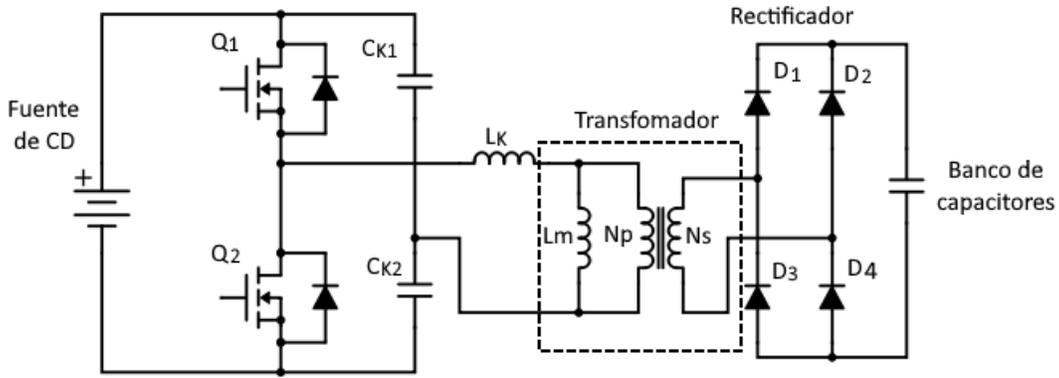


Figura 2.8: Convertidor elevador resonante de medio puente, en este caso empleado para cargar a un banco de capacitores [62].

Una configuración elevadora mostrada en [62], utilizada para la carga del sistema de almacenamiento de sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia, fue el *flyback* de conmutación dual, mostrado en la [Figura 2.9](#). Esta configuración reduce las pérdidas por transitorios comparada con un *flyback* común, y evita la sobrecorriente en el primario durante la etapa inicial de carga si el sistema de almacenamiento utilizado emplea un banco de capacitores, y permite disminuir el tamaño de los inductores acoplados, con respecto a las dos topologías mostradas anteriormente. Sus pérdidas durante el apagado son considerablemente mayores que durante el encendido, por lo que es muy recomendable emplear redes *snubber* para lograr una condiciones ZVS y ZCS durante el apagado.

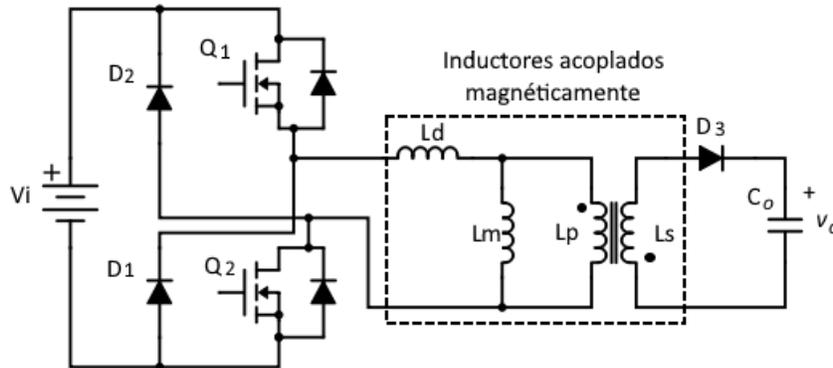


Figura 2.9: *Flyback* de conmutación dual que carga, a partir de una fuente de alimentación V_i a un banco de capacitores C_o hasta una tensión v_o . En el diagrama esquemático L_m es la inductancia magnetizante, L_d la inductancia de dispersión, L_p es la inductancia del devanado primario y L_s es la inductancia del devanado del secundario del par de inductores magnéticamente acoplados del *flyback*

En la literatura se encontraron algunas topologías elevadoras para sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia, y aplicables a lanzadores con un solo interruptor, estas topologías suelen destacar por la facilidad de su control y una cantidad de componentes mínima. Una de las configuraciones encontradas fue la de un elevador tipo *buck-boost* que en [67] se construyó utilizando IGCTs como dispositivos de conmutación, como puede verse en la [Figura 2.10](#). Pese a que en la [Figura 2.10](#) se

observan a dos IGCTs conectados en serie, estos actúan como un solo interruptor encendiéndose u apagándose a la vez, lo que sirve para distribuir el voltaje entre ellos. El principio de operación de este circuito es el típico de los convertidores *buck-boost*, en este circuito el capacitor C_g se encarga de eliminar las fluctuaciones en la tensión de salida de la fuente VCD, L_a y D_1 son el inductor encargado de almacenar energía en forma de campo magnético y el diodo de bloqueo típicos de un convertidor *buck-boost* respectivamente. El autor de dicha referencia señala que este tipo de convertidores, con el uso de IGCTs permite obtener una carga rápida de un banco de capacitores, al igual que las topologías elevadoras de medio puente y puente completo como las que se mostraron anteriormente pero reduciendo el volumen del componente magnético, en este caso un solo inductor. El autor prevé una reducción considerable de la vida útil del banco de capacitores a cargar, debidas al hecho de que esta topología requiere que por él circulen pulsos de corriente de magnitud elevada, presenta una potencia de carga relativamente alta, un problema que también se presenta con los elevadores de medio puente y puente completo con miras a aplicaciones militares y espaciales, como los que se han descrito con anterioridad.

Las ventajas que existen si se emplean IGCTs en este tipo de topología es que, al compararlos con otros tiristores, presentan pérdidas de conmutación durante el encendido muy bajas, con la capacidad característica de los tiristores de manejar corrientes de grandes magnitudes. Aunque en una aplicación de herramienta manual no se necesitan emplear densidades de potencia de carga como las manejadas por este tipo de dispositivo de conmutación, y los IGCTs con sus circuitos de accionamiento de compuerta integrados en su paquete pueden llegar a ser muy voluminosos para una aplicación portátil [68].

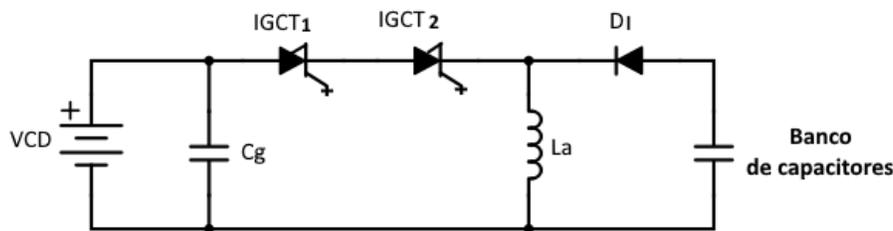


Figura 2.10: Circuito elevador *buck-boost* con dos IGCTs como dispositivos de conmutación presentado en [67] como un circuito de carga rápida para un banco de capacitores.

Otra topología elevadora de un solo dispositivo de conmutación mencionada en la literatura, como una topología elevadora aplicada específicamente a un acelerador de reluctancia, es el convertidor tipo *boost* [18, 69], que se muestra en la [Figura 2.11](#). Estos convertidores tienen una construcción simple, y en la literatura se han encontrado sistemas de control muy simples basados en el C.I. temporizador 555 [69] y en microcontroladores [18] para regular el ciclo de trabajo de la señal de control de su dispositivo de conmutación Q_1 , ya que su voltaje de salida es inversamente proporcional al ciclo de trabajo de los pulsos de control del dispositivo de conmutación.

La corriente de irrupción en el capacitor, la que se presenta antes de que esté plenamente cargado al voltaje de salida nominal, puede ser muy alta y es un detalle que debe tenerse en consideración [70].

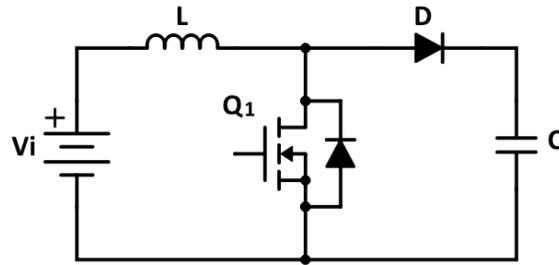


Figura 2.11: Convertidor boost empleado como elevador de tensión para la carga de un banco de capacitores C

Para la carga de sistemas de almacenamiento de sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia, también se ha reportado una topología elevadora con un solo dispositivo de conmutación, con aislamiento galvánico entre la entrada y la salida, la topología *flyback* tradicional. El aislamiento galvánico entre la entrada y la salida le brinda a esta topología la ventaja inherente, al compararla con los convertidores CD/CD con un solo dispositivo de conmutación mostrados con anterioridad, de que permite un diseño más modular y no necesita un interruptor adicional para desconectar al sistema de almacenamiento del circuito elevador de tensión cuando ocurre el evento de disparo. En los casos reportados en la literatura se propone su uso como un circuito elevador para aplicaciones como desfibriladores cardiacos [71, 72], en lámparas de flashes fotográficos [72], investigación de plasma, sonares de pulso, y generación de pulsos laser [73], y todas estas aplicaciones pueden considerarse ejemplos de sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia.

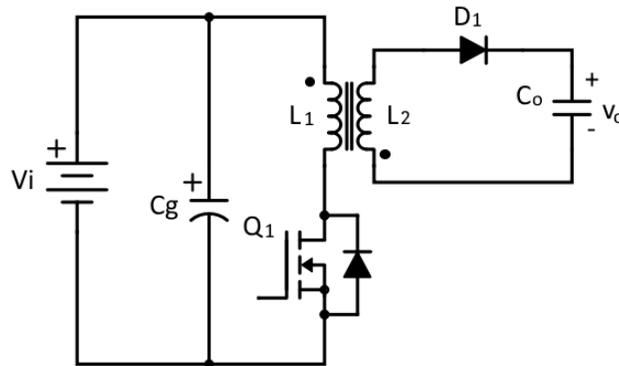


Figura 2.12: Topología flyback tradicional utilizada como circuito elevador para cargar a un banco de capacitores C_o , desde una tensión de entrada V_i (de la que el capacitor C_g previene posibles fluctuaciones) a una tensión de salida v_o , donde el dispositivo de conmutación es el transistor Q_1 , y el elemento magnético es el par de inductores acoplados magnéticamente L_1 y L_2 , y el diodo D_1 evita una reversión en el sentido de la corriente en el banco de capacitores C_o .

Entre los convertidores con aislamiento galvánico, la topología flyback suele ser la más usada para aplicaciones que requieran una potencia menor a los 150 W [74], ya

que presenta el menor número de componentes, lo que suele traducirse en costos menores y placas de circuito impreso con una menor superficie requerida, solo tiene un componente magnético que consiste en un conjunto de inductores magnéticamente acoplados llamados “transformador *flyback*” (en el caso de la [Figura 2.12](#) están representados por los inductores L_1 y L_2).

El uso de la topología *flyback* no se recomienda para aplicaciones mayores a los 150 W ya que al no disponer de un inductor de salida, el rizo de corriente de salida puede llegar a ser muy grande [74, 75], además de que el “transformador *flyback*” actúa como un dispositivo de almacenamiento de energía durante el encendido de Q_1 , lo que hace que a potencias mayores pueda llegar a dificultarse el almacenamiento de niveles de energía mayores en el volumen relativamente reducido de su elemento magnético [75].

Para todas las topologías descritas en esta sección se han encontrado en la literatura consultada aplicaciones prácticas o potenciales para cargar el sistema de almacenamiento de energía de un sistema eléctrico energizados por pulsos de alta potencia, sin embargo se reconoce que las opciones disponibles que pueden emplearse como la etapa elevadora de tensión de la fuente de suministro de energía eléctrica de un acelerador de reluctancia son aún más numerosas.

En una aplicación portátil como la propuesta en el objetivo general de este trabajo de tesis, se decidió que el inferior número de componentes de las topologías elevadoras con un solo elemento de conmutación era una característica más deseable que la elevada potencia de carga que las topologías de medio puente y puente completo pueden ofrecer. Se decidió que, de entre las topologías elevadoras con un solo dispositivo de conmutación, el aislamiento galvánico ofrecido por el transformador *flyback* facilita la obtención de un diseño modular al simplificar el uso de una sola fuente de energía eléctrica para alimentar a la etapa de control y suministrar, a la vez, la energía necesaria a la etapa de potencia del lanzador.

2.2 El sistema de almacenamiento de energía de un acelerador de reluctancia

Existen varios tipos de sistemas para almacenar energía que pueden emplearse en un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia, como lo es un lanzador electromagnético, entre los más investigados se encuentran [3, 24, 40, 76]:

- Sistemas electrostáticos (basados en capacitores).
- Sistemas magnéticos (basados en inductores).
- Sistemas inerciales (basados en volantes de inercia).
- Electroquímicos (basados en baterías).
- Químicos (basados en combustibles o explosivos).

Debido a la congruencia con el área de la electrónica de potencia, a la experiencia de trabajos previos, a los requerimientos de portabilidad del lanzador requeridas por

el objetivo general de este trabajo de tesis, y a la disponibilidad de infraestructura y materiales en el CENIDET, para este proyecto en un principio solo se tomaron en cuenta a los sistemas de almacenamiento electrostáticos, magnéticos y electroquímicos.

Como puede verse en la [Figura 2.2](#), las baterías y celdas de combustible necesarias para un sistema de almacenamiento electroquímico tienen una densidad de potencia de por lo menos un orden de magnitud menor que los capacitores y supercapacitores empleados por los sistemas electrostáticos, lo que hace que, de entrada, se descarten como parte del sistema de almacenamiento de energía de un lanzador electromagnético con características compatibles con una herramienta manual, además de que en el caso de las celdas de combustible la tecnología aún no está madura para aplicaciones portátiles, como se mencionó con anterioridad.

En la literatura consultada, todos los sistemas de almacenamiento de energía reportados, para los aceleradores de reluctancia, fueron del tipo electrostático, en los que la energía eléctrica disponible para llevar a cabo los disparos se almacena en forma de un campo eléctrico entre las placas de material conductor separadas por un dieléctrico, que componen a cada capacitor. Toda o parte de la energía almacenada en el banco de capacitores se libera posteriormente sobre la carga mediante la activación de un interruptor de cierre durante el evento de disparo, como se muestra en la [Figura 2.13](#). La [Ecuación \(2.1\)](#) es la expresión mediante la cual se calcula la energía almacenada ϵ_{Ec} en un banco de capacitores con capacitancia C , y una tensión entre sus terminales V_C , si toda la energía inicialmente almacenada en el capacitor se descarga sobre la bobina de lanzamiento $\epsilon_{Ec} = \epsilon_E$ La máxima densidad de energía teórica [77] para este tipo de sistemas de almacenamiento es de 2 MJ/m^3 y, en un lanzador electromagnético suelen ser el mayor contribuyente a la masa y al volumen de todo el sistema.

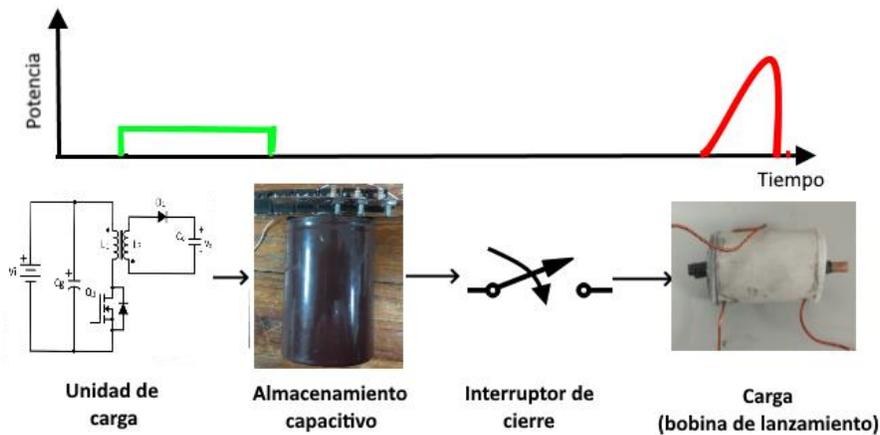


Figura 2.13: Acelerador de reluctancia como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia con un sistema de almacenamiento electrostático. La unidad de carga, en la imagen un convertidor *flyback*, se encarga de elevar la tensión para almacenar en nivel de energía requerido en el elemento de almacenamiento capacitivo (en la imagen un capacitor electrolítico), que posteriormente libera la energía almacenada rápidamente mediante la activación de un interruptor de cierre sobre la carga, que en este caso es la bobina de lanzamiento.

$$\varepsilon_{Ec} = \frac{1}{2} CV_C^2 \quad (2.1)$$

Pese a ser los más utilizados, los bancos de capacitores no son el tipo de sistema de almacenamiento con la mayor densidad de energía disponibles, se ha observado que los sistemas de almacenamiento magnéticos pueden llegar a ser una alternativa viable a los sistemas electrostáticos, ya que pueden tener densidades de energía de uno a dos órdenes de magnitud mayores que sus contrapartes capacitivas [3, 24, 76, 78-80], teóricamente la mayor densidad de energía que puede alcanzarse con estas configuraciones es de 50 MJ/m³ [77]. Estos sistemas almacenamiento guardan energía en forma de campos magnéticos generados por sus inductores de almacenamiento, energizados con pulsos de corriente y, posteriormente cuando ocurre el evento de disparo al activar un interruptor de apertura, ocurre una etapa de multiplicación del pulso de corriente, es decir, el pulso que se aplicará sobre la carga, conectada en paralelo con uno de los inductores de almacenamiento o ella misma un inductor de almacenamiento, tendrá una magnitud mayor al de la corriente con la que se cargó inicialmente a los inductores de almacenamiento, este proceso puede verse en la [Figura 2.14](#). Con la [Ecuación \(2.2\)](#) es posible determinar la densidad de energía presente en un inductor de almacenamiento ρ_{Em} , donde B_{ia} es la densidad de su campo magnético, μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, y μ_r la permeabilidad relativa del núcleo magnético del inductor de almacenamiento. Es de notarse que, usualmente, se da por descontado que el núcleo del inductor de almacenamiento no será ferromagnético ya que, debido a los niveles de energía manejados en este tipo de aplicaciones, los núcleos ferromagnéticos generalmente se saturarían.

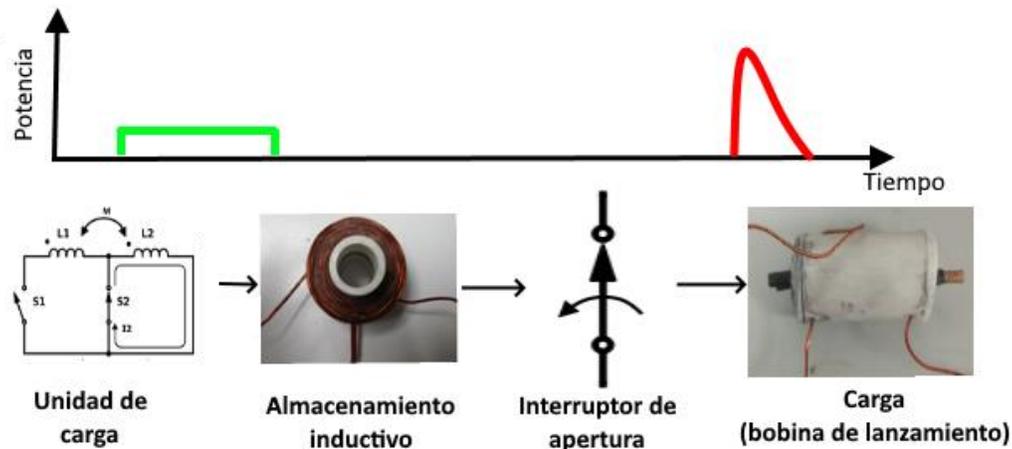


Figura 2.14: Acelerador de reluctancia como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia con un sistema de almacenamiento magnético. La unidad de carga, en la imagen un multiplicador de corriente tipo *meatgrinder* de una etapa, encargado de establecer una determinada corriente a través del elemento de almacenamiento inductivo (en la imagen un par de inductores acoplados magnéticamente con núcleo de aire), cuya magnitud en L2, con la que se puede conectar en paralelo a la bobina de lanzamiento, se verá multiplicada mediante la activación de un interruptor de apertura S1.

$$\rho_{Em} = \frac{B_{ia}^2}{2\mu_0\mu_r} \mid \mu_r = 1 \therefore \rho_{Ec} = \frac{B_{ia}^2}{2\mu_0} \quad (2.2)$$

Y la energía total almacenada en dicho inductor ε_{El} se puede calcular mediante la [Ecuación \(2.3\)](#), donde V es el volumen del inductor, L_{ia} su autoinductancia e I_L la corriente circulando en sus devanados.

$$\varepsilon_{Em} = \rho_{Em}V = \frac{1}{2}L_{ia}I_L^2 \quad (2.3)$$

En los inductores de almacenamiento se busca maximizar su densidad de energía ρ_{Em} , si dicho parámetro se expresa en términos de su autoinductancia L_{ia} a partir de la [Ecuación \(2.3\)](#), como se muestra a continuación

$$\rho_{Em} = \frac{L_{ia}I_L^2}{2V} \quad (2.4)$$

se observa que la densidad de energía ρ_{Em} de un inductor de almacenamiento es directamente proporcional a su inductancia L_{ia} , y al tomarse en cuenta que la corriente I_L que circula por el inductor se ve afectada negativamente por el valor de su resistencia en serie equivalente R_{ia} , se deduce que un inductor de almacenamiento debe tener un cociente L_{ia}/R_{ia} alto, para tener una densidad de energía alta. La magnitud del cociente L_{ia}/R_{ia} , usualmente se ve reflejada en el parámetro de la inductancia para una pieza de alambre dada (GPW por sus siglas en inglés) que presente el diseño de los inductores de almacenamiento. Los inductores que presentan una mejor inductancia por GPW son los inductores solenoidales [37].

Pese a la considerable mejora en la densidad de energía de los sistemas de almacenamiento magnéticos con respecto a los electrostáticos, la implementación de un sistema de almacenamiento puramente inductivo implica serias dificultades, destacando los niveles altos de voltaje que deben soportar sus interruptores de apertura [37, 38, 78, 79, 81], y consideraciones que deben tomarse en cuenta relacionadas con la construcción de los inductores de almacenamiento, como son su densidad de energía, las pérdidas resistivas en los devanados de sus inductores de almacenamiento [37, 82, 83], así como la necesidad de obtener acoplamientos magnéticos con valores muy cercanos a la unidad para sus inductores de almacenamiento que, como se comentó con anterioridad, usualmente son inductores con núcleo de aire [80, 84].

El problema del sobrevoltaje en los interruptores de los sistemas de almacenamiento inductivo ha llevado al desarrollo de sistemas híbridos capacitivos-inductivos basados en los sistemas puramente inductivos. Estos circuitos añaden bancos de capacitores que suministran rutas alternativas a la corriente durante la transferencia de energía de una etapa a otra, y facilitan la recuperación de energía [83, 85], aunque presentan una densidad de energía menor que un sistema de almacenamiento completamente inductivo [76]. Por esta razón se decidió que el

sistema de almacenamiento para el prototipo desarrollado con el fin de cumplir los objetivos de este trabajo de tesis fuera un sistema de almacenamiento híbrido electrostático-magnético.

Otra razón para seleccionar este tipo de sistema de almacenamiento de energía, puede deducirse a partir de la forma más simple de aproximarse al comportamiento de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento electrostático, es decir, tratándolo como un circuito RLC en serie, como puede verse en la [Figura 2.15](#), donde el elemento C es el banco de capacitores, inicialmente cargados a un nivel de tensión V_c , que sirve como sistema de almacenamiento para el lanzador, S_c es el interruptor de cierre que se activa en el instante de tiempo en el que ocurre el evento de disparo t_d , para energizar con el pulso de corriente I_L a la bobina de lanzamiento L , representada como una bobina de inductancia variable, ya que cuenta con un núcleo móvil que representa al proyectil ferromagnético, y R es la resistencia en serie equivalente de los elementos que integran al circuito.

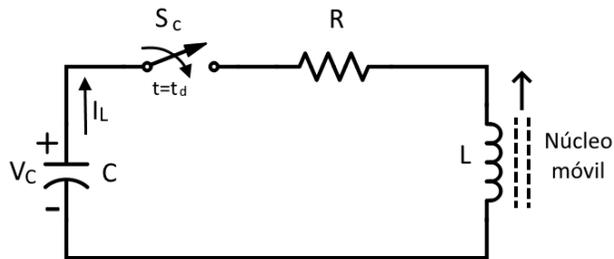


Figura 2.15: Circuito equivalente de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento electrostático-

Partiendo de esta aproximación al comportamiento de un acelerador de reluctancia, se puede ver otra razón que se tuvo en cuenta para seleccionar un sistema de almacenamiento capacitivo-inductivo, como puede verse en la [Figura 2.16](#) donde se comparan dos bobinas de lanzamiento con características equivalentes, a modo de ejemplo, donde en base a la combinación de los capacitores empleados, y del diseño de los inductores de almacenamiento, se puede acortar la duración del pulso de corriente aumentando su magnitud (compresión del pulso de corriente) [86] en relación con la duración y magnitud del pulso de corriente para un acelerador de reluctancia energizado por un sistema de almacenamiento puramente capacitivo con las mismas características de resistencia, capacitancia e inductancia totales. Esto puede utilizarse como una estrategia análoga al truncamiento del pulso de corriente (detallada en el capítulo anterior) para mejorar la eficiencia de conversión del lanzador η , minimizando así el impacto sobre esta del efecto *suckback* en proyectiles rápidos, siendo aplicable esta estrategia incluso a lanzadores donde los dispositivos de disparo no pueden desactivarse mediante la aplicación de pulsos a sus compuertas (como es el caso de los lanzadores disparados por SCRs).

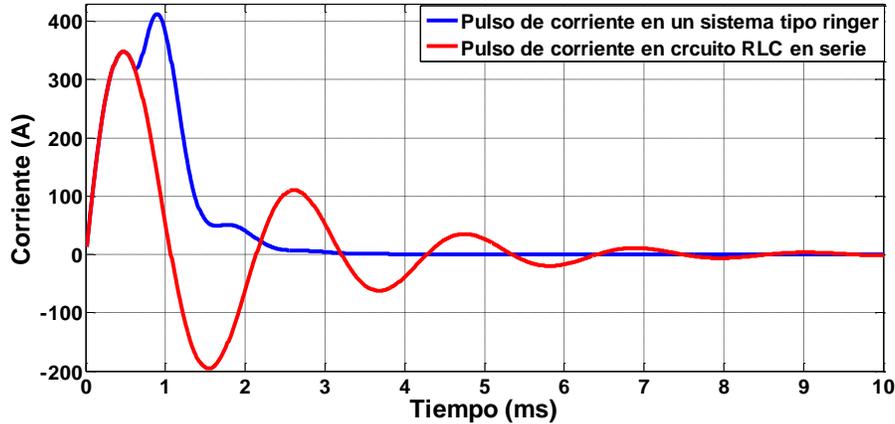


Figura 2.16: Comparativa de las formas de onda para el pulso de corriente en las bobinas de lanzamiento de aceleradores de reluctancia, entre el pulso de corriente generado en un circuito RLC en serie equivalente a un acelerador de reluctancia con sistema de almacenamiento capacitivo (en rojo), y la compresión del pulso de corriente cuando se usa un sistema de almacenamiento capacitivo-inductivo, el *ringer* (en azul).

2.2.1 La selección del sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia portátil

En la literatura consultada se han encontrado tres grandes grupos de sistemas de almacenamiento inductivos-capacitivos [78], dos de ellos basados en sistemas de almacenamiento puramente inductivos: uno, el *XRAM*, donde no se necesita que exista acoplamiento magnético entre sus inductores de almacenamiento; y otro, el *Meatgrinder*, en el que se depende del acoplamiento magnético de los inductores de almacenamiento para llevar a cabo la multiplicación y la compresión del pulso de corriente.

A continuación se describen las configuraciones puramente inductivas en las que se basan las configuraciones híbridas inductivas-capacitivas encontradas en la literatura.

El nombre del multiplicador de corriente *XRAM* viene del multiplicador de voltaje *MARX*, descrito en el capítulo anterior. Recibe este nombre ya que, análogamente a lo que ocurre en un generador *MARX* en el que los capacitores de almacenamiento se cargan en paralelo y se descargan en serie para realizar la multiplicación del voltaje, en un multiplicador de corriente *XRAM* un conjunto de inductores de almacenamiento se carga en serie a un nivel de corriente inicial, y se descarga en paralelo sobre la carga [85], como se muestra en la [Figura 2.17](#). Donde una fuente de suministro V_s , carga a los inductores de almacenamiento L_1 y L_2 en serie, hasta el instante de tiempo t_c , momento en el cual se abren los interruptores de apertura S_{01} y S_{02} , para posteriormente descargarse en paralelo sobre la carga cuando se activan los interruptores de cierre S_{C1} - S_{C4} en el instante t_d .

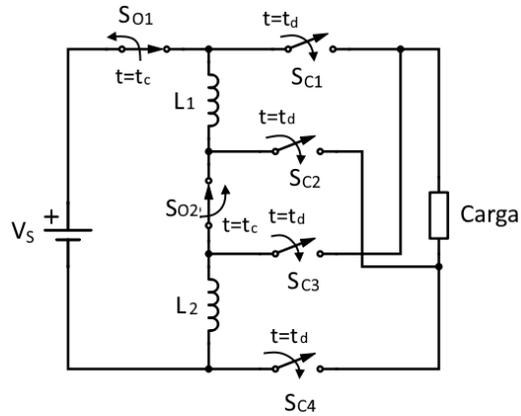


Figura 2.17: Multiplicador de corriente *XRAM* de dos etapas,

En su versión híbrida capacitiva-inductiva más común, el *XRAM* con ICCOS, que se ha desarrollado para evitar el problema del sobrevoltaje en sus interruptores de apertura [37], se hace uso de SCRs, en los que su apagado se logra con la técnica de conmutación de corriente inversa con dispositivos semiconductores (ICCOS), proceso que se muestra en la [Figura 2.18](#). Donde al activarse el tiristor T_{cc} hará que un capacitor precargado C_{cc} con una polaridad tal que generará una corriente i_{cc} , con una dirección opuesta con respecto a la corriente i_m , que inicialmente conducía el tiristor T_m , que es uno de los interruptores de apertura del generador *XRAM*; la suma de ambas corrientes, i_T , terminará siendo cero, por lo que T_m se apagará, se incluye un diodo de protección, D_{cc} .

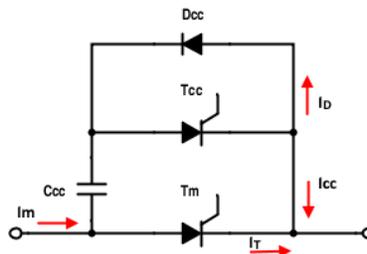


Figura 2.18: Ilustración de la técnica ICCOS.

El otro sistema de almacenamiento inductivo que ha servido de base a sistemas de almacenamiento capacitivos-inductivos, y uno de los más reportados en la literatura fue el *meatgrinder* [48, 87, 88], en la [Figura 2.19](#) se describe brevemente el funcionamiento de un *meatgrinder* de una sola etapa. En la referencia [48], Mark Pimperton, abordó el problema del sobrevoltaje en los interruptores del circuito, conectando dispositivos supresores de picos, en paralelo con los MOSFETs que empleó como interruptores, en su caso empleó varistores de metal-óxido, MOVs, y señaló que la desventaja de estos dispositivos es que presentan un pico de voltaje al iniciar el apagado del dispositivo semiconductor que depende la pendiente de decaimiento de la corriente que transita a través de él. Otro dispositivo mencionado por Pimperton fueron los supresores de transitorios de voltaje, TVS, que son un tipo especial de diodo Zener;

que tienen una respuesta de voltaje más plana que los MOVs, y al final no los utilizó porque no encontró dispositivos que se ajustaran a los niveles de voltaje que manejaría su prototipo.

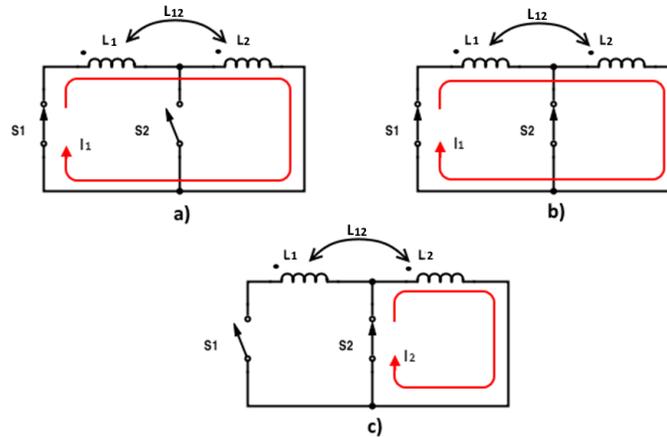


Figura 2.19: Meatgrinder de una etapa: a) Establecimiento de la corriente inicial I_1 en los interruptores acoplados magnéticamente L_1 y L_2 ; b) ocurre el cierre del interruptor S_2 , la magnitud de la corriente I_1 se mantendrá igual bajo condiciones ideales; c) ocurre la apertura de S_1 , y la corriente I_2 , que circulará por L_2 tendrá la magnitud de la corriente inicial I_1 , multiplicada por el factor $\beta_M = (L_2 + L_{12})/L_2$, donde L_{12} es la inductancia mutua entre L_1 y L_2 .

La configuración híbrida inductiva-capacitiva más popular en la literatura basada en el *Meatgrinder*, fue la configuración llamada *STRETCH-Meatgrinder*, que por sus siglas en inglés quiere decir *transferencia lenta de energía a través de un Meatgrinder* híbrido capacitivo, cuyo diagrama esquemático puede verse en la [Figura 2.20](#). Este circuito actúa como un *Meatgrinder* de una sola etapa pero en el que, durante el apagado de interruptor de apertura, el decremento en la corriente que circula a través de su inductor de almacenamiento L_1 no es súbito, sino que se ve ralentizado por la presencia del capacitor C_M que recaptura la energía presente en dicho inductor al momento del apagado, y posteriormente con dicha energía recapturada C_M se descarga sobre L_1 y cambia el sentido de la corriente que transita en él, con respecto a la corriente inicial, lo que contribuye aún más a la multiplicación de corriente en dicho circuito.

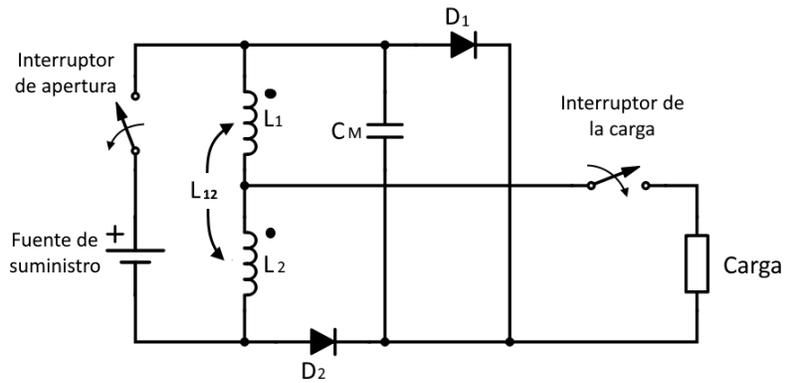


Figura 2.20: Diagrama esquemático de un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo tipo *STRETCH-Meatgrinder* [89].

El tercer tipo de sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo reportado en la literatura, es una configuración que está indirectamente basada en el *Meatgrinder*, ya que utiliza la misma topología del *STRETCH-Meatgrinder*, mostrada en la [Figura 2.20](#), pero cuyos inductores de almacenamiento no están acoplados magnéticamente, llamada PPS (por sus siglas en inglés que quieren decir fuente de suministro de pulsos de alta potencia) con inductores sin acoplamiento magnético mutuo [78].

Al comparar las topologías de sistemas de almacenamiento inductivo-capacitivos más populares en la literatura [78]: el *STRETCH-Meatgrinder*, el XRAM con ICCOS, la PPS con inductores sin acoplamiento magnético mutuo. A partir de simulaciones de las mejores configuraciones para circuitos con la misma inductancia total y corriente inicial de carga, 220 μH y 4.1 kA respectivamente, como se ve en la [Tabla 2.II](#), se llegó a la conclusión que los interruptores de apertura de todas las configuraciones experimentaban niveles similares de estrés entre sus terminales; que los bancos de capacitores para los sistemas de almacenamiento XRAM con ICCOS, reflejado en el parámetro $\varepsilon_c/\varepsilon_L$ (donde ε_c es la máxima energía capacitiva en el circuito y ε_L la máxima energía inductiva), son más numerosos que los requeridos por las otras dos configuraciones, debido a que necesitan de un banco de capacitores por cada inductor de almacenamiento; que el factor de multiplicación de corriente será siempre mayor en un XRAM, ya que en esta configuración solo se necesita agregar etapas para mejorar este parámetro, mientras que en un *STRETCH-Meatgrinder* (cuyo factor de multiplicación fue un 15.07% menor que el del XRAM) depende del factor de acoplamiento de sus inductores de almacenamiento, que siempre será menor a uno debido al uso de inductores con núcleo de aire, y en la PPS con inductores sin acoplamiento magnético mutuo (con un factor de multiplicación de corriente 319% menor que el del XRAM) este parámetro se ve aún más limitado al no presentarse la etapa donde la reversión en el sentido de la corriente en L_1 ayuda a incrementar el valor de la corriente que se le entrega a la carga por medio del acoplamiento magnético entre los inductores de almacenamiento.

Tabla 2.II: Resultados de la comparación entre las topologías de almacenamiento inductivo-capacitivo más comunes reportadas en la literatura.

Parámetro	<i>STRETCH-Meatgrinder</i>	<i>XRAM con 8 etapas</i>	PPS sin inductancias mutuas
Máximo voltaje entre las terminales del interruptor principal	1200 V	1175 V	1000 V
Factor de multiplicación de corriente	7.1	8.17	1.95
ϵ_c/ϵ_L	24.17%	38.4%	20.6%

Se llegó a la conclusión de que las topologías basadas en el multiplicador de corriente XRAM, pese a tener un mejor factor de multiplicación de corriente, eran incompatibles con aplicaciones con la característica de portabilidad, por su gran número de componentes y de elementos de control para su gran número de interruptores de disparo, y se descartó a la topología PPS sin inductancias mutuas, a pesar de requerir en teoría de bancos de capacitores más pequeños, debido a su bajo factor de multiplicación de corriente. Dejando a las topologías basadas en el *Meatgrinder*, como la opción apropiada para una aplicación de un acelerador de reluctancia portátil.

2.3 El evento de disparo en un acelerador de reluctancia

En los sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia, como es el caso de un acelerador de reluctancia, puede considerarse que los interruptores de disparo son los elementos más importantes conectados a los sistemas de almacenamiento [76], ya que estos se encargan de conectar a estos últimos con la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia para que puedan descargar la energía almacenada en ellos en forma de un pulso de corriente de gran magnitud. La duración, amplitud y forma del pulso dependen en gran medida del tipo y la configuración de los interruptores empleados, características que pueden incidir en el grado de aprovechamiento de la energía en un acelerador de reluctancias.

Los dispositivos de conmutación para el disparo, utilizados en un sistema energizado por pulsos de alta corriente suelen dividirse en dos tipos: de cierre y de apertura [76].

En el caso de los interruptores de cierre, la conmutación consiste en el descenso súbito de la tensión entre las terminales de un elemento que se comportó inicialmente como un aislante. Este descenso puede ocurrir automáticamente como resultado de un sobrevoltaje, o ser iniciada con un pulso de disparo externo. Los interruptores de apertura se caracterizan por un súbito incremento en su impedancia. Este incremento puede ser iniciado por algún actuador externo o por un proceso interno, que puede depender de la cantidad de corriente conducida por el interruptor.

En un acelerador de reluctancia, los dispositivos de conmutación más utilizados para transferir la energía en forma de un pulso de corriente desde el sistema de almacenamiento hasta la bobina del cañón son los de cierre aunque, como se vio en la subsección anterior, los interruptores de apertura son necesarios en cañones con sistemas de almacenamiento inductivos o híbridos capacitivos-inductivos, e interruptores de disparo que puedan cumplir la función de un interruptor de apertura pueden tener una incidencia positiva sobre la eficiencia de conversión η de un acelerador de reluctancia.

En la mayor parte de la literatura consultada, cuando se especificó dicha característica, en los últimos veinticinco años los interruptores más utilizados para el disparo de cañones de Gauss fueron SCRs [14, 18, 34, 90-100], tiristores disparados por láser [101], interruptores de gas [102, 103], IGBTs [6, 14, 19, 31, 104-107], MOSFETs [14, 108], ignitrones [10], e interruptores mecánicos [32]. Debido a la familiaridad que se tiene, y a la relativa facilidad con la que se pueden conseguir dispositivos semiconductores con una amplia variedad de características, en este proyecto solo se consideró la posibilidad de implementar estrategias para mejorar el aprovechamiento de la energía, basadas en dispositivos semiconductores.

2.3.1 Características de los dispositivos semiconductores de conmutación de disparo que pueden utilizarse en un acelerador de reluctancia

Se decidió que de las opciones disponibles entre los dispositivos semiconductores de conmutación, para liberar la energía disponible en el sistema de almacenamiento sobre la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia, los más apropiados, dadas las características, de los altos niveles de potencia eléctrica instantánea (derivada de la energización de la bobina de lanzamiento con pulsos de corriente en el orden de los cientos de amperes, y voltajes en el sistema de almacenamiento habitualmente en el orden de los cientos de volts), y portabilidad requeridos para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo de tesis son los tiristores SCR y los transistores IGBT, por las razones que se detallan a continuación.

Los tiristores

Se observa que entre los dispositivos semiconductores, los más empleados han sido los tiristores, esto es fácilmente explicable, ya que, por el mismo precio, un tiristor típico puede llegar a soportar mayores niveles de tensión y corriente que un IGBT o un MOSFET [76]. Además, es una tecnología muy madura, ya que se han desarrollado dispositivos diseñados para trabajar específicamente con pulsos de alta potencia [58, 76] capaces de soportar pulsos de hasta 220 kA con una duración de 450 μ s y, a pesar de ser dispositivos semiconductores relativamente lentos, ya que tienen una gran área activa para soportar grandes corrientes [109], en la actualidad se busca desarrollar tiristores de pulsos de alta potencia que trabajen en el orden de los picosegundos [58]. Los tiristores presentan corrientes de fuga y necesitan pulsos de corriente para el encendido, pero las magnitudes y duración de dichas corrientes generalmente son

pequeñas, comparadas con la magnitud del pulso de corriente y las pérdidas en el sistema de almacenamiento [58], lo que significa que estos parámetros llegan a tener poco impacto sobre la eficiencia de conversión del lanzador.

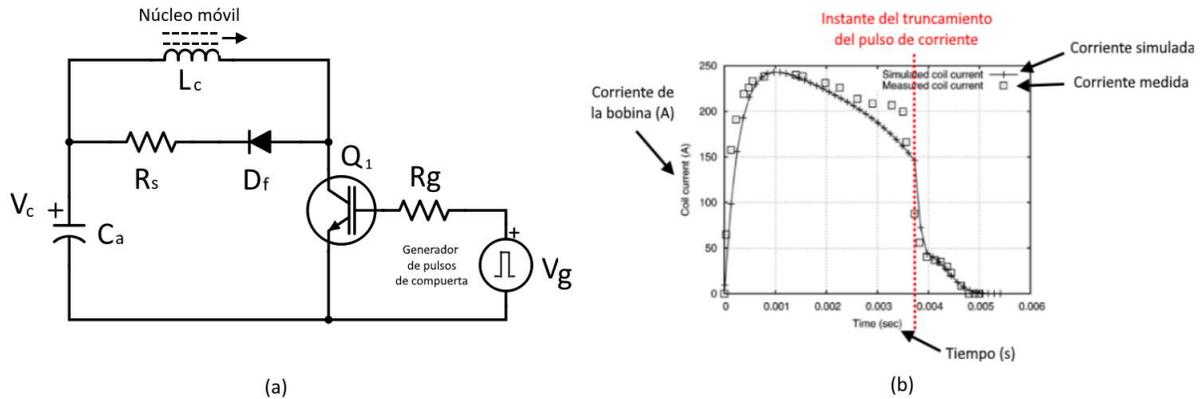


Figura 2.21: Ejemplo de un acelerador de reluctancia con truncamiento de pulso de corriente para mejorar la eficiencia de conversión η [6]. Donde se interrumpe el pulso en la compuerta de Q_1 para interrumpir el pulso de corriente como se muestra en (b)

La [Ecuación \(2.5\)](#) es una forma de reescribir la [Ecuación \(1.1\)](#), para calcular la eficiencia de conversión η , en los casos cuando el lanzador electromagnético trabaja con un sistema de almacenamiento capacitivo o híbrido capacitivo-inductivo

$$\eta = \frac{mU_{sal}^2}{C_a(V_{Ci}^2 - V_{Cf}^2)} \quad (2.5)$$

donde m es la masa del proyectil, U_{sal} su velocidad de salida, C_a la capacitancia del banco de capacitores del sistema de almacenamiento, V_{Ci} el voltaje inicial en el banco de capacitores al realizar un disparo, y V_{Cf} el voltaje en el banco de capacitores al finalizar el disparo. Ya que $V_{Ci}^2 \geq (V_{Ci}^2 - V_{Cf}^2)$, y que la presencia de corriente circulando por la bobina del cañón después de que el proyectil empiece a salir de ella, provoca una disminución en la velocidad de salida de este último (efecto *suckback*) [15]. Entonces, si se trunca el pulso de corriente en el instante en que el proyectil comience a abandonar la bobina, como se puede ver en la [Figura 2.21](#), se puede mejorar la eficiencia de conversión del acelerador de reluctancia [6, 14].

Para llevar a cabo el truncamiento del pulso de corriente, y mejorar así la eficiencia de conversión, se necesitan dispositivos semiconductores con apagado controlado, característica que no presentan los SCRs, los dispositivos de conmutación más usados para los disparos de un acelerador de reluctancia. Los tiristores tipo GTO sí pueden apagarse aplicando corriente negativa a la compuerta, pero esto representa ciertas dificultades que no los hace recomendables para mejorar la eficiencia de conversión de un acelerador de reluctancia mediante el truncamiento del pulso de corriente, ya que necesitan una fuente capaz de suministrar tensiones de polaridad negativa, lo suficientemente elevadas como para generar el pulso de corriente de

apagado requerido por su compuerta, porque el apagado no se realiza de forma "abrupta" como en otros dispositivos semiconductores, sino que se necesita aplicar la corriente de apagado durante un tiempo de almacenamiento, y después de este tiempo la corriente decaerá abruptamente para después decaer lentamente (*cola de corriente*); un criterio típico para determinar la magnitud de la corriente de apagado es que esta sea de al menos el 20% de la magnitud de la corriente que circula en ese momento por el dispositivo, lo que implica la construcción de otro circuito generador de pulsos de alta corriente para llevar a cabo el apagado del dispositivo [109]. Una tecnología relativamente nueva, en cuanto a tiristores con apagado controlado, es el IGCT, basado en la tecnología GTO, con la circuitería para el apagado ya integrada en el empaquetado [110]. Estos presentan pérdidas de conducción relativamente pequeñas (similares a las presentadas por otros tipos de tiristores) [67] pueden apagarse "instantáneamente" como si fueran transistores y tienen pérdidas de conmutación bajas, similares a las de un transistor bipolar de las mismas características [110]. En la literatura se ha encontrado ejemplos de este tipo de dispositivos con capacidad de apagarse conduciendo corrientes de hasta 4 kA [67]. Estas características de apagado hacen al IGCT una opción viable para llevar a cabo el truncamiento del pulso de corriente para mejorar el aprovechamiento de energía de un acelerador de reluctancia. También se ha reportado su uso como interruptores de apertura en sistemas de almacenamiento magnéticos [79], y como interruptores controlados en convertidores construidos para cargar bancos de capacitores (sistemas de almacenamiento electrostáticos) [67].

Aunque, sin tomar en cuenta los costos, los IGCTs parecen los dispositivos de conmutación idóneos para un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento inductivo, por capacidad de tolerar conmutaciones duras durante el apagado, con altos niveles de corriente eléctrica, así como el hecho de que su apagado sea controlable y permita implementar el truncamiento del pulso de corriente cuando el proyectil empieza a salir de la bobina de lanzamiento. Como se ha mencionado con anterioridad, el volumen y la masa adicionales derivados de la circuitería de control de su compuerta, hacen que el SCR sea el único tiristor disponible en la actualidad apto para ser incorporado en un lanzador, donde la portabilidad sea una característica prioritaria, aunque el hecho de que su apagado no sea controlado mediante su compuerta impide que se implementen estrategias de mejora de la eficiencia de conversión, como el truncamiento del pulso de corriente, a los pulsos de control de su compuerta.

Los IGBT

En los ejemplos reportados en la literatura se encontró que, después de los tiristores, los IGBTs son fueron dispositivos semiconductores de disparo más utilizados. Esto resulta comprensible, ya que estos dispositivos tienen características deseables como una baja resistencia durante el encendido (como los transistores bipolares) y un control de compuerta sin pérdidas (como los FETs), su tiempo de conmutación puede llegar hasta el orden de los nanosegundos [110]. En cuanto al

manejo de corriente y voltaje, presentan características intermedias entre los tiristores y los MOSFETs, pudiéndose encontrar dispositivos discretos capaces de conmutar tensiones de 1.8 kV y corrientes de hasta 3 kA [76], y pueden agruparse fácilmente en módulos capaces de bloquear tensiones de 6 kV y conducir corrientes continuas de 4 kA [110]. En la literatura se encontró un ejemplo de un módulo capaz de bloquear tensiones de hasta 10 kV [111] y otro capaz de generar pulsos de corriente con una magnitud de hasta 12 kA y bloquear un voltaje de hasta 2.5 kV [112]. Como queda ilustrado por sus apariciones en la literatura, el IGBT es un dispositivo apto para generar pulsos de corriente para energizar a un acelerador de reluctancia, y con él se puede emplear la técnica del truncamiento del pulso para mejorar la eficiencia del lanzador. Además, también se ha reportado su uso como interruptor de apertura en sistemas de almacenamiento híbridos magnéticos-electrostáticos [112].

Los MOSFET

El dispositivo semiconductor MOSFET fue del que menos se reportó su uso en lanzadores electromagnéticos en la literatura consultada, esto podría deberse a que estos dispositivos no son capaces de manejar pulsos de tan alta potencia como los IGBTs o los tiristores, aunque sus tiempos de conmutación son por lo general menores [111]. Estas características parecen indicar que el MOSFET es una mejor alternativa en la implementación de las fuentes de suministro de energía eléctrica, cuando se trata de conmutar pulsos repetitivos de corrientes con magnitudes no muy elevadas, como en el caso de convertidores construidos para cargar sistemas de almacenamiento electrostáticos y, aunque con ellos sea aplicable la técnica del truncamiento del pulso [14], no son tan buena alternativa como dispositivos de disparo [111]. En [14] se reporta una estrategia para mejorar la eficiencia de conversión de un acelerador de reluctancia, aplicada en MOSFETs, haciendo que funcionen en su región activa para que se comporten como una resistencia variable, controlada mediante pulsos con modulación PWM en su compuerta. Los autores reportaron haber conseguido así un incremento relativo de la eficiencia de conversión del 5.7% a partir de una eficiencia de conversión de 0.32% es decir, una mejora absoluta de 0.018% que, al revisar los ejemplos disponibles en la literatura, puede considerarse como una eficiencia relativamente baja (mucho menor el 3.00%) [18], y dicha mejora pudo haber sido aún menor, teniendo en cuenta los márgenes de error manejados por los autores. Por esa razón, por el momento, no se ha considerado a la estrategia de trabajar con el dispositivo de conmutación en su zona activa, como un método efectivo para mejorar la eficiencia de conversión de un acelerador de reluctancia.

2.4 Características definidas del prototipo

A partir de la caracterización del acelerador de reluctancia como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta corriente, se definieron los componentes más apropiados para el desarrollo de un acelerador de reluctancia con características compatibles de una herramienta manual, recapitulando:

Una fuente de suministro de energía eléctrica que conste de un banco de baterías de iones de litio

Se hizo esta selección debido a que los bancos de baterías presentaron las características de densidad de energía deseadas para lograr la portabilidad en un acelerador de reluctancia, a un precio por kWh almacenado bastante inferior al de los supercapacitores.

De entre las baterías se consideró trabajar con baterías de plomo-ácido VRLA o de iones de litio, seleccionándose estas últimas por brindar un mayor nivel de energía disponible para una aplicación portátil, al poseer una densidad de energía superior y una ventana de descarga de hasta el 80 %, en comparación al 50 % de las baterías VRLA. Además de se pensó que esto, combinado con el hecho de que su vida útil es superior superior, compensaba el costo significativamente mayor de los bancos de baterías de iones de litio.

Un circuito elevador de tensión con topología *flyback*, para surtir de energía al sistema de almacenamiento de energía

Los lanzadores electromagnéticos requieren una etapa elevadora de tensión para suministrarle el nivel de energía adecuado a su sistema de almacenamiento de energía.

Se consideró al convertidor flyback como la mejor opción para una aplicación portátil como la pretendida por este trabajo de tesis, ya que requiere del menor número de componentes, lo que se traduce en un menor peso y volumen para el sistema. Además de que el aislamiento magnético entre su entrada y salida, simplifica la utilización de una sola fuente de suministro para energizar al sistema de control del lanzador, y a su sistema de almacenamiento de energía.

Un sistema de almacenamiento de energía híbrido magnético-electrostático, es decir, basado en capacitores e inductores de almacenamiento.

Esto se decidió porque la densidad de energía de este tipo de sistemas suele ser mayor que los puramente capacitivos, y aunque sea menor al de los puramente inductivos, no presentan tanto sobre voltaje en sus dispositivos de conmutación. Además, al poder aplicar la compresión de corriente, se puede variar la duración del pulso de corriente en el inductor de lanzamiento de forma análoga al truncamiento de corriente, pero sin la necesidad de dispositivos de conmutación de compuerta aislada.

Se decidió que el sistema de almacenamiento estuviera basado en un multiplicador *meatgrinder*, ya que el acoplamiento magnético de sus inductores de almacenamiento permite una mayor multiplicación de corriente que los sistemas de almacenamiento sin inductores acoplados magnéticamente, y no requiere del gran número de inductores y capacitores de almacenamiento que necesitan los multiplicadores de corriente XRAM, y que dificultan el desarrollo de un lanzador portátil.

Un conjunto de interruptores de disparo consistente en la interconexión de varios dispositivos SCR.

Se decidió que se emplearían SCRs para la construcción del prototipo, ya que son los dispositivos de conmutación que resisten mayores niveles de tensión y corriente por un precio dado, y se estimó que el pulso de corriente generado estaría en el orden de los ms.

Además se consideró que el uso de dispositivos que pudieran ser apagados por compuerta sería innecesario, ya que se emplearía la compresión del pulso de corriente en lugar de su truncamiento para evitar el efecto suckback sobre el proyectil ferromagnético.

En la [Figura 2.22](#) se muestra el diagrama a bloques del sistema completo.

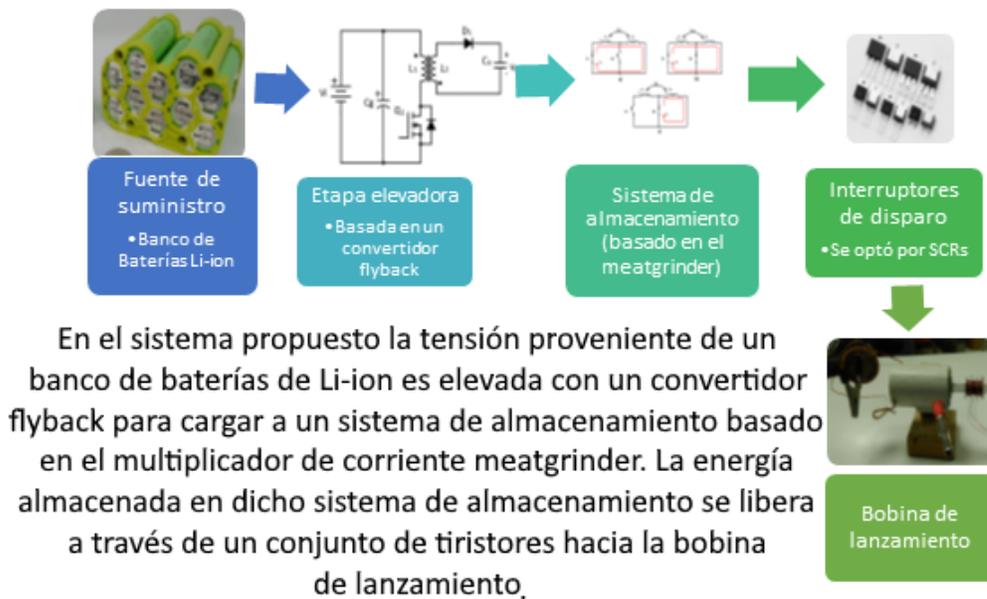


Figura 2.22: Diagrama a bloques del sistema completo, deducido a partir de la caracterización del acelerador de reluctancia como un sistema eléctrico energizado por pulsos de alta potencia.

Capítulo 3

El desarrollo y modelado de un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo para un acelerador de reluctancia

Para el cumplimiento del objetivo general de este trabajo de tesis, Inicialmente se consideró al circuito *STRETCH-Meatgrinder* como la opción apropiada para ser el sistema de almacenamiento de un acelerador de reluctancia portátil, sin embargo, al desarrollar su modelo matemático y llevar a cabo simulaciones a partir del mismo, que puede consultarse en el *Anexo B* de este trabajo de tesis, se observó que los lanzadores simulados siempre tenían una eficiencia de conversión η considerablemente menor que las de lanzadores con un sistema de almacenamiento puramente capacitivo. Se determinó que las principales pérdidas estaban en los devanados de los inductores de almacenamiento, debido a que para crear inductores con un volumen apropiado para la aplicación desarrollada se obtenían diseños para los inductores de almacenamiento con una gran resistencia en serie equivalente. Y se concluyó que este tipo de sistemas de almacenamiento, con inductores de almacenamiento adicionales, solo son prácticos si se usan en lanzadores con un volumen relativamente grande para poder usar conductores con una mayor área transversal, o si se trabaja con inductores de almacenamiento hechos con materiales superconductores, ambas características incompatibles con una aplicación portátil.

Por esta razón se desarrolló una configuración, basada en el *Meatgrinder*, en la que se pudo prescindir por completo del conjunto de inductores de almacenamiento adicionales, que se detalla en la siguiente sección.

3.2 Desarrollo de un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo para un acelerador de reluctancia

Pueden hacerse las siguientes observaciones sobre los inductores de almacenamiento para un sistema de almacenamiento con una parte inductiva:

- Debido a la energía que debe manejar este tipo de inductores, deben de tener núcleo de aire para evitar su saturación.
- Los inductores con mayor inductancia por GPW (pieza de alambre dada), característica deseable en los inductores de almacenamiento debido a que este

parámetro es un buen indicador de la densidad de energía que puede alcanzarse con el sistema, son los inductores solenoidales.

Estas características son compatibles con la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia, por lo que se llegó a la conclusión de que para poder prescindir de los inductores de almacenamiento externos y de las pérdidas que conllevan en el sistema se requería que una misma bobina hiciera el papel de bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia, así como de un conjunto de inductores de almacenamiento magnéticamente acoplados trabajando en una configuración derivada de un sistema de almacenamiento tipo *Meatgrinder*.

Por su simplicidad y el número mínimo de componentes requeridos para su funcionamiento, lo que es compatible con la portabilidad deseada para la aplicación que se está desarrollando, se eligió a una configuración tipo *Ringer* para ser el sistema de almacenamiento para el acelerador de reluctancia con una sola bobina como bobina de lanzamiento e inductores de almacenamiento magnéticamente acoplados. El funcionamiento de dicha topología se explica en la siguiente sección.

3.2.1 Funcionamiento del *Ringer*, un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo derivado del *Meatgrinder*

El *Ringer* es un sistema de almacenamiento inductivo-capacitivo, y es un tipo especial de circuito *Meatgrinder* de una sola etapa que no requiere interruptores activados por compuerta [113]. En la [Figura 3.1](#) se puede ver la versión más simple de este circuito que consta de un capacitor de almacenamiento C_a , un par de inductores de almacenamiento magnéticamente acoplados L_1 y L_2 con una inductancia mutua L_{12} , y un diodo D .

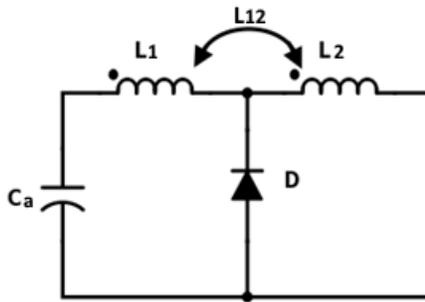


Figura 3.1: Diagrama esquemático del *Ringer*.

En el funcionamiento del *Ringer* pueden identificarse dos etapas determinadas por la polaridad del voltaje instantáneo v_C entre las terminales del capacitor de almacenamiento C_a , ya que esta hace que el diodo D conduzca o no, cambiando el circuito equivalente para cada etapa.

En la primera etapa, cuyo circuito equivalente puede verse en la [Figura 3.2](#), el capacitor C_a , cargado a un nivel inicial de tensión V_{Ci} , comienza a descargarse sobre los inductores de almacenamiento L_1 y L_2 , durante esta etapa el diodo D permanece

apagado, y el circuito equivalente de esta etapa puede verse en la [Figura 3.3](#). Esta etapa dura hasta que toda la energía disponible ha sido transferida a los inductores de almacenamiento y la tensión v_c entre las terminales de C_a es cero, como puede verse en la [Figura 3.4](#). En un ringer ideal esto ocurriría en el instante de tiempo T_{P1} en el que se presenta un primer pico en la corriente i_{L2} que circula por el inductor L_2 , pero en circuitos reales el cambio de polaridad de v_c se va atrasando, con respecto al instante T_{P1} , conforme la resistencia parásita de los componentes aumenta.

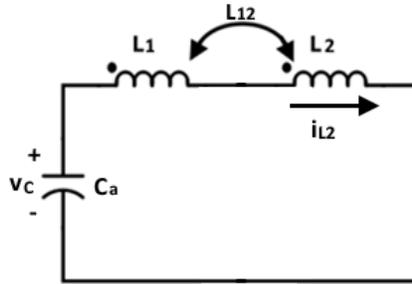


Figura 3.2: Circuito equivalente de la primera etapa del funcionamiento del Ringer, cuando v_c tiene una polaridad positiva.

Inmediatamente después que la polaridad de v_c se invierte, el diodo D se activa, haciendo que los inductores de almacenamiento L_1 y L_2 interactúen solamente a través de su acoplamiento magnético, el circuito equivalente de esta etapa es el que se muestra en la [Figura 3.3](#), lo que da inicio a la multiplicación (compresión) del pulso de corriente i_{L2} . Durante esta etapa, la corriente i_{L2} circulando a través del inductor L_2 , cuya inductancia usualmente es menor a la del inductor L_1 , empieza a incrementarse hasta que alcanza un segundo pico de corriente en el instante T_{P2} , como se muestra en la [Figura 3.4](#).

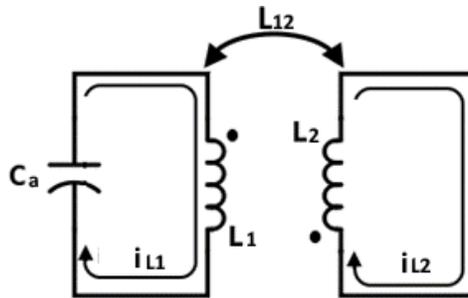


Figura 3.3: Circuito equivalente de la segunda etapa del funcionamiento del Ringer, cuando el diodo D conduce.

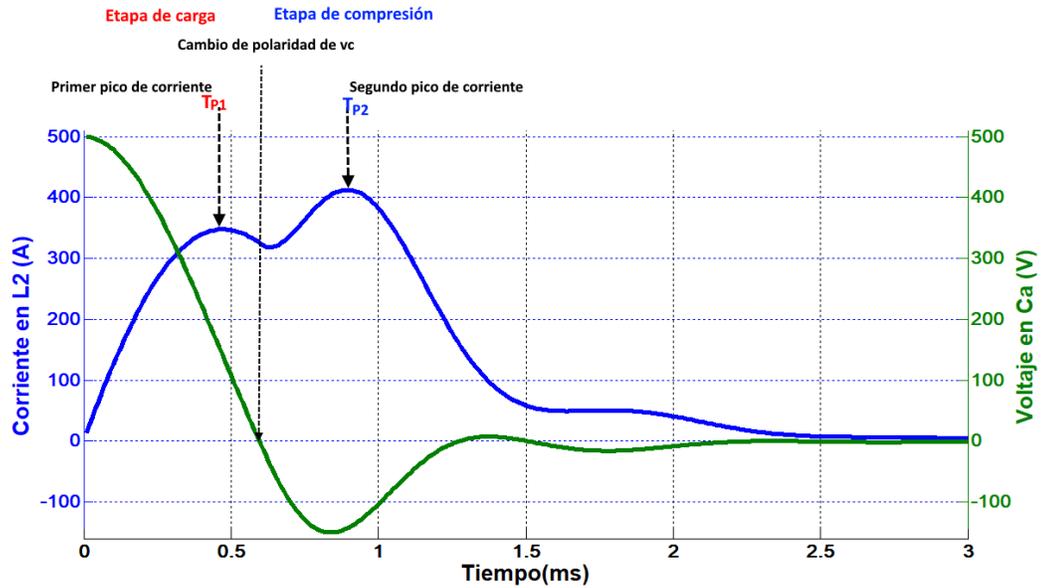


Figura 3.4: Formas de onda de la corriente y el voltaje de un circuito *Ringer*, para ilustrar el comportamiento de la corriente i_{L2} y el voltaje v_C durante las dos etapas en las que opera esta topología.

En el *Anexo C* se muestran algunas ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento del *Ringer*, sin una carga, y con una carga inductiva. En ambos casos se consideraron inductores ideales, sin pérdidas resistivas.

3.2.2 La bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada para el acelerador de reluctancia.

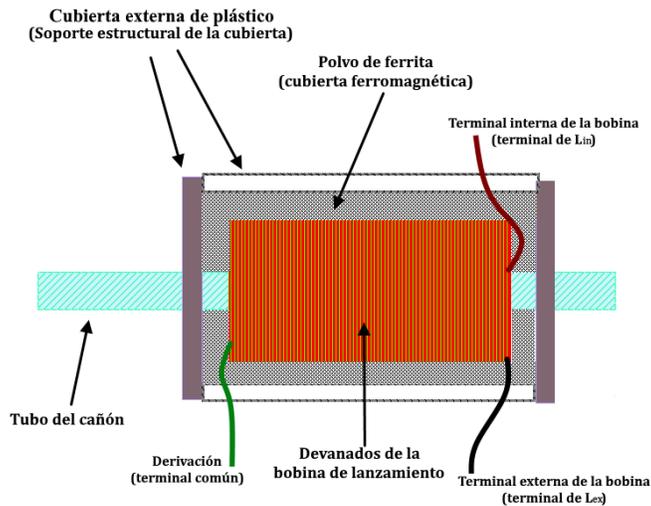


Figura 3.5: Vista longitudinal de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.

Como solución a las pérdidas resistivas derivadas de la utilización de un conjunto de inductores de almacenamiento adicionales, así como al aumento de volumen derivado de la inclusión de dichos inductores al sistema, se ha desarrollado una bobina de

lanzamiento para un acelerador de reluctancia, que también actúa como un par de inductores de almacenamiento magnéticamente acoplados.

La bobina desarrollada está constituida por al menos dos capas de devanados, con una derivación intermedia para dividir a la bobina en dos secciones, una interna y otra externa, como se muestra en la [Figura 3.5](#). Se ha decidido que esté rodeada por una cubierta ferromagnética constituida por polvo de ferrita (material que permite una mayor flexibilidad en el diseño de la geometría de la bobina) encapsulada por una cubierta plástica exterior para mejorar la eficiencia de conversión η , como se mencionó con anterioridad.

Las secciones interna y externa de la bobina actúan como dos solenoides largos concéntricos y coaxiales L_{in} y L_{ex} , con la misma longitud l , conectados en serie aditiva, como se muestra en la [Figura 3.6](#), colocados muy próximos el uno del otro, logrando por lo tanto un acoplamiento magnético que se ve reflejado en la inductancia mutua L_{ie} entre L_{in} y L_{ex} .

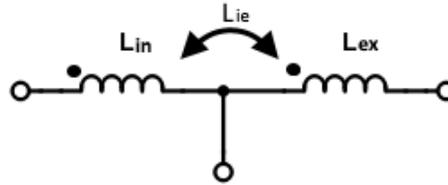


Figura 3.6: El circuito equivalente de la bobina propuesta.

En la [Figura 3.7](#) las dos secciones de la bobina están representadas por dos cilindros concéntricos y se asume que sus devanados con N_{Lin} vueltas en la sección interna y N_{Lex} vueltas en la externa están localizados sobre la superficie del cilindro correspondiente a las distancias a_i y a_e desde su eje común. Las inductancias de las secciones interna y externa son L_{in} y L_{ex} respectivamente, con una inductancia mutua L_{ie} .

Cuando la bobina es energizada por un pulso de corriente hay una corriente i_{Li} fluyendo a través de la sección interna y una corriente i_{Le} en los devanados de la sección externa. El análisis de los flujos magnéticos transitorios creados por cada una de las corrientes puede ser hecho dividiendo a la bobina en dos regiones diferentes: el flujo en el volumen dentro del inductor interno ϕ_i , donde la distancia radial r desde el eje común es $r < a_i$, y el flujo en el volumen en la región donde la distancia radial desde el eje común es $a_i < r < a_e$ donde está presente el flujo magnético transitorio ϕ_e .

El valor de ϕ_i , puede calcularse con

$$\phi_i = \frac{L_{in}}{N_{Lin}} i_{Le} + \frac{L_{ie}}{N_{Lin}} i_{Lin} \quad (3.1)$$

Y si se emplea la expresión para obtener la inductancia de solenoides largos como una aproximación al valor de las inductancias mostradas en la [Ecuación \(3.1\)](#), la expresión para encontrar ϕ_i puede reescribirse como

$$\phi_i = \frac{\mu_0 N_{Lin} \pi a_i^2}{l} i_{Le} + \frac{\mu_0 N_{Lex} \pi a_i^2}{l} i_{Li} \quad (3.2)$$

donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío $4\pi \times 10^{-7} T \cdot m \cdot A^{-1}$, y l es la longitud de la bobina.

Cuando se aplica un pulso de corriente a la bobina de lanzamiento, la expresión para calcular el valor de ϕ_e es

$$\phi_e = \frac{\mu_0 N_{Lex} \pi}{l} (a_e^2 - a_i^2) i_{Le} \quad (3.3)$$

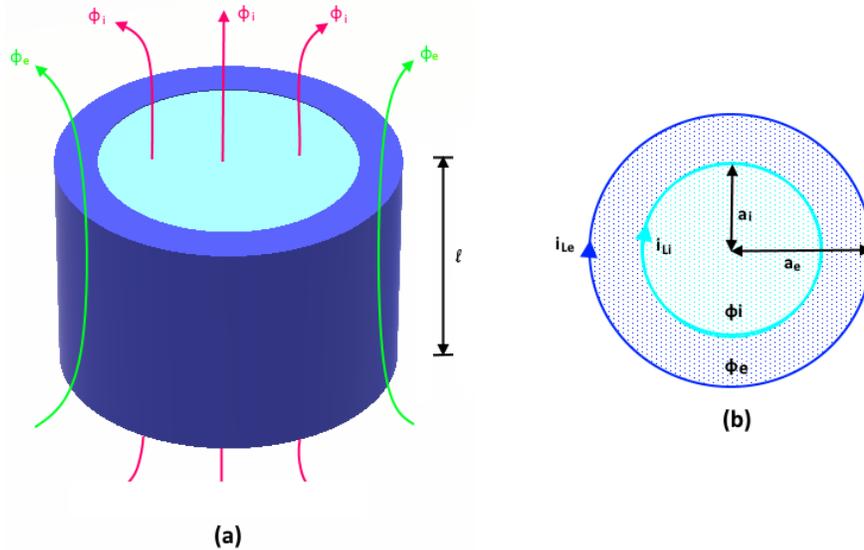


Figura 3.7: Representación simplificada de las dos secciones de la bobina de lanzamiento como dos cilindros concéntricos, y sus flujos magnéticos correspondientes (ϕ_i y ϕ_e) y las corrientes eléctricas en cada devanado (i_{Li} e i_{Le}). (a) Vista longitudinal, (b) vista transversal.

3.2.3 El modelado matemático de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada

En [6, 18, 30] se ha demostrado la utilidad y la precisión de los modelos lagrangianos para aceleradores de reluctancia. Por esta razón se ha decidido integrar a la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada en un sistema de almacenamiento tipo *ringer* mediante el uso de un modelo lagrangiano para describir su funcionamiento.

Usualmente en un modelo lagrangiano para un sistema eléctrico, las cargas eléctricas en cada rama de la red se escogen como parte de sus coordenadas adecuadas. Por lo tanto, en lo sucesivo las corrientes eléctricas serán expresadas en términos de

las cargas eléctricas presentes en la bobina cuando es energizada por un pulso de corriente:

$$i_{Li} = \dot{q}_{Lin} \quad (3.4)$$

$$i_{Le} = \dot{q}_{Lex} \quad (3.5)$$

Para deducir el lagrangiano de la parte eléctrica de la bobina de lanzamiento ℓ'_L , es decir, sin tomar en cuenta el efecto de un proyectil ferromagnético pasando dentro de ella. Es este caso, a partir del modelo propuesto en [114], el lagrangiano ℓ'_L para describir a los inductores en la bobina de lanzamiento/almacenamiento, tendrá la forma

$$\ell'_L = \sum_j N_j \phi_j \dot{q}_j - \sum_k \frac{\mathcal{R}_k \phi_k^2}{2} \quad (3.6)$$

donde el subíndice j denota el número de vueltas, cargas eléctricas, y flujos magnéticos (N , ϕ y q respectivamente) en su respectiva j -ésima sección del devanado, y k denota la reluctancia y los flujos magnéticos (\mathcal{R} y ϕ respectivamente) en la respectiva k -ésima región de su núcleo.

Como se ha mostrado, existen dos secciones discernibles de devanados (la interna y la externa), cada una de ellas enlazadas por su flujo magnético correspondiente cuando se les aplica un pulso transitorio de corriente ϕ_{Lin} y ϕ_{Lex} respectivamente.

En cuanto al núcleo, hay dos regiones discernibles, la región donde la distancia radial r desde el eje común es $r < a_i$, y el flujo magnético presente es ϕ_i , y cuya reluctancia \mathcal{R}_{in} puede expresarse como

$$\mathcal{R}_{in} = \frac{l + 2\beta}{\mu_0 \pi a_i^2} \quad (3.7)$$

donde el término β es un espacio de aire circular, introducido en el modelo matemático para un acelerador de reluctancia descrito en [6], que se asume tenga la magnitud de la distancia entre la superficie del proyectil y la cubierta ferromagnética de la bobina de lanzamiento.

La otra región en el núcleo, donde la distancia radial r desde el eje común es $a_i < r < a_e$, y el flujo magnético presente es ϕ_e , la reluctancia magnética \mathcal{R}_{ex} es

$$\mathcal{R}_{in} = \frac{l + 2\beta}{\mu_0 \pi (a_e^2 - a_i^2)} \quad (3.8)$$

Para simplificar el análisis, ϕ_i y ϕ_e serán expresadas en términos de los flujos magnéticos ϕ_{Lin} y ϕ_{Lex} donde

$$\phi_i = \phi_{Lin} \quad (3.9)$$

$$\phi_e = \phi_{Lex} - \phi_{Lin} \quad (3.10)$$

Al sustituir las [Ecuaciones \(3.9\)](#) y [\(3.10\)](#) en la [Ecuación \(3.8\)](#), el lagrangiano deducido para la bobina propuesta, sin tener en cuenta los efectos de un proyectil ferromagnético pasando por su interior es

$$\begin{aligned} \ell'_L = & N_{Lin}\phi_{Lin}q_{Lin} + N_{Lex}\phi_{Lex}q_{Lex} - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0\pi(a_e^2 - a_i^2)} (\phi_{Lex} - \phi_{Lin})^2 \\ & - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0\pi a_i^2} \phi_{Lin}^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

Para el paso del proyectil ferromagnético dentro de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia, como puede verse en la [Figura 3.8](#), William Slade identificó tres etapas diferentes de su desplazamiento: cuando el proyectil está entrando a la bobina, que es cuando este experimenta una fuerza con la dirección deseada para el disparo; cuando el proyectil está llenando a la bobina de lanzamiento, donde la fuerza ejercida sobre el proyectil por la bobina de lanzamiento es nula; y cuando el proyectil está saliendo de la bobina donde, si hay presencia de corriente en los devanados de la bobina, el proyectil experimentará fuerzas con sentido contrario a la dirección deseada para el disparo.

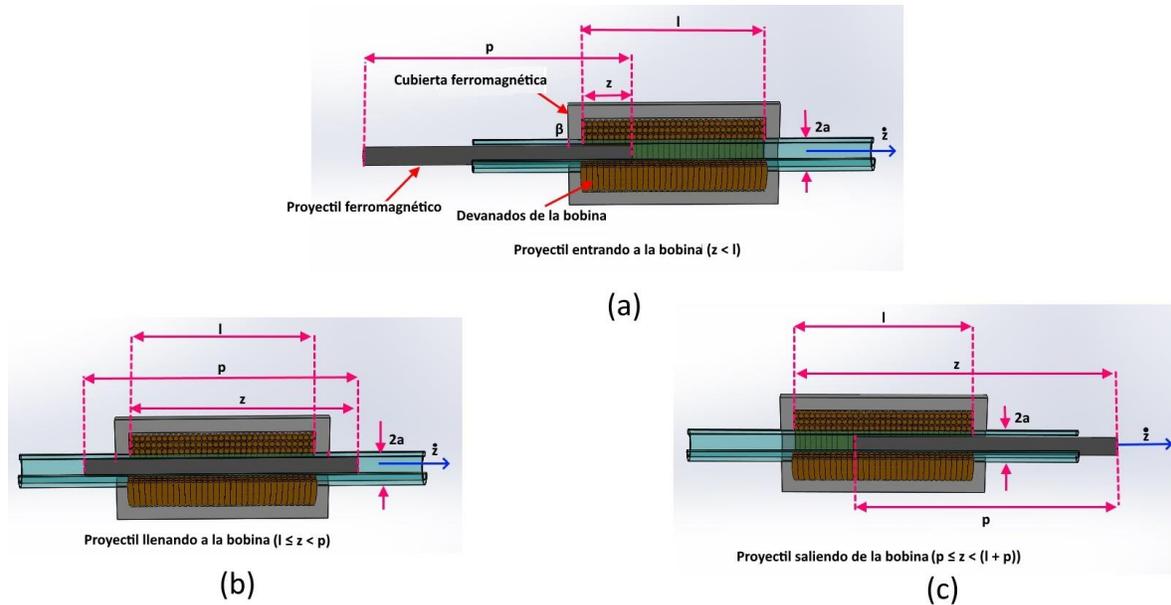


Figura 3.8: Las tres etapas del lanzamiento propuestas por William Slade [6]. (a) Proyectil entrando a la bobina de lanzamiento/almacenamiento, (b) proyectil llenando a la bobina, (c) proyectil saliendo de la bobina. En esta figura y en las ecuaciones que aparecen en esta sección, l es la longitud de la bobina de lanzamiento/almacenamiento, p es la longitud del proyectil ferromagnético, z es la posición del proyectil dentro de la bobina, a_i es el radio de la sección interna de la bobina, y β es el espacio lleno de aire entre la cubierta ferromagnética de la bobina y el proyectil ferromagnético.

Es de notarse que para su modelo matemático, William Slade usó las siguientes simplificaciones, que también se utilizaron para la elaboración del presente modelo matemático:

1. El material del proyectil se asume como isotrópico, la distribución de sus dominios magnéticos es homogénea.
2. Se ignora la histéresis del material del proyectil.
3. Para poder incluir los efectos del paso de un proyectil ferromagnético al interior de la bobina de lanzamiento/almacenamiento en el modelo matemático, se utilizó una expresión algebraica para representar los efectos de la magnetización M del proyectil. Con este propósito se usa la [Ecuación \(3.12\)](#), en la [Figura 3.9](#) puede verse la curva de saturación generada con esta función, empleada para el mismo fin en [6], donde M_0 es la magnetización inicial del proyectil, μ_r su permeabilidad magnética, p la longitud del proyectil, z su posición dentro de la bobina con respecto a su eje longitudinal, y l la longitud de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.

$$M(B) = M_0 \tanh\left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0}\right) \quad (3.12)$$

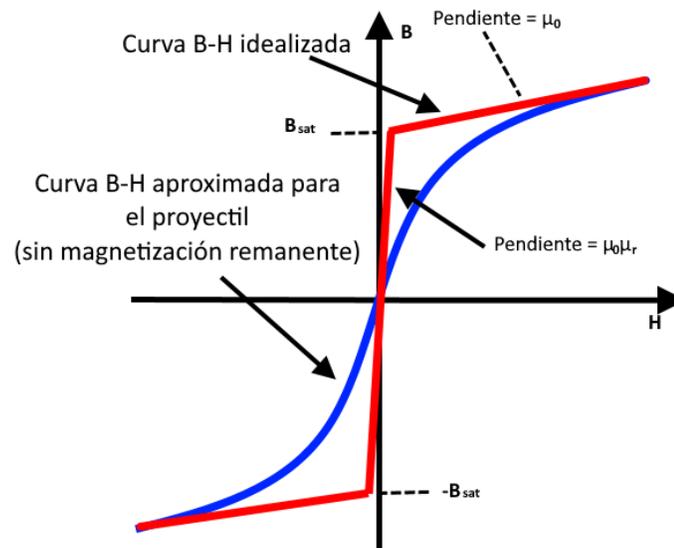


Figura 3.9: Saturación característica del proyectil (sin histéresis) generada con la Ecuación (3.12), en morado. Comparada con la versión idealizada de la misma, en rojo. Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, μ_r la permeabilidad relativa del material del proyectil, B_{sat} la densidad de campo magnético de saturación del proyectil, B la densidad de campo magnético en el proyectil, y H la intensidad del campo magnético generado por la bobina de lanzamiento.

4. La bobina de lanzamiento es un solenoide largo, cuya longitud l será mucho mayor a su diámetro.
5. Como puede verse en la [Figura 3.10](#), en el modelo se asume que los devanados de la bobina de lanzamiento están rodeados por una cubierta ferromagnética, que no es saturable y cuya permeabilidad es infinita. Al hacer esto, la única ruta

magnética diferente de cero, al analizar el sistema con la ley de Ampere será la región ocupada por el proyectil dentro de la bobina de lanzamiento y los espacios llenos de aire dentro de la misma.

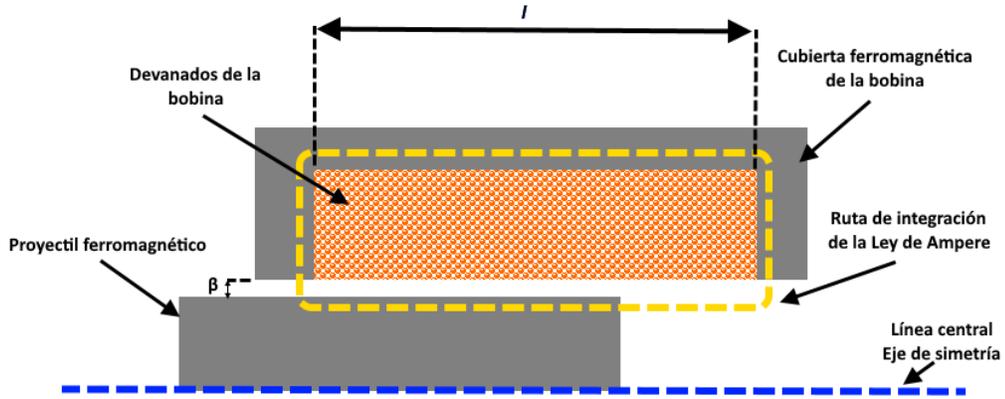


Figura 3.10: Vista esquemática longitudinal de la bobina donde se muestra la ruta de integración para la ley de Ampere. l es la longitud de la bobina y β es el espacio de aire que resulta de la diferencia entre el radio de la apertura de la cubierta y el radio del proyectil.

6. La longitud del proyectil p será mayor a la longitud de la bobina l .
7. Se asume un espacio relleno de aire circular entre el proyectil y la cubierta ferromagnética en los extremos de la bobina, en los siguientes diagramas y ecuaciones, a la longitud de dicho espacio se le nombra β , como puede verse en la [Figura 3.10](#).
8. Solo tomó en cuenta la componente longitudinal B_z del campo magnético \mathbf{B} dentro de la bobina, originado por la circulación de un pulso transitorio de corriente a través ella, en adelante a variable se le tratará como un escalar con el nombre de B .
9. La componente radial del campo magnético dentro de la bobina del lanzador fue despreciada, dicha componente es capaz de generar corrientes superficiales en el proyectil que al interactuar con la corriente en la bobina tiende a frenar al proyectil.
10. Se ignoran las corrientes eléctricas inducidas sobre la superficie del proyectil y de la cubierta ferromagnética de la bobina, y también se ignora el efecto de la fricción entre el proyectil y el tubo del cañón,

Con la [Ecuación \(3.12\)](#) se calcula la magnetización del proyectil en función a la densidad del campo magnético B para las tres diferentes etapas de la posición del proyectil dentro de la bobina de lanzamiento/almacenamiento. Y con ella es posible conocer la presión ejercida S sobre el proyectil durante el disparo:

$$S = \int_0^M M(B) = \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (3.13)$$

La [Ecuación \(3.13\)](#) debe ser compatible con las coordenadas adecuadas seleccionadas en la [Ecuación \(3.6\)](#); es decir, se debe reescribir en términos del flujo magnético presente al interior del tubo del acelerador de reluctancia ϕ_{Lin} . Considerando que en un solenoide largo

$$B = \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2} \quad (3.14)$$

cuando la [Ecuación \(3.14\)](#) es sustituida en la [Ecuación \(3.13\)](#)

$$S = \int_0^M M(B) = \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (3.15)$$

Para expresar todas las contribuciones a la fuerza en la bobina de lanzamiento/almacenamiento en forma de un modelo lagrangiano, se debe incorporar en él el comportamiento eléctrico de los inductores que la constituyen sin tomar en cuenta los efectos del paso del proyectil ferromagnético por su interior ([Ecuación \(3.11\)](#)), y la fuerza actuando sobre el proyectil cuyo valor es encontrado multiplicando la presión ejercida sobre el proyectil ([Ecuación \(3.15\)](#)), por el área de sección transversal de la bobina:

$$\begin{aligned} \ell_L = & N_{Lin} \phi_{Lin} q_{Lin} + N_{Lex} \phi_{Lex} q_{Lex} - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0 \pi (a_e^2 - a_i^2)} (\phi_{Lex} - \phi_{Lin})^2 \\ & - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0 \pi a_i^2} \phi_{Lin}^2 + \pi a_i^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \\ & \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.16)$$

3.2.3 Integración de la bobina de lanzamiento/almacenamiento al modelo matemático de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento tipo *ringer*

La [Figura 3.11](#) es una versión modificada de la [Figura 3.2](#), donde se muestra la bobina de lanzamiento/almacenamiento montada en un circuito *ringer*. En este caso se añadió un núcleo móvil que representa al proyectil ferromagnético, y los resistores R_1 y R_2 se añadieron para incluir los efectos de la suma de las resistencias en serie equivalentes del banco de capacitores de almacenamiento C_a y del inductor L_1 , y la resistencia en serie equivalente del inductor L_2 respectivamente. En este caso q_L es la corriente que es común a ambos inductores de almacenamiento L_1 y L_2 , cuya inductancia mutua es L_{12} . La función de L_1 o L_2 puede asignársele a cualquiera de los inductores L_{in} o L_{ex} de manera indistinta, de acuerdo con los requerimientos del diseñador.

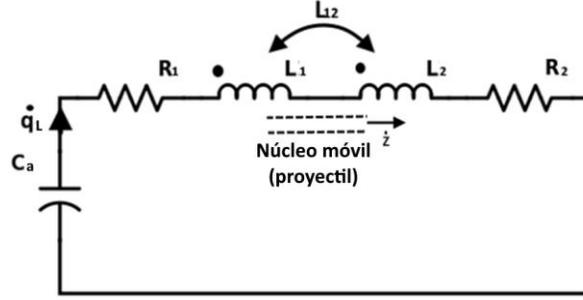


Figura 3.11: Circuito equivalente de la bobina de lanzamiento/almacenamiento montada en un sistema de almacenamiento tipo *ringer*, antes de que el diodo D comience a conducir. En la imagen se incluyen las pérdidas resistivas y el efecto del paso del proyectil ferromagnético por el interior de la bobina.

El lagrangiano de un lanzador electromagnético \mathcal{L}_{LEM} , en términos generales, se expresa como [6]

$$\mathcal{L}_{LEM} = T_m + T_e - U_e - U_m \quad (3.17)$$

donde T_m es la energía cinética mecánica que a la salida del proyectil ferromagnético de la bobina de lanzamiento es igual a ϵ_K , T_e es la energía “cinética” magnética, y U_e la energía potencial eléctrica que inicialmente tiene el valor de ϵ_E y U_m la energía potencial magnética. En esta configuración, las contribuciones a la energía “cinética” eléctrica T_e y a la energía potencial magnética U_m provienen solamente de la bobina de lanzamiento y ya están incluidas en la [Ecuación \(3.16\)](#).

El lagrangiano del sistema para esta etapa de operación \mathcal{L}_1 , incluyendo el aporte de la energía potencial eléctrica U_e del banco de capacitores de almacenamiento C_a (el tercer término del lado derecho de la ecuación, expresado en términos de la carga eléctrica presente en el circuito q_L), y la energía cinética T_m desarrollada por el proyectil (en el sexto término del lado derecho de la ecuación, donde m es la masa del proyectil), se muestra en la [Ecuación \(3.18\)](#). En la [Ecuación \(3.18\)](#) los términos N_1 y ϕ_1 , y N_2 y ϕ_2 representan el número de vueltas y el flujo magnético en el inductor al que se le haya asignado la función de L_1 y L_2 respectivamente.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_1 = & (N_1\phi_1 + N_2\phi_2)q_L - \frac{q_L^2}{2C_a} - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0\pi(a_e^2 - a_i^2)} (\phi_{Lex} - \phi_{Lin})^2 \\ & - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0\pi a_i^2} \phi_{Lin}^2 + \pi a_i^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \quad (3.18) \\ & \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \end{aligned}$$

En este caso, para expresar las fuerzas generalizadas f_{qL} solo se tomaron en cuenta las pérdidas eléctricas (las pérdidas mecánicas originadas por la fricción del proyectil con el tubo del lanzador se consideraron despreciables, pero pueden incluirse en un modelo simplemente encontrando un cociente de fricción para el conjunto

proyectil-tubo, y multiplicar dicho cociente por la velocidad del proyectil \dot{z} , para sumar el resultado a la expresión de las fuerzas generalizadas [7]) se dedujo la [Ecuación \(3.19\)](#)

$$f_{QL} = (R_1 + R_2)\dot{q}_L \quad (3.19)$$

Cuando la integral de acción es minimizada mediante la aplicación del formalismo lagrangiano

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_i} = f_i \quad (3.20)$$

donde x_i es cada una de las variables dinámicas (flujos magnéticos, cargas eléctricas, y posición) en el sistema y f_i las fuerzas generalizadas asociadas a la variable dinámica correspondiente. Para ambos casos, cuando la función de L_1 se le asigna a la sección externa de la bobina, o cuando la función de L_1 se le asigna a la sección interna. Las ecuaciones resultantes de movimiento resultantes son:

$$(R_1 + R_2)\dot{q}_L = \frac{1}{C_a} q_L - N_1 \phi_1 - N_2 \phi_2 \quad (3.21)$$

$$N_{Lex} \dot{q}_L = \frac{l + 2\beta}{\mu_0 \pi (a_e^2 - a_i^2)} (\phi_{Lex} - \phi_{Lin}) \quad (3.22)$$

$$N_{Lin} \dot{q}_L = \frac{l + 2\beta}{\mu_0 \pi (a_e^2 - a_i^2)} \left(\frac{a_e^2}{a_i^2} \phi_{Lin} - \phi_{Lex} \right) - M_0 \tanh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (3.23)$$

$$m\ddot{z} = \pi a_i^2 M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (3.24)$$

Después del primer cambio en la polaridad del voltaje entre las terminales del banco de capacitores de almacenamiento C_a , el diodo D comienza a conducir, y el circuito equivalente toma la forma mostrada en la [Figura 3.12](#). Las variables dinámicas del sistema son las mismas que en el caso anterior, excepto que ahora las cargas eléctricas presentes en cada inductor q_1 y q_2 son diferentes.

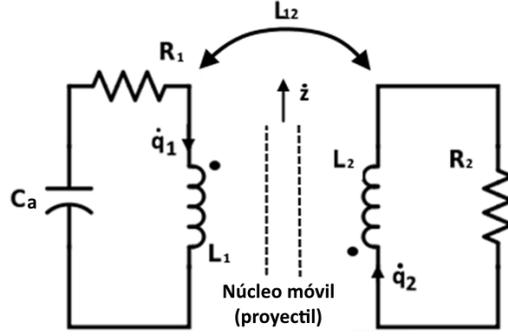


Figura 3.12: Circuito equivalente de la bobina de lanzamiento/almacenamiento montada en un sistema de almacenamiento tipo ringer, durante la segunda etapa de la operación de dicha configuración, cuando D está conduciendo.

El lagrangiano \mathcal{L}_2 del sistema para esta etapa de la operación es

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_1 = & N_1 \phi_1 \dot{q}_1 + N_2 \phi_2 \dot{q}_1 - \frac{q_1^2}{2C_a} - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0\pi(a_e^2 - a_i^2)} (\phi_{Lex} - \phi_{Lin})^2 \\ & - \frac{l + 2\beta}{2\mu_0\pi a_i^2} \phi_{Lin}^2 + \pi a_i^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \quad (3.25) \\ & \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases} \end{aligned}$$

y las fuerzas generalizadas f_{Q1} y f_{Q2} debidas a las pérdidas resistivas, donde \dot{q}_1 y \dot{q}_2 son las corrientes circulando a través de los inductores L_1 y L_2 son:

$$f_{Q1} = R_1 \dot{q}_1 \quad (3.26)$$

$$f_{Q2} = R_2 \dot{q}_2 \quad (3.27)$$

Las ecuaciones de movimiento resultantes son:

$$R_1 \dot{q}_1 = \frac{1}{C_a} q_1 - N_1 \phi_1 \quad (3.28)$$

$$R_2 \dot{q}_2 = -N_2 \phi_2 \quad (3.29)$$

$$N_{Lex} \dot{q}_{Lex} = \frac{l + 2\beta}{\mu_0\pi(a_e^2 - a_i^2)} (\phi_{Lex} - \phi_{Lin}) \quad (3.30)$$

$$N_{Lin} \dot{q}_{Lin} = \frac{l + 2\beta}{\mu_0 \pi (a_e^2 - a_i^2)} \left(\frac{a_e^2}{a_i^2} \phi_{Lin} - \phi_{Lex} \right) - M_0 \tanh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{\phi_{Lin}}{\pi a_i^2 M_0} \right) \quad (3.31)$$

$$\times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ l + p - z & \text{Saliendo} \end{cases}$$

Durante esta etapa, para expresar la fuerza desarrollada por el proyectil $m\ddot{z}$, la [Ecuación \(3.24\)](#) aún es útil.

3.3 El modelo implementado en Simulink.

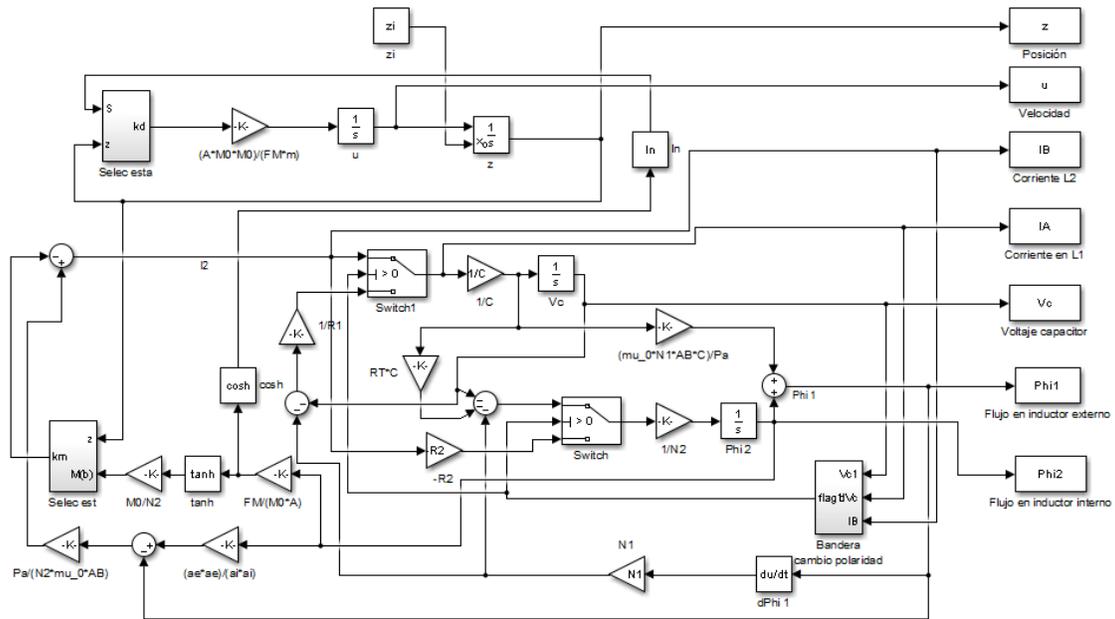


Figura 3.13: Implementación del modelo matemático del prototipo desarrollado en Simulink, para su simulación.

En la [Figura 3.13](#) se observa cómo se implementó el modelo matemático, cuyo desarrollo se muestra en la sección anterior de este trabajo de tesis, en el software *Simulink*, para ser simulado y así determinar la validez de dicho modelo al compararlo con los resultados experimentales obtenidos con el prototipo desarrollado, como se muestra en el Capítulo 5 de este trabajo. El modelo implementado tiene como salidas al espacio de trabajo de Matlab a la posición del proyectil dentro de la bobina de lanzamiento/almacenamiento “z”, la velocidad desarrollada por el proyectil “u”, la corriente en los inductores L_1 y L_2 de la bobina de lanzamiento “IA” e “IB” respectivamente, el voltaje en el capacitor del sistema de almacenamiento “Vc”, y los flujos magnéticos al interior de los inductores L_1 y L_2 de la bobina de lanzamiento “PHI1” y “PHI2” respectivamente.

En la [Figura 3.14](#) se observa al subsistema “Bandera cambio polaridad”, cuya función es análoga a la que hace el diodo *D* del *ringer* físicamente construido, y cuyas

entradas son el voltaje en el capacitor del *ringer* “ $Vc1$ ”; la derivada del voltaje del capacitor del *ringer*, que es proporcional a la corriente circulando a través de L_1 , y la corriente a través del inductor L_2 “ IB ”, y cuya salida “*flag*” determina qué conjunto de ecuaciones se debe utilizar para la correspondiente etapa del funcionamiento del circuito..

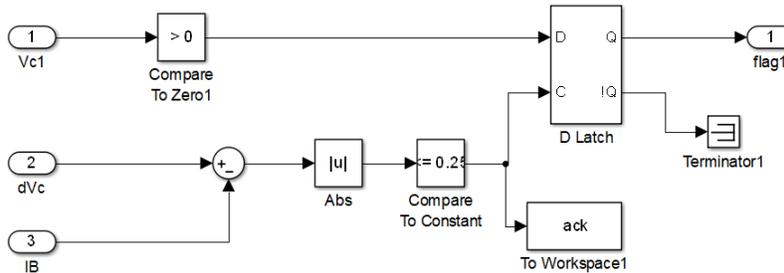


Figura 3.14: Subsistema “Bandera cambio de polaridad” que determina en qué etapa está trabajando el sistema de almacenamiento tipo *ringer* del prototipo.

En la [Figura 3.15](#) se muestra al subsistema “*Selec est*”, cuya función es determinar cuál es el efecto de la posición del proyectil ferromagnético sobre el flujo magnético, y por lo tanto sobre la corriente, en el inductor L_2 . Sus entradas son la posición del proyectil “ z ”, y la magnetización del proyectil “ $M(b)$ ” (Ecuación (3.12)), y su salida es “ km ”, con la que se selecciona las ecuaciones que determinarán el comportamiento de la corriente el inductor L_2 durante la etapa correspondiente del desplazamiento del proyectil ferromagnético al interior de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.

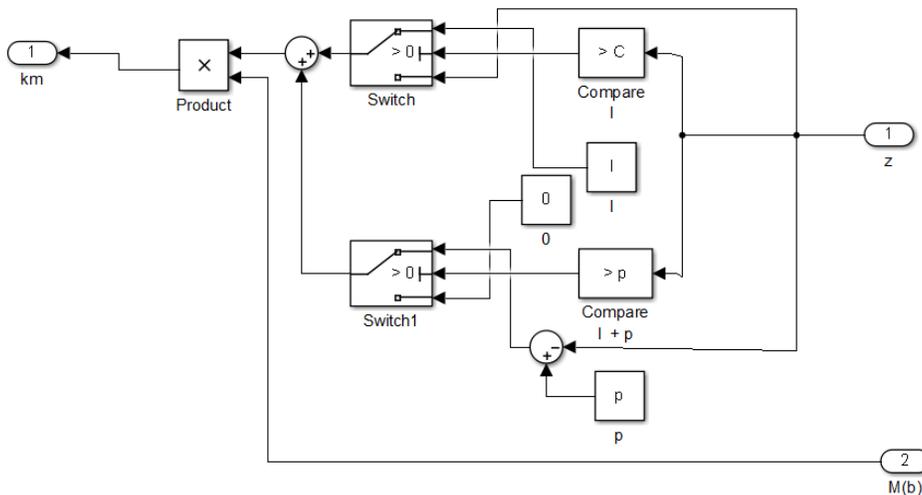


Figura 3.15: Subsistema “*Selec est*” encargado de determinar el efecto de la posición del proyectil ferromagnético sobre la corriente en el inductor L_2 .

En la [Figura 3.16](#) se muestra al subsistema “*Selec esta*” encargado de determinar en qué estado se encuentra el desplazamiento del proyectil ferromagnético “ z ”

(entrando, llenando, o saliendo de la bobina de lanzamiento), y cómo afecta esto a la dirección y la magnitud de la fuerza ejercida sobre el proyectil. Sus entradas son la posición del proyectil dentro de la bobina “ z ” y la presión ejercida sobre el proyectil “ S ” (Ecuación 3.15), su salida es “ kd ”, que determina cuál es la dirección y la magnitud de la fuerza que se ejerce sobre el proyectil durante la correspondiente etapa del desplazamiento del mismo. Este subsistema también se encarga de detener la simulación, si se determina que el proyectil ha salido completamente de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.

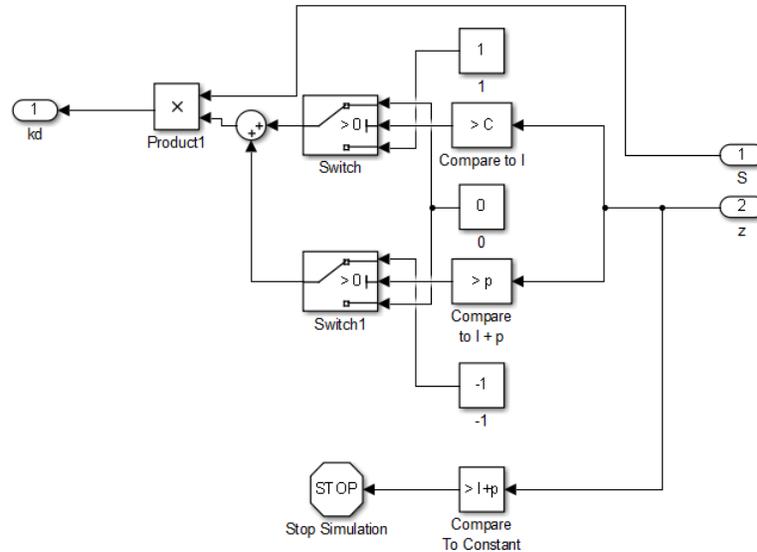


Figura 3.16: Subsistema “*Selec esta*”, encargado de determinar la magnitud y la dirección de la fuerza ejercida sobre el proyectil ferromagnético.

3.4 Conclusiones acerca del sistema de almacenamiento desarrollado

- El obstáculo más grande para integrar a un acelerador de reluctancia en un sistema de almacenamiento capacitivo-inductivo, ha sido la resistencia añadida de un conjunto de inductores de almacenamiento externo. Con este sistema de almacenamiento se ha conseguido evitar esas pérdidas resistivas.
- Con el sistema de almacenamiento desarrollado se espera mejorar la eficiencia de conversión de un acelerador de reluctancia mediante la compresión del pulso de corriente.
- A partir de este sistema de almacenamiento, y el modelo matemático desarrollado para el mismo, podrían diseñarse y crearse más tipos de configuraciones de lanzadores electromagnéticos con sistemas de almacenamiento inductivo, e inductores acoplados magnéticamente.

Capítulo 4

El diseño e implementación de un acelerador de reluctancia portátil

Como pudo verse, en el Capítulo 1 de este trabajo de tesis, se determinó que el acelerador de reluctancia con característica de portabilidad tuviera las siguientes características para cumplir con el objetivo general de este trabajo de tesis:

- Que tuviera una eficiencia de conversión de al menos el 3 %.
- Que lanzara proyectiles con características similares a las de un clavo de 3 in. Es decir, un proyectil hecho de hierro o acero con una longitud de entre 70 mm y 80 mm, un peso de entre 4 g y 5 g, y un diámetro de entre 3 mm y 4 mm.
- Que los proyectiles fueran lanzados a una velocidad de alrededor de 35 m/s.

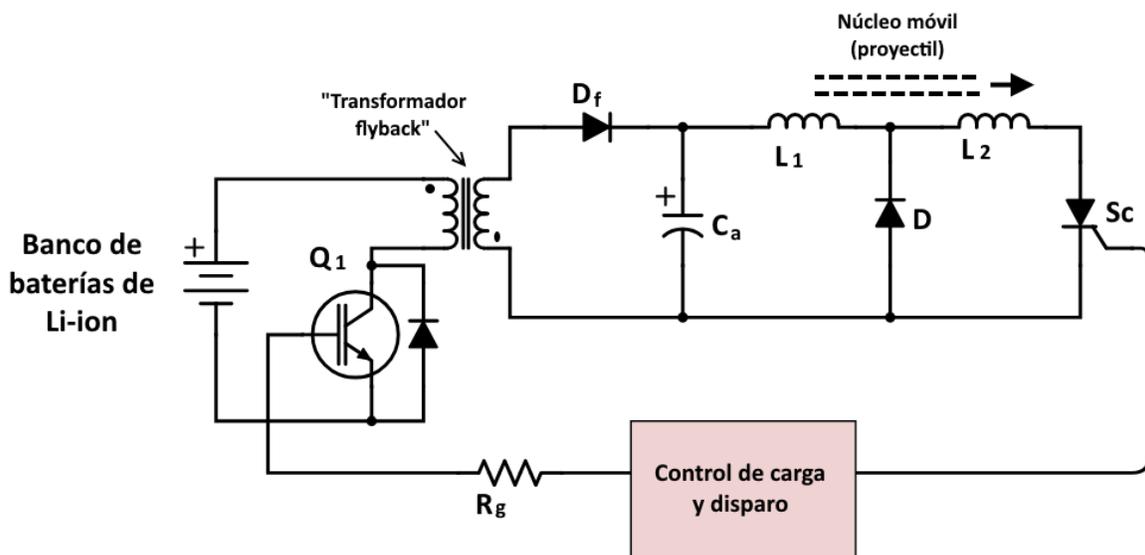


Figura 4.1: Diagrama esquemático simplificado del prototipo.

Y en los Capítulos 2 y 3, como puede verse en la [Figura 4.1](#), se determinó que para poder construir un acelerador de reluctancia con dichas características, el lanzador debía estar conformado por los siguientes componentes:

- Que tuviera como fuente primaria de suministro de energía eléctrica a un banco de baterías de iones de litio.
- Que utilizara como etapa elevadora de tensión eléctrica a un convertidor tipo *flyback*.

- Que se usaran SCRs como interruptores de disparo.
- Que empleara un sistema de almacenamiento de energía híbrido capacitivo-inductivo.

A continuación se detallan el diseño, la implementación, y las características de los componentes empleados para construir un prototipo que cumpliera con las características impuestas por el objetivo general de este trabajo de tesis.

4.1 El banco de baterías empleado.

Como fuente de suministro primaria de energía eléctrica se empleó a un banco de baterías de iones de litio, con una capacidad nominal C_{nom} de 1300 mAh y un voltaje nominal V_{nom} de 3.68 V, modelo ICR18650 HA1 fabricadas por LG, con las características mostradas en la tabla 4.I.

Estas baterías se emplearon en un arreglo pre armado de diez baterías conectadas en serie paralelo, como se muestra en la [Figura 4.2](#), este arreglo, en base a las características mostradas en la [Tabla 4.I](#), tiene un voltaje nominal de 18 V, con una corriente de descarga máxima de 30 A, y un voltaje de corte de 12.5 V.

Tabla 4.I: Características relevantes de las baterías empleadas en la fuente de suministro [115].

Variable	Condiciones	Especificación
Capacidad	Carga/descarga estándar	Nominal 1300 mAh Mínima 1200 mAh
Voltaje nominal	Promedio para descarga estándar	3.68 V
Carga estándar	Corriente constante Voltaje constante Condición final (corte)	650 mA 4.2 V 50 mA
Máximo voltaje de carga	-	4.2 V
Máxima corriente de carga	-	4000 mA
Descarga estándar	Corriente constante Voltaje final (corte)	260 mA 2.5 V
Descarga rápida	Corriente constante Voltaje final (corte)	10000 mA 2.5 V
Máxima corriente de descarga	Para carga continua	15000 mA
Peso	Máximo	46 g

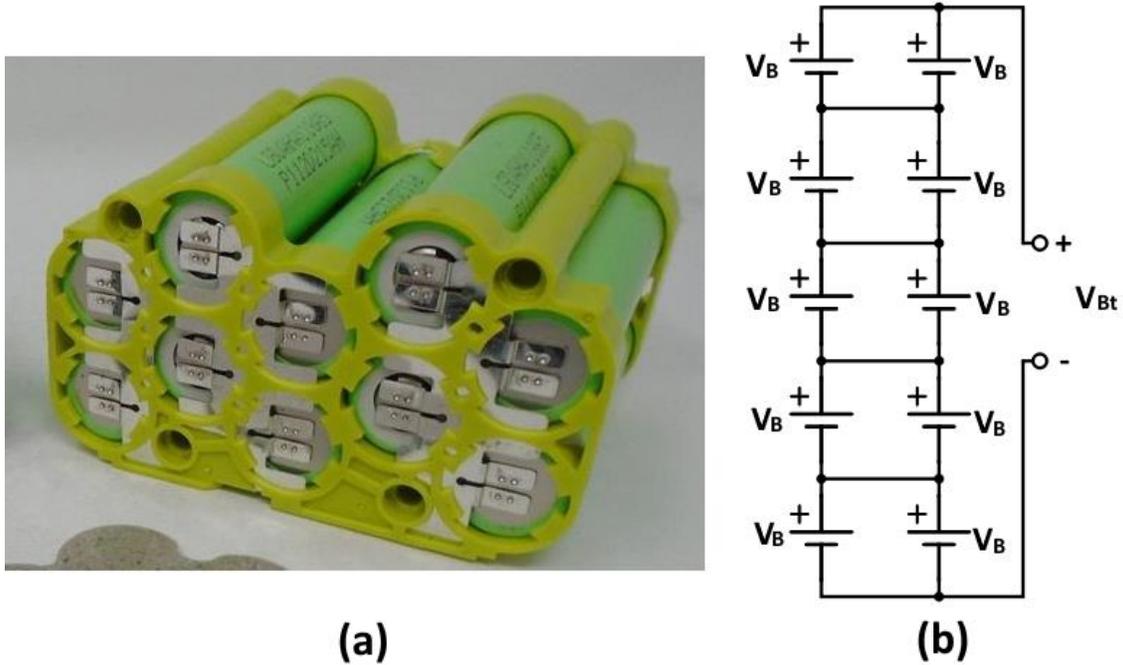


Figura 4.2: El banco de baterías empleado como fuente de suministro de energía eléctrica. (a) El aspecto físico del banco pre armado, (b) el circuito equivalente del banco de baterías, donde cada fuente V_B representa una batería individual ICR18650 HA1, y V_{Bt} la tensión en las terminales del banco de baterías.

De acuerdo con los datos brindados en la hoja de datos de esta batería [115], que tiene una forma aproximadamente cilíndrica, el diámetro de su base circular d_B es de aproximadamente 18.3 mm, y su altura h_B es de 65 mm. Por lo tanto, al emplear la [Ecuación \(4.1\)](#) se obtuvo la densidad de potencia de 279 Wh/L para el banco de baterías utilizado.

$$\rho_B = 4 \frac{V_{nom} C_{nom}}{\pi d_B^2 h_B} \quad (4.1)$$

La masa total del banco de baterías m_B fue de alrededor de 540 g, de la cual 460 g fue la contribución de las baterías en sí. Por lo tanto, al calcularla con la [Ecuación \(4.2\)](#), la densidad gravimétrica de energía (también denominada energía específica) ε_{EB} del banco de baterías, incluyendo el peso de las baterías, y el peso del soporte plástico en el que vienen colocadas, fue de 86.67 Wh/kg, un poco menor que el valor típico para una batería recargable de iones de litio.

$$\varepsilon_{EB} = \frac{V_{nom} C_{nom}}{m_B} \quad (4.2)$$

4.2 El elemento capacitivo del sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia.

Por sus características de densidad de energía y densidad de potencia [116], se tuvieron en cuenta tres posibles opciones para ser partes del elemento capacitivo del sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia portátil desarrollado: los capacitores de película plástica, los capacitores electrolíticos de aluminio, y los supercapacitores.

Los supercapacitores son, por mucho, de entre las tres opciones, la que tiene una mayor densidad de energía (hasta 15.91 J/cm^3) [35], ya que su capacitancia suele estar en el orden de los Farads, y su densidad de potencia es la menor, de hasta 43.3 W/cm^3 . Su uso ha sido bien estudiado en sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia y toleran bien la descarga a corrientes típicas para este tipo de sistemas (en el orden de los kA). Sin embargo se descartó su inclusión en el sistema de almacenamiento híbrido desarrollado, ya que sus valores tan altos de capacitancia hacen que la frecuencia de oscilación del *ringer* ω_R (véase Anexo C), sea demasiado pequeña como para poder llevar a cabo la compresión de un pulso de corriente con una bobina de lanzamiento/almacenamiento dada, además que como usualmente manejan voltajes nominales por debajo de las decenas de volts, es necesario hacer arreglos en serie de varios capacitores para poder tener el voltaje inicial V_{Ci} requerido para cada disparo.

Los capacitores de película plástica han sido los más utilizados para aplicaciones que involucran sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia, usualmente con capacitores hechos a medida para una determinada aplicación [117]. Hasta fechas recientes, el valor de su densidad de energía aumentaba año con año, sin embargo, parece que esa tendencia ha terminado o se ha ralentizado en épocas recientes [24]. Su densidad de energía es menor que la pueden llegar a alcanzar los capacitores electrolíticos de aluminio y los supercapacitores ($\sim 0.5 \text{ J/cm}^3$) [116], ya que es raro encontrarlos con valores de capacitancia por encima de los $100 \mu\text{F}$. Sin embargo, su densidad de potencia ($\sim 60 \text{ kW/cm}^3$) es mucho mayor que la que pueden alcanzar los capacitores electrolíticos de aluminio y aún mayor que la de los supercapacitores [116]; estos datos son válidos para los capacitores comercialmente disponibles para aplicaciones de electrónica de potencia, en el caso de los capacitores hechos a modo para aplicaciones basadas en sistemas eléctricos energizados por pulsos de alta potencia la densidad de potencia suele ser similar, pero la densidad de energía suele ser mayor que la de los capacitores para aplicaciones de electrónica de potencia [116]. Su resistencia en serie equivalente, y su inductancia en serie equivalente suelen ser menores que en los capacitores electrolíticos, su corriente de fuga en la presencia de sobrevoltaje suele ser de una orden de magnitud menor que la de un capacitor electrolítico de película plástica [118]. Y al ser no polarizados no presentan inconvenientes si trabajan con tensiones eléctricas que cambien de polaridad, como los pulsos que se presentan del lado del inductor L_1 de un *ringer*.



Figura 4.3: Banco de capacitores de película plástica con una capacitancia nominal de $400 \mu\text{F}$, empleado en diversos bancos de prueba durante la elaboración de este proyecto de tesis.

En términos generales, los capacitores de película plástica parecen ser la mejor opción para integrarse en el sistema de almacenamiento de energía de un acelerador de reluctancia, en la [Figura 4.3](#) puede verse un banco de capacitores de película plástica que se utilizó en diversos bancos de prueba durante el desarrollo de este trabajo de tesis, sin embargo, se decidió que el elemento capacitivo del sistema de almacenamiento estuviera compuesto solo por un capacitor, por lo que se decidió no usar capacitores de película plástica.

Los capacitores electrolíticos de aluminio suelen tener características intermedias en cuanto a las densidades de energía ($\sim 0.1 \text{ J/cm}^3$) y potencia ($\sim 1.8 \text{ kW/cm}^3$) [116], con respecto a los capacitores de película plástica, su resistencia en serie equivalente suele ser mayor que la de las otras dos opciones, aunque para el rango de las capacitancias y voltajes nominales que suelen emplearse para aceleradores de reluctancia (capacitancias mayores a $100 \mu\text{F}$ a voltajes en el orden de los cientos de volts) este parámetro se sitúa en el orden de los $\text{m}\Omega$ [119], que puede resultar aceptable para este tipo de aplicaciones.

Los principales problemas potenciales más importantes que pueden presentarse si se emplean capacitores de electrolíticos de aluminio en el sistema de almacenamiento de un acelerador de reluctancia son que la vida útil de estos capacitores, que de por sí menor que la de las otras opciones disponibles, tiende a disminuir al ser empleados en sistemas eléctricos alimentados por pulsos de alta corriente, además al estar polarizados las inversiones en la polaridad de la tensión entre sus terminales pueden llegar a dañar al capacitor, y la corriente de fuga del capacitor se incrementa en gran medida al polarizarlo inversamente, como puede verse en el circuito equivalente de un capacitor electrolítico de aluminio que se muestra en la [Figura 4.4](#) [119], lo que puede incidir negativamente en su eficiencia de conversión.

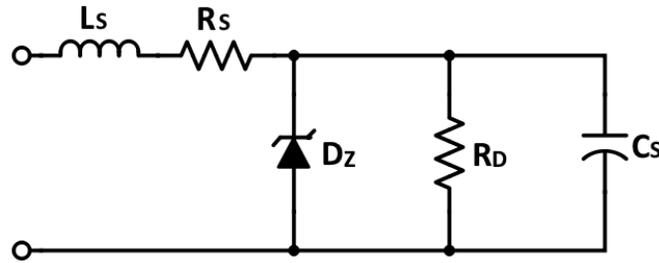


Figura 4.4: Circuito equivalente de un capacitor electrolítico de aluminio. En este circuito C_S es la capacitancia equivalente del capacitor, L_S y R_S son la resistencia e inductancia en serie equivalente del capacitor, R_D es la resistencia de descarga del capacitor que modela el comportamiento de la corriente de descarga del capacitor bajo condiciones de voltaje y polarización normales, y D_Z se encarga de modelar el rápido incremento de la corriente de descarga del capacitor bajo condiciones de sobrevoltaje y de polarización inversa.

En la [Figura 4.5](#) se muestra una configuración encontrada en [120] para poder trabajar con capacitores electrolíticos con voltajes que cambien de polaridad, como los que experimentan los capacitores que se emplean el sistema de almacenamiento de un acelerador de reluctancia. Esto se logra conectando en serie dos capacitores electrolíticos con capacitancias C_{E1} y C_{E2} entre sus terminales negativas, y haciendo que las terminales positivas de cada capacitor funjan como las terminales de un capacitor no polarizado con una capacitancia equivalente C_{Eq} , cuya capacitancia puede calcularse empleando la [Ecuación \(4.3\)](#).

$$C_{Eq} = \frac{C_{E1} + C_{E2}}{C_{E1}C_{E2}} \quad (4.3)$$

Es recomendable que los capacitores que se conecten en esta posición tengan las mismas características, y de preferencia que hayan sido fabricados en el mismo lote por el mismo fabricante ya que, al estar conectados en serie los capacitores, se necesita equalizar el voltaje entre ellos, y mientras más diferentes sean sus características, más complejo deberá ser el sistema de equalización del bando de capacitores.

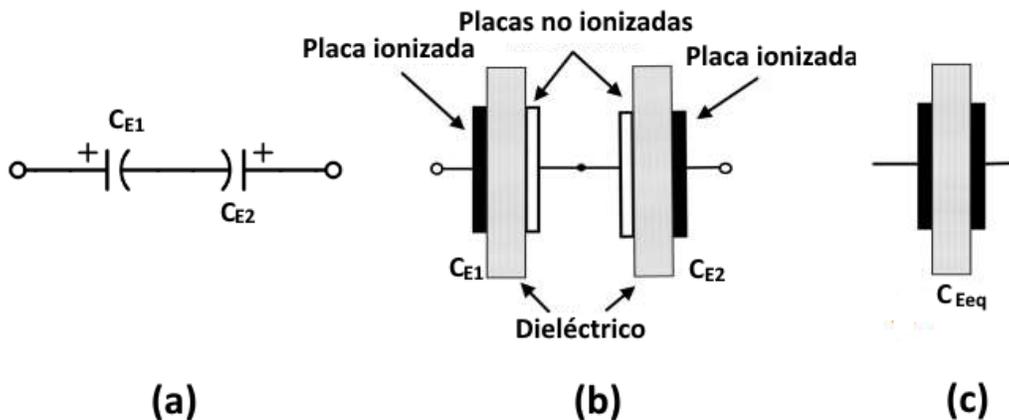


Figura 4.5: Elaboración de un capacitor no polarizado a partir de un par de capacitores electrolíticos de aluminio. (a) Circuito equivalente; (b) diagrama de la conexión de las placas de los capacitores electrolíticos; (c) capacitor equivalente no polarizado.

Esta forma de conectar los capacitores para poder utilizarlos en aplicaciones donde se presente una reversión en la polaridad de la tensión entre sus terminales, se puso a prueba en forma de un banco de 26 de estos módulos, que puede verse en la [Figura 4.6](#), conformados por dos capacitores de aluminio electrolíticos con una capacitancia nominal de $33 \mu\text{F}$, con una tensión máximo nominal de 250 V. El banco de capacitores resultantes tuvo una capacitancia medida entre sus terminales de $408 \mu\text{F}$ y una resistencia en serie equivalente de $90 \text{ m}\Omega$.



Figura 4.6: Vista superior y vista lateral del banco de capacitores electrolíticos de aluminio, conectados como se sugiere en [120].

Como puede verse en la [Figura 4.7](#), durante la reversión de la polaridad del voltaje entre las terminales de este banco de capacitores, al incluirse en un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento tipo *ringer* con un conjunto adicional de inductores de almacenamiento, se obtuvo un error estimado de -31% en el valor pico negativo para la tensión en el banco de capacitores con respecto al valor estimado mediante simulaciones, aunque no se llegó a determinar si la diferencia era debida algún problema inherente a la forma en que fue conectado el banco de capacitores, pero el hecho de que la parte positiva de la forma de onda del voltaje en el banco de capacitores haya sido prácticamente igual a lo predicho por el modelo, hace que esta posibilidad sea menos probable.

Finalmente se decidió no utilizar esta opción para el prototipo final, ya que por lo menos requiere de dos capacitores para funcionar, y cuando se conectan como se mostró en la [Figura 4.5](#), su resistencia en serie equivalente R_s se duplica (asumiendo que ambos capacitores son iguales), y si se quieren reducir las pérdidas resistivas derivadas de este hecho se necesita conectar varios módulos de dos capacitores en paralelo para reducir su resistencia en serie equivalente R_s , con lo que puede llegar a aumentar en demasía la masa y el volumen del sistema.

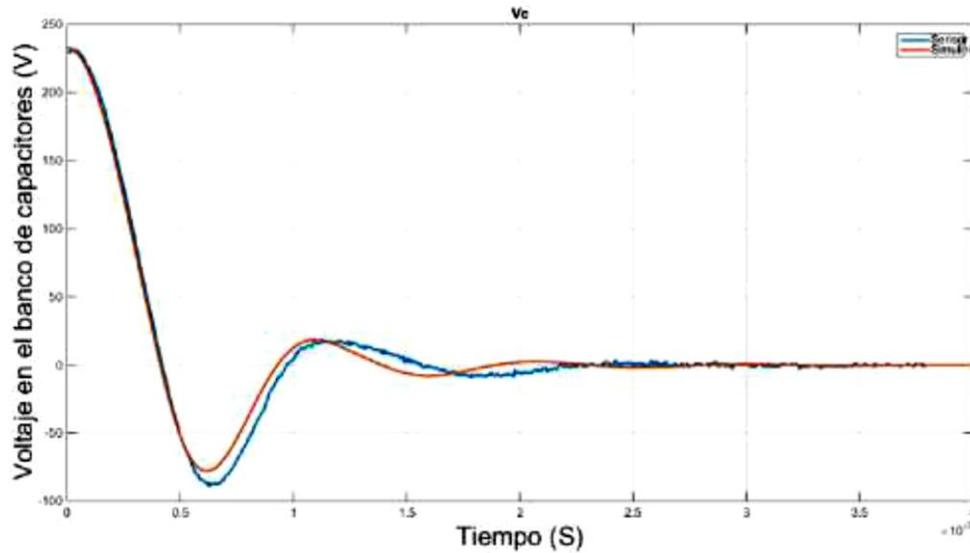


Figura 4.7: Formas de onda del voltaje entre las terminales del banco de capacitores electrolíticos conectados para obtener un capacitor no polarizados en un ringer. En rojo se observa la forma de onda esperada obtenida mediante simulaciones, y en azul la forma de onda del voltaje medida. Se observa que la magnitud del voltaje pico negativo medido fue un 31 % mayor que los esperado.

Finalmente se decidió utilizar como elemento capacitivo del sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia desarrollado para este trabajo de tesis, a un solo capacitor electrolítico, ya que se estimó que una capacitancia en el orden de los mF, y un voltaje nominal de 600 V (típicos en un capacitor electrolítico individual de gran tamaño [118]) permitiría conseguir la energía necesaria para cumplir con los requerimientos impuestos por el objetivo general de este trabajo de tesis. El capacitor empleado, que puede verse en la [Figura 4.8](#), fue un capacitor electrolítico de aluminio con una capacitancia nominal de 1.5 mF pero con una capacitancia real de aproximadamente 1.6 mF, una resistencia en serie equivalente R_S de 20 m Ω , un voltaje máximo nominal de 400 V, y una masa de 560 g; como se verá en el siguiente capítulo, no se advirtió un efecto discernible provocado por el aumento de la corriente de fuga durante el periodo de la polarización en inversa del capacitor durante la realización de las pruebas con el prototipo desarrollado.

La capacitancia del capacitor seleccionado parece apropiada para la aplicación desarrollada ya que, de acuerdo a las características del lanzamiento del proyectil (masa de ~ 5 g y velocidad de salida de al menos 35 m/s), se espera que este desarrolle una energía cinética ϵ_K de 3.0625 J y, de acuerdo con lo planteado en el objetivo general de este trabajo de tesis, una eficiencia de conversión η_{esp} del 3%, o expresada en forma decimal de 0.03, con un voltaje nominal del capacitor V_{NC} de 400 V por lo que la capacitancia mínima C_{min} requerida por un lanzador con esas características puede calcularse empleando la [Ecuación \(4.4\)](#), con la que se obtiene un resultado de 1.27 mF, bastante cercano al valor de 1.5 mF del capacitor seleccionado, lo que garantiza una

frecuencia de oscilación del *ringer* ω_R cercana al valor mínimo (véase Anexo C), lo que reduce el impacto del efecto suckback sobre la eficiencia de conversión η .

$$C_{min} = 2 \frac{\epsilon_K}{\eta_{esp} V_{NC}^2} \quad (4.4)$$



Figura 4.8: Elemento capacitivo del sistema de almacenamiento desarrollado. Conectados a sus terminales pueden verse los dispositivos de disparo.

4.3 La etapa elevadora de tensión del acelerador de reluctancia.

En el Capítulo 2 de este documento se definió que la opción más apropiada para hacer la función de la etapa elevadora de tensión de un acelerador de reluctancia portátil era un convertidor *flyback* convencional, por su bajo número de componentes y el aislamiento galvánico entre su entrada y su salida.

Pese a que los convertidores *flyback* trabajando en modo discontinuo usan inductores de menor tamaño que sus equivalentes que trabajan en modo continuo, y eso puede ser un factor importante para mejorar la portabilidad del sistema, se decidió que el convertidor *flyback* empleado trabajara en modo continuo para que las corrientes picos en el dispositivo de conmutación y en el diodo de salida fueran relativamente bajas [121], ya que en un *flyback* trabajando en modo discontinuo estos parámetros pueden llegar a ser hasta del doble que en su equivalente en modo continuo [122], por lo que a veces se recomienda el uso de convertidores tipo *flyback* en modo discontinuo para aplicaciones por debajo de los 60 W [123]. Y al final se logró obtener un diseño relativamente compacto con un núcleo ETD29 para el “transformador *flyback*”, cuyas dimensiones son 32 mm x 30.6 mm x 9.8 mm.

El *flyback* se diseñó para elevar una tensión de entrada V_{en} de 20 V hasta una salida V_{sal} de 860 V, con una corriente de entrada calculada I_{en} de 5.38 A, por lo que tiene una potencia de entrada P_{in} de aproximadamente 107 W.

Para un *flyback* de estas características, el tiempo de carga del elemento capacitivo de su sistema de almacenamiento puede calcularse con la [Ecuación \(4.5\)](#) [124], donde t_{carga} es el tiempo de carga; C_a es la capacitancia del sistema de almacenamiento en este caso de 1.5 mF; V_{sal} es el voltaje de salida del *flyback*, I_{en} y V_{en} son su corriente y su tensión de entrada respectivamente, y η_{fb} es la eficiencia mínima esperada para el *flyback*, que se estimó en un 80 %. Para este caso, el tiempo de carga estimado para el banco de capacitores de 1.5 mF hasta una tensión de 860 V es de 12.89 s, se ha visto que se puede hacer una aproximación lineal a la carga del banco de capacitores por parte de un *flyback*, por lo que se espera que el tiempo de carga del banco de capacitores hasta los 400 V máximos permitidos sea de aproximadamente de 6 segundos.

$$t_{carga} = \frac{C_a V_{sal}^2}{I_{en} V_{en} \eta_{fb}} \quad (4.5)$$

En la [Tabla 4.II](#) se muestran las características del *flyback* diseñado y construido, es de notarse que se diseñó para cargar al capacitor del sistema de almacenamiento hasta una tensión de 860 V, pero en la práctica el capacitor solo se cargó hasta niveles de tensión de 400 V.

Como interruptor de conmutación se eligió un IGBT IRG4PC60W capaz de trabajar con hasta 75 A en modo continuo y hasta 300 A en modo pulsante, es decir, puede manejar hasta 120 W en modo continuo y esta es una característica compatible con las características del diseño del convertidor *flyback* mostradas en la [Tabla 4.II](#), ya que la potencia de entrada estimada con las ecuaciones de diseño para el *flyback* fue de 107 W. El uso de este tipo de IGBT se recomienda hasta los 50 kHz en conmutaciones duras, sin embargo no se presentaron problemas apreciables al incluirlo en el prototipo con una frecuencia de conmutación de alrededor de 100 kHz. El driver empleado para controlar a este IGBT es un MIC4452, como también lo es el driver para activar las compuertas de los SCR de disparo.

Tabla 4.II: Características relevantes del *flyback* empleado como etapa elevadora de tensión para el sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia.

Variable	Abreviatura	Valor
Frecuencia de conmutación	f_s	100 kHz
Potencia de entrada	P_{en}	107 W
Voltaje de entrada	V_{en}	20 V
Corriente de entrada	I_{en}	5.38 A
Potencia de salida	P_{sal}	86 W
Voltaje de salida	V_{sal}	860 V
Corriente de salida	I_{sal}	100 mA
Eficiencia mínima esperada	η_{fb}	80 %

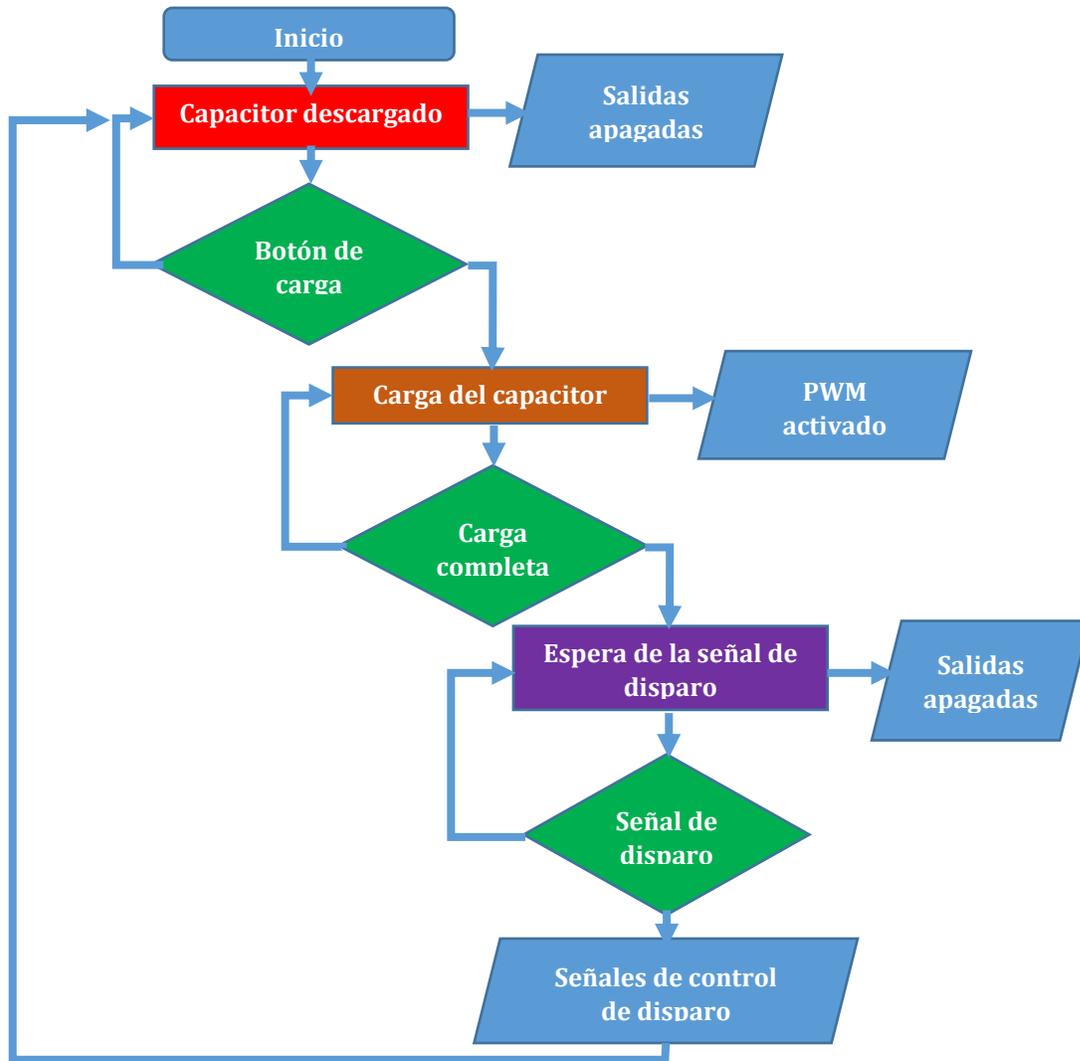


Figura 4.9: Diagrama de flujo del sistema de control de la carga y el disparo del acelerador de reluctancia desarrollado.

Para generar las señales de carga y disparo se utilizó un microcontrolador ATTINY85 fabricado por Microchip, trabajando a una frecuencia de 8 MHz, alimentado por el mismo banco de baterías usado para energizar al sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia, mediante el uso de un regulador de voltaje lineal a 5 V LM340T5. El diagrama de flujo del sistema de control de la carga y el disparo de este acelerador de reluctancia puede verse en la [Figura 4.9](#): el proceso de carga comienza cuando se acciona el botón de “Inicio de Carga”, y el microcontrolador seguirá enviando pulsos de 100 kHz hacia la compuerta del IGBT hasta que un comparador hecho con el amplificador operacional de instrumentación AD8552 envíe una señal al microcontrolador de que el banco de capacitores ha alcanzado el nivel de tensión deseado. Después de que se ha llegado al nivel de tensión deseado, el microcontrolador deja de enviar pulsos a la compuerta del IGBT, y si se acciona el botón “Disparo” el

microcontrolador envía un pulso que activa a los SCR de disparo haciendo que el capacitor se descargue sobre la bobina de lanzamiento.

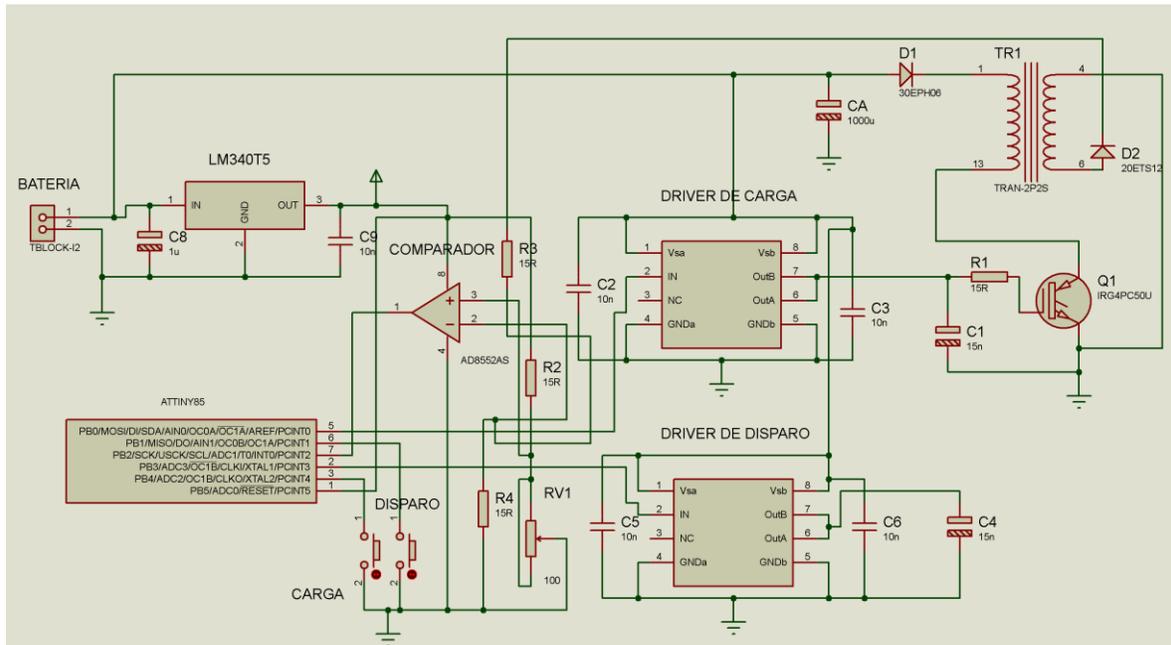


Figura 4.10: Diagrama del circuito de control de los pulsos de carga y de disparo para el acelerador de reluctancia.

En la [Figura 4.10](#) puede observarse el diagrama eléctrico del circuito implementado, los drivers de carga y de disparo son los MIC4452 que van conectados a las correspondientes terminales del ATTINY85, cuyas entradas, configuradas con sus resistencias *pull-up* activadas, están conectadas a dos *pushbuttons* normalmente abiertos, que hacen las veces de los botones de carga y disparo. La otra entrada del microcontrolador va conectada a la salida del AD852 conectado en modo comparador, que envía una señal alta a la entrada del microcontrolador cuando se alcanza el nivel de voltaje deseado en el cátodo del diodo del *flyback*, que va conectado a la terminal positiva del capacitor de almacenamiento, en la imagen representado como D2. En la imagen el “transformador *flyback*” se denota como TR1 y el dispositivo de conmutación, el IGBT IRG4PC60W ya mencionado, aparece denotado como Q1.

En la [Figura 4.11](#) se muestra el circuito de control de la carga y el disparo implementado para el acelerador de reluctancia, que fue montado en una placa de 10 cm x 8 cm, y tuvo un peso aproximado con todos sus componentes de 290 g. En la [Figura 4.12](#) se muestran las pistas de la placa de circuito impreso elaborada.

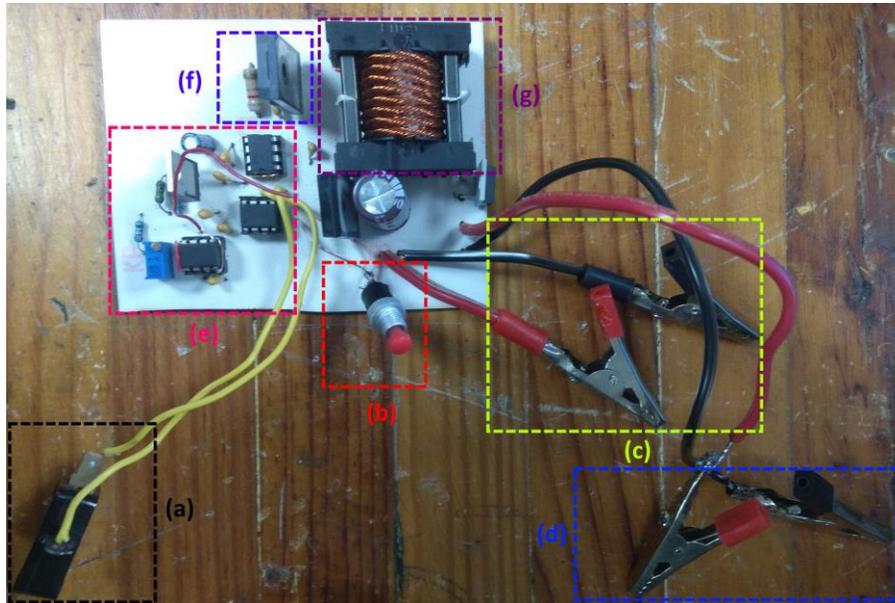


Figura 4.11: Circuito de carga y control construido, (a) botón “Disparo”, (b) botón “Inicio de carga”, (c) entrada de las terminales de la batería, (d) salidas hacia el banco de capacitores, (e) circuitería de control, (f) el dispositivo de conmutación Q_1 , en este caso un IGBT, del *flyback*, (g) inductores magnéticamente acoplados del *flyback*.

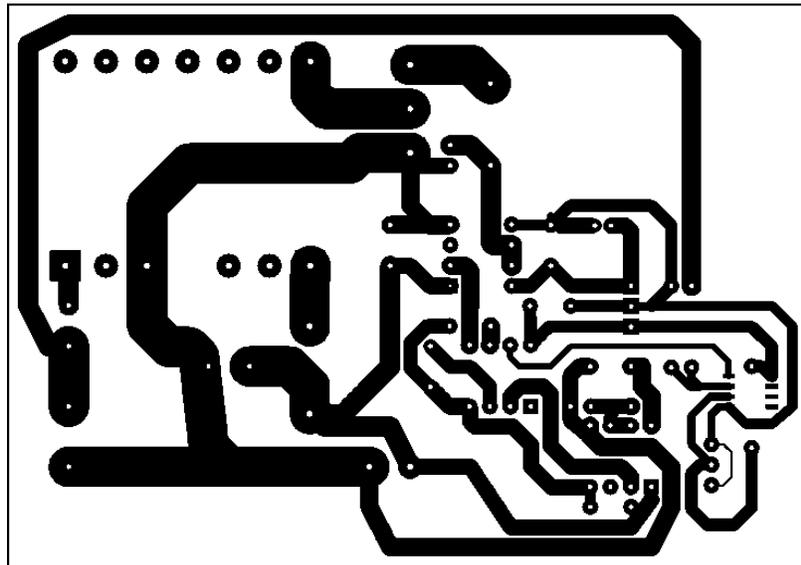


Figura 4.12: Pistas de la placa de circuito impreso del circuito de control de la carga y el disparo del acelerador de reluctancia.

4.4 Los interruptores de disparo

Se decidió emplear SCRs como interruptores de disparo para el prototipo construido ya que, como se verá en el siguiente capítulo, debido a la combinación de las características del elemento capacitivo del sistema de almacenamiento de energía junto con las de la bobina de lanzamiento/almacenamiento, las pérdidas por el efecto *suckback* son mínimas y se consideró que no ameritaban el uso de IGBTs para aplicar la estrategia de

la interrupción del pulso de corriente para minimizar las pérdidas por el efecto *suckback* (véase la Sección 2.4.1 de este trabajo de tesis).

Los interruptores de disparo se colocaron en tiras de cobre montadas sobre las terminales del capacitor del sistema de almacenamiento (como puede verse en la [Figura 4.7](#)), el uso de tiras de cobre está pensado para dares estabilidad estructural a los dispositivos de disparo, disminuir la resistencia serie equivalente del circuito y maximizar la magnitud de corriente que pueda transitar por el circuito sin llegar a fundir sus conductores. Los interruptores de disparo están conectados como se muestra en la [Figura 4.13](#), los dispositivos empleados y sus características se muestran en la [Tabla 4.III](#).

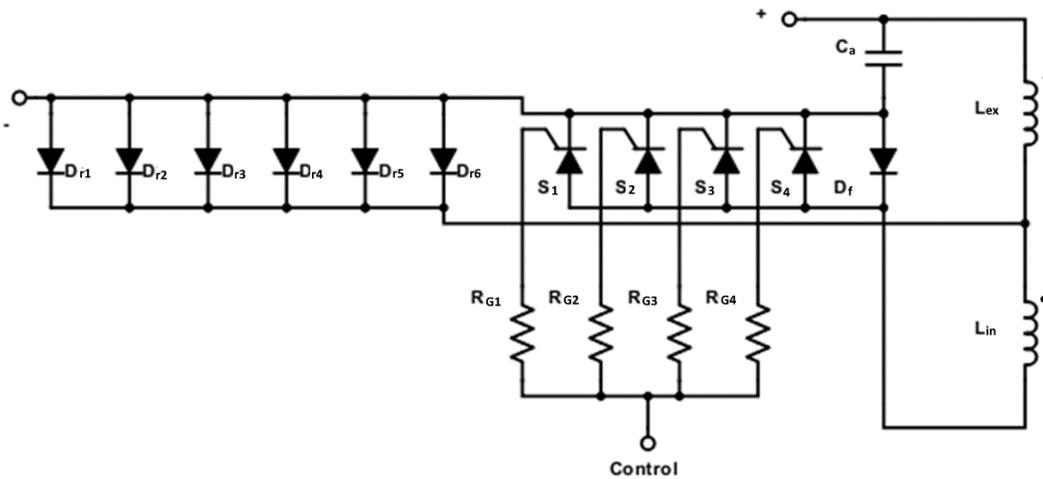


Figura 4.13: Dispositivos de disparo del prototipo construido. D_{r1-4} son los diodos del ringer que determinaran la etapa de funcionamiento del circuito, S_{1-4} son los SCRs que cumplen la función de interruptores de cierre que hacen que el capacitor C_a se descargue sobre la bobina de lanzamiento/almacenamiento constituida por L_{ex} y L_{in} , y D_f es un diodo de rodada libre que permite que la corriente siga fluyendo por la bobina de lanzamiento/almacenamiento aunque su dirección cambie (evitando así un sobrevoltaje entre las terminales de los SCRs).

Se consideró que los interruptores de disparo seleccionados serían suficientes para cumplir los requerimientos impuestos por el prototipo desarrollado, que incluyen poder manejar un capacitor inicialmente cargado a no más de 400 V, y una corriente en la bobina de lanzamiento/almacenamiento de alrededor de 800 A, como se verá en el siguiente capítulo de este trabajo de tesis.

Tabla 4.III: Características de los interruptores de disparo utilizados para el prototipo construido.

Elemento	Número de parte	Cantidad	Corriente pulsada máxima	Voltaje inverso máximo
Diodos del Ringer	R30120G2	6 (en paralelo)	1.8 kA	1.2 kV
Interruptores de cierre SCR	SK055R	4 (en paralelo)	2.6 kA	1 kV
Diodo de rodada libre	R30120G2	1	300 A	1.2 kV

4.5 La bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia

En la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia es donde se concentran las pérdidas del sistema, ya sea en forma de pérdidas resistivas en sus devanados, o como consecuencia del efecto *suckback* sobre la velocidad de salida del proyectil ferromagnético.

4.5.1 La selección del calibre del alambre de la bobina de lanzamiento/almacenamiento

Partiendo de un modelo simplificado donde se asume que toda la energía potencial en el proyectil al interior de la bobina de lanzamiento, se llegó a una expresión para la velocidad de salida de un proyectil lanzado u_{sal} por un acelerador de reluctancia que se muestra en la [Ecuación \(4.6\)](#) [125], donde ρ_P es la densidad del proyectil, μ_0 la permeabilidad magnética del vacío, χ_P la susceptibilidad magnética del proyectil, n es el número de vueltas por unidad de longitud en la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia, e I_L es el promedio de la magnitud del pulso de corriente.

$$u_{sal} = \sqrt{2\rho_P\mu_0\chi_P n^2 I_L^2} \quad (4.6)$$

Evidentemente esta es una simplificación que explica en términos muy generales las variables involucradas en la velocidad de salida que puede alcanzar el proyectil lanzado por un acelerador de reluctancia, no se tienen en cuenta las características geométricas de la bobina y su relación con las del proyectil ferromagnético y tampoco se toma en cuenta el efecto de la duración del pulso de corriente sobre la velocidad de salida. Sin embargo, sirve para ilustrar la principal dificultad para mejorar la eficiencia de conversión de un acelerador de reluctancia: el efecto de aumentar el número de vueltas por unidad de longitud n de su bobina de lanzamiento, sobre la velocidad de salida del proyectil ferromagnético.

De la [Ecuación \(4.6\)](#) se puede ver que la velocidad de salida desarrollada por el proyectil lanzado por un acelerador de reluctancia, depende en gran medida de la densidad y la susceptibilidad magnética del proyectil que, para los fines definidos en el objetivo general de este trabajo de tesis, han quedado en gran parte fijadas. Las otras dos variables que determinan en gran medida la velocidad de salida del proyectil de un acelerador de reluctancia son el número de vueltas por unidad de longitud de la bobina de lanzamiento y la magnitud del pulso de corriente con el que se energiza a la bobina de lanzamiento. El producto de ambas variables es el valor promedio de la intensidad del campo magnético H al interior de la bobina de lanzamiento con la dirección del eje z , [Ecuación \(4.7\)](#), por lo que en términos generales, para mejorar la velocidad de salida de un acelerador de reluctancia se debe incrementar al máximo el valor de H .

$$H_{max} = nI_{max} \quad (4.7)$$

Ya que, como se observa en la [Ecuación \(4.8\)](#), la resistencia en serie equivalente de un alambre R_{sw} es directamente proporcional al producto de la resistividad del material con el que esté hecho ρ_w por su longitud l_w , e inversamente proporcional a su área transversal A_w . En la práctica, el número de vueltas por unidad de longitud de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia n puede aumentarse reduciendo el diámetro del alambre empleado para elaborarla, lo que a su vez provoca que el área de sección transversal del alambre se reduzca, aumentando la resistencia en serie equivalente de la bobina de lanzamiento, el aumento de la resistencia en serie equivalente de la bobina de lanzamiento tiene el efecto de reducir la corriente promedio del pulso pasando a través de los devanados de la bobina de lanzamiento I_L .

$$R_{sw} = \rho_w \frac{A_w}{l_w} \quad (4.8)$$

Para el lanzador diseñado para este trabajo de tesis, se decidió que el inductor L_{in} de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada (véanse [Figuras 3.6](#) y [3.7](#)) asumiera el papel de inductor L_2 en el circuito tipo *ringer* (véase [Figura 3.1](#)) seleccionado para actuar como el sistema de almacenamiento de energía del acelerador de reluctancia desarrollado. Es decir, el inductor L_1 estaría conformado por las capas más externas del devanado de la bobina de lanzamiento/almacenamiento del prototipo desarrollado, y el inductor L_2 , en el que ocurre la compresión del pulso de corriente, estaría compuesto por las capas más internas. Esta decisión fue tomada bajo el razonamiento de que en L_2 es donde se realiza la compresión del pulso de corriente, lo que hace que su corriente promedio sea mayor que la del inductor L_1 , y de que el flujo magnético que afectaría directamente al proyectil ferromagnético sería el flujo ϕ_{Lin} generado por el inductor más interno L_{in} (véase [Figura 3.7](#)). Además, se decidió que el inductor L_2 estuviera dotado de un mayor número de vueltas que el inductor L_1 , ya que la resistencia en serie equivalente por cada vuelta hecha en la zona más interna del inductor es menor que la resistencia en serie equivalente en la zona más externa, porque la longitud promedio de cada vuelta en las capas más externas de la bobina de lanzamiento/almacenamiento es mayor que la de las capas internas.

Bajo estas premisas, para ver el efecto de la variación del número de vueltas por unidad de longitud n al variar el área de sección transversal del alambre que conforma a la bobina. Se simuló las velocidades de salida para varias bobinas de lanzamiento/almacenamiento, con el elemento capacitivo de 1.5 mF cargado a 400 V, variando el calibre del alambre empleado para construirlas, con siete capas de las cuales 5 le corresponden a la sección interna y 2 a la externa, con longitudes l que variaban desde un 55% hasta un 90% ($40 \text{ mm} < l < 65 \text{ mm}$) de la longitud del proyectil ferromagnético p (72 mm) con una masa de 5 g, que en este caso son proyectiles con las características aproximadas de los clavos de tres pulgadas con la cabeza y la punta recortadas. Se observó que la velocidad de salida u_{sal} desarrollada por los proyectiles, y por lo tanto la eficiencia de conversión η del acelerador de reluctancia, mejoraba si se aumentaba el área de sección transversal del alambre de las bobinas, pese a la

reducción del número total de vueltas en la bobina. En la [Figura 4.14](#) se muestra el resultado obtenido para los dos calibres de alambre más gruesos en el laboratorio, los calibres AWG #16 (diámetro de 1.29 mm) y AWG #14 (diámetro de 1.63 mm); por esta razón se decidió elaborar a la bobina de lanzamiento/almacenamiento con alambre AWG # 14.

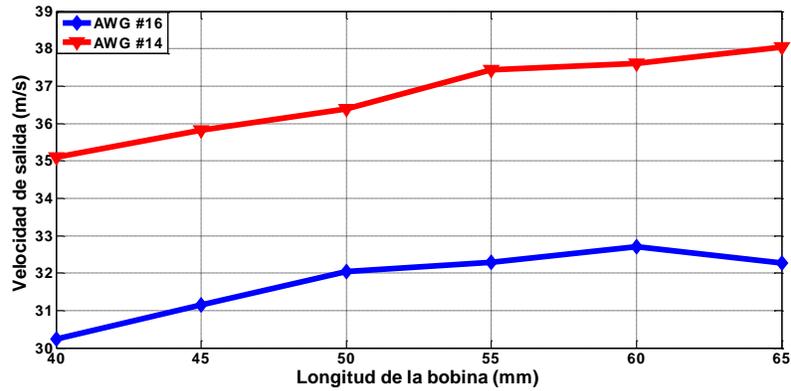


Figura 4.14: Comportamiento de las velocidades de salida alcanzadas por proyectiles acelerados por bobinas de lanzamiento elaboradas con alambre AWG #16 y alambre AWG #14.

Se seleccionó una longitud de 55 mm que en teoría permitiría obtener una eficiencia de conversión η del 3.57%, frente a la eficiencia de alrededor del 3.69% que se podría obtener con una longitud de 65 mm, como se muestra en la [Figura 4.15](#).

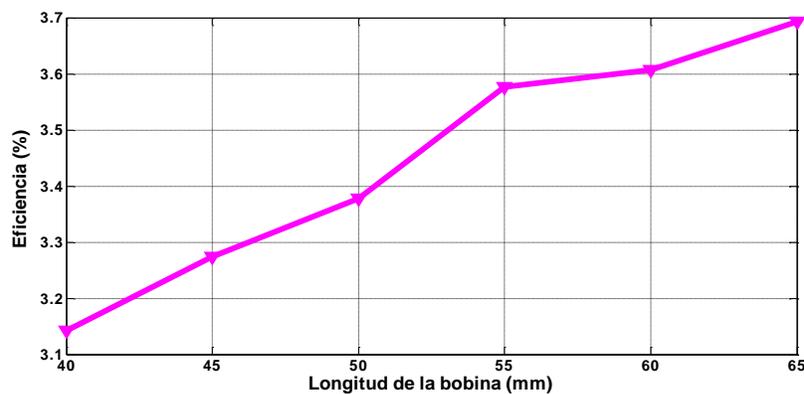


Figura 4.15: Eficiencias de conversión simuladas para distintas bobinas de lanzamiento/almacenamiento elaboradas con alambre AWG #14.

4.5.2 La elaboración de las cubiertas ferromagnéticas de las bobinas de lanzamiento.

Como se ha comentado con anterioridad, la cubierta ferromagnética de un acelerador de reluctancia se usa para concentrar mejor el flujo magnético al interior de la bobina de lanzamiento y así, en teoría, contribuir a mejorar su eficiencia de conversión [17]. Las primeras bobinas de lanzamiento/almacenamiento elaboradas durante el desarrollo de este trabajo de tesis se construyeron con cubiertas ferromagnéticas

hechas a la medida para cada bobina, construidas a partir de secciones de tubos de PVC y rondanas metálicas rellenas de polvo de ferrita, selladas y pegadas con pegamento hecho a base de cianoacrilato. Estas cubiertas, en la mayoría de los casos, no eran reutilizables, porque al retirarlas los tubos de PVC usualmente se rompían e incluso los conductores que constituían los devanados de las bobinas de lanzamiento podían llegar a dañarse. En la [Figura 4.16](#) se muestra una bobina de lanzamiento/almacenamiento con este tipo de cubierta ferromagnética.

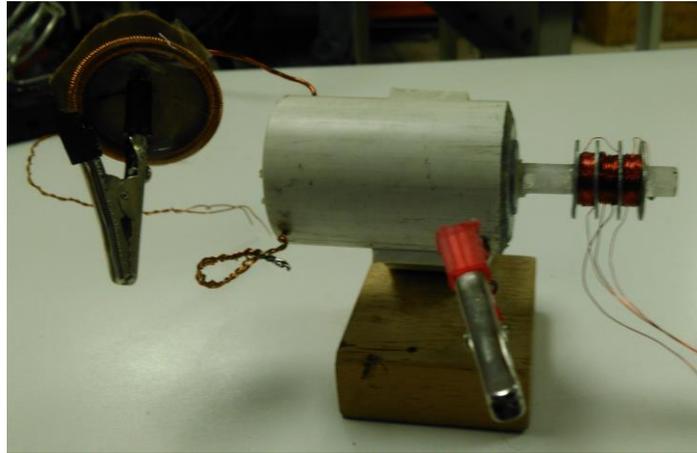


Figura 4.16: Bobina de lanzamiento/almacenamiento con una cubierta ferromagnética contenida en una sección de tubo de PVC, con tapas metálicas en ambos extremos de la bobina, sellada con pegamento a base de cianoacrilato.

Finalmente se diseñaron y elaboraron cubiertas ferromagnéticas reutilizables de dos piezas: una parte principal encargada de contener la mayor parte del material de la cubierta ferromagnética y una tapa que se ajusta a presión sobre dicho cuerpo principal, y también en las caras planas de la cubierta cuentan con agujeros que se ajustan a presión a las terminales y al tubo de la bobina de lanzamiento, como se muestra en la [Figura 4.17](#). Estas cubiertas plásticas fueron elaboradas mediante impresión 3D con material ABS.

En la [Figura 4.18](#) puede verse una bobina de lanzamiento y su cubierta plástica reutilizable. Estas cubiertas plásticas reutilizables disminuyeron considerablemente el tiempo necesario para la elaboración de las bobinas de lanzamiento/almacenamiento, ya permitieron probar varios diseños de bobina sin tener que construir una cubierta plástica a medida para cada uno de ellos.

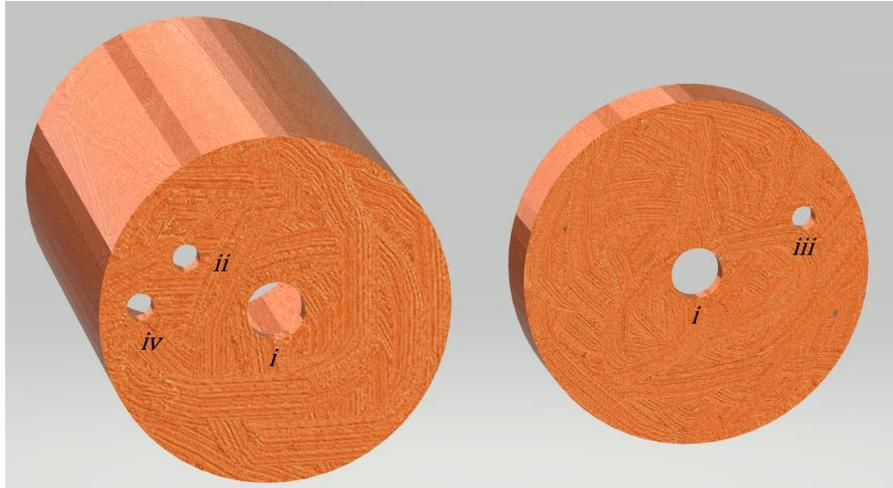


Figura 4.17: Cubierta plástica para contener a la cubierta ferromagnética de la bobina de lanzamiento/almacenamiento. A la izquierda se observa el cuerpo principal de la cubierta plástica y a la derecha la tapa. (i) Agujeros para el paso del tubo de la bobina de lanzamiento; (ii) agujero para el paso de la terminal de L_{in} de la bobina de lanzamiento; (iii) agujero para el paso de la terminal de L_{ex} de la bobina de lanzamiento; (iv) agujero para el paso de la derivación central común a ambos inductores de la bobina de lanzamiento.



Figura 4.18: Bobina de lanzamiento y su cubierta plástica reutilizable lista para ser acomodada y rellena con material ferromagnético.

4.5.3 El tubo de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.

Entre las variables tenidas a consideración para mejorar la eficiencia de conversión η de un acelerador de reluctancia, al inicio del desarrollo de este trabajo de tesis, no se le había dado demasiada importancia a lo que en el modelo matemático desarrollado por William Slade [6] se le llama β , que es el espacio lleno de aire entre el proyectil y la cubierta ferromagnética (véase [Figura 3.10](#)). Pero mediante resultados de simulaciones se observó que un decremento de 2 mm, con respecto a la β derivada del uso de tubos plásticos, podía mejorar la eficiencia de conversión para una bobina de lanzamiento, con una longitud y número de vueltas dadas, con una mejora relativa de la eficiencia de conversión η del 51.5%. Para lograr este decremento de β se decidió a utilizar tubos

hechos a partir de tiras de cobre para enrollar la bobina sobre ellos, en lugar de los tubos de plástico que se habían estado utilizando hasta ese momento. Las características de los tubos se muestran en la [Figura 4.19](#), y muestran que se pasó de tubos con un diámetro externo de 8 mm a tubos con 6 mm de diámetro, lo que representó una disminución de β de 4.7 mm a 2.7 mm.

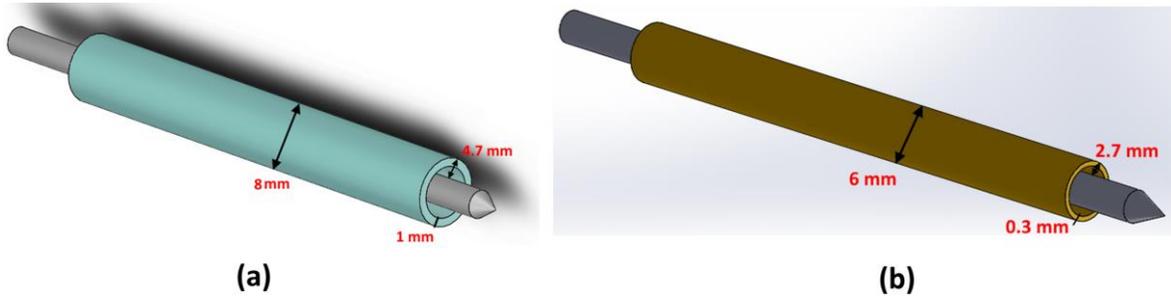


Figura 4.19: Características de los tubos empleados para enrollar la bobina, (a) tubo de plástico utilizado en bobinas anteriores, (b) tubo de cobre utilizado en el prototipo final para enrollar las bobinas de lanzamiento.

El uso de materiales conductores como tubo de la bobina de lanzamiento para un acelerador de reluctancia implica el riesgo de pérdidas por las corrientes inducidas por el campo magnético al interior de la bobina sobre la superficie del tubo, como se muestra en la [Figura 4.20](#), en un sitio web de aficionados se ha reportado una reducción en la velocidad de salida de hasta el 24% [126]. Por esta razón se decidió hacer los tubos de las bobinas con una ranura que atraviesa toda su longitud, como se muestra en la [Figura 4.21](#), para abrir el circuito donde circularían las corrientes inducidas.

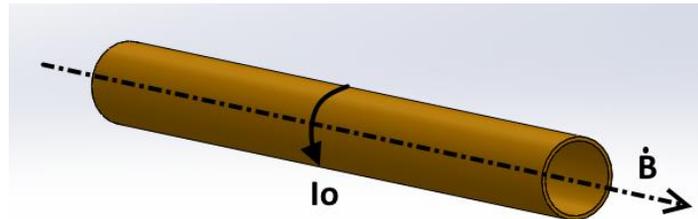


Figura 4.20: Corriente I_o inducida sobre el tubo de un acelerador de reluctancia por un campo magnético transitorio B .



Figura 4.21: Tubo de cobre empleado para enrollar la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia.

Aún con la ranura se estimó que existía la posibilidad que el proyectil de acero cerrara el circuito eléctrico al rozar con el interior del tubo de cobre, generando pérdidas. Sospecha que al parecer se vio confirmada al obtener experimentalmente

velocidades de salida de 18 m/s a 22 m/s, medidas con un sensor reflectivo, para una bobina de la que se esperaba una velocidad de salida de 30.7 m/s de acuerdo con las simulaciones. Por eso para las posteriores bobinas se barnizó el interior del tubo, y como se verá en el siguiente capítulo esto permitió que las velocidades de salida alcanzadas con el prototipo final se acercaran más a lo predicho con el modelo matemático.

4.5.4 La bobina de lanzamiento/almacenamiento construida.

La bobina de lanzamiento/almacenamiento construida para cumplir con el objetivo general de este trabajo de tesis tiene las características mostradas en la [Tabla 4.IV](#). Como se mencionó anteriormente, se decidió que tuviera las características aproximadas de la bobina de 55 mm elaborada con alambre AWG #14, enrollada sobre un tubo de cobre esmaltado con un diámetro externo de ~6 mm, cuyos devanados estuvieran rodeados por una cubierta ferromagnética constituida por polvo de ferrita, contenida en una cubierta plástica reutilizable. En la práctica se obtuvo una bobina de lanzamiento de 58.7 mm de largo que se muestra en la [Figura 4.22](#).

Tabla 4.IV: Características de la bobina de lanzamiento construida.

PARÁMETRO	MAGNITUD
Longitud	58.7 mm
Diámetro externo	9.6 mm
Diámetro interno	6.9 mm
Calibre del alambre	AWG #14
Número total de vueltas	243
Número de vueltas en la sección interna	153
Número de vueltas en la sección externa	90
Resistencia total	124 mΩ
Resistencia de la sección interna	72 mΩ
Resistencia de la sección externa	52 mΩ
Masa	665 g

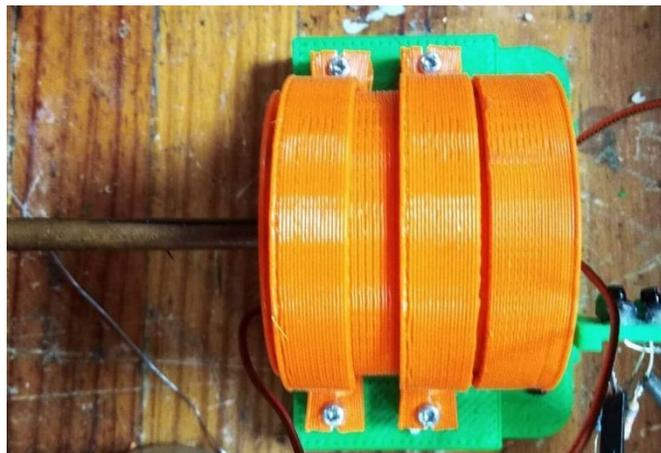


Figura 4.22: Bobina de lanzamiento/almacenamiento elaborada para cumplir con el objetivo general de este trabajo de tesis.

Capítulo 5

Resultados experimentales

Dada la originalidad del sistema de almacenamiento desarrollado, cuyo modelado se detalla en el Capítulo 3 de este trabajo de tesis, y a la necesidad de verificar el cumplimiento del objetivo general del mismo. Se hicieron disparos de prueba para medir las corrientes en los inductores, y la tensión en el elemento capacitivo del sistema de almacenamiento desarrollado. Y los resultados obtenidos se compararon con las simulaciones hechas con el modelo implementado en *Simulink*, que se mostró en el Capítulo 3 de este trabajo de tesis.

Lo anterior con el propósito de verificar la exactitud y la precisión del modelo elaborado para el sistema de almacenamiento desarrollado durante este trabajo de tesis, y la verificación de las características de velocidad de salida U_{sal} y la eficiencia de conversión η propuestas en el objetivo general de este trabajo de tesis.

5.2 Los sensores de corriente y velocidad.

Para obtener datos útiles de los resultados experimentales se requieren sensores confiables para medir la corriente que circula a través de los devanados de la bobina de lanzamiento, y sensores de velocidad para medir la velocidad desarrollada por el proyectil ferromagnético.

Ya que, durante el desarrollo de las pruebas efectuadas durante este trabajo de tesis, se han tenido que medir pulsos de corriente con magnitudes en el orden de varios cientos de amperes, el uso de las sondas de corriente disponibles en CENIDET ha quedado descartado. Por eso se decidió emplear sensores de corriente hechos a modo.

Al principio de las pruebas experimentales con bancos de pruebas provisionales, se había determinado que el uso de transformadores de corriente era el método adecuado para realizar las mediciones de corriente. Pero posteriormente se determinó que el uso de bobinas Rogowski era más apropiado, ya que estas no se saturan ante pulsos de corriente de alta magnitud, o con un componente considerable de CD.

Una bobina Rogowski es una bobina toroidal con núcleo de aire que actúa como un inductor acoplado magnéticamente con el conductor cuya corriente se desea conocer y alrededor del cual se coloca el formador, no ferromagnético y preferiblemente no conductor, de la bobina Rogowski. Por lo que a la salida de la bobina Rogowski se obtiene un voltaje proporcional a la derivada de la corriente que se desea conocer, con respecto al tiempo.

Las primeras bobinas Rogowski construidas tenían un blindaje interno, que hacía las veces de vuelta de retorno, fabricado con papel de aluminio que cubría el formador de plástico y conectado a otro blindaje externo también de papel de aluminio que cubría los devanados de la bobina, este diseño se inspiró en las bobinas construidas por I. A. Metwally en [127]. Posteriormente se vio que estos sensores con blindaje introducían interferencia de alta frecuencia como se predecía en [128] para una bobina Rogowski con blindaje externo, haciendo mediciones de un pulso de corriente de una duración relativamente alta (varios milisegundos), el más insidioso de los cuales era el ruido generado por el evento de disparo del acelerador de reluctancia. Por esta razón se decidió utilizar un diseño más simple: una bobina toroidal con núcleo de aire y una vuelta de retorno, sin ningún tipo de blindaje. En la [Figura 5.1](#) se muestran las bobinas con blindaje que se habían construido y las bobinas simples que finalmente se emplearon.

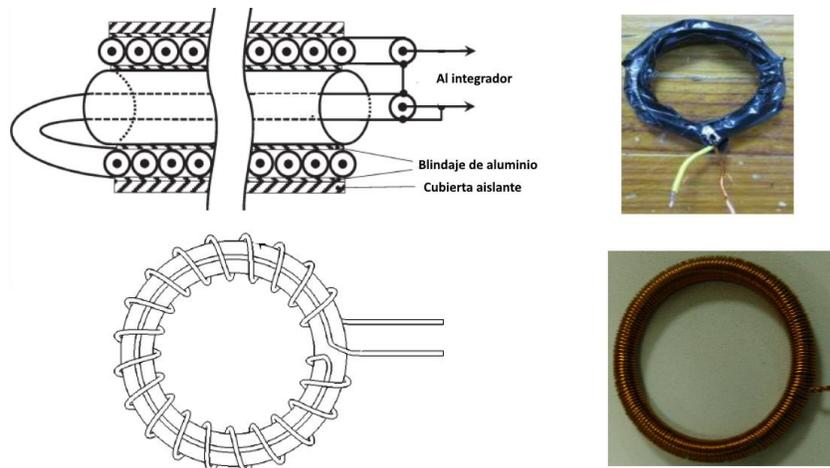


Figura 5.1: Arriba: a la derecha se observan las bobinas Rogowski con blindaje de aluminio que se usaron originalmente, inspiradas en el diseño de I. A. Metwally [127], que se ve arriba a la izquierda, de bobinas hechas con cable coaxial. Abajo: Las bobinas Rogowski simples que se utilizaron para hacer las mediciones definitivas.

Las bobinas Rogowski se construyeron alrededor de un toroide de plástico rígido con sección circular de 46 mm de radio medio y 4 mm de radio de sección, con 215 vueltas de alambre AWG #24 y una autoinductancia de $5.6 \mu\text{F}$.

El integrador se construyó en base a lo leído en [129] como se muestra en la [Figura 5.2](#). En dicho circuito, el seguidor de voltaje sirve para poner una impedancia prácticamente infinita a la salida de la bobina; el amplificador no inversor amplifica la señal proveniente de la bobina antes de ser integrada por el integrador, que tiene una salida proporcional a la corriente medida por la bobina Rogowski.

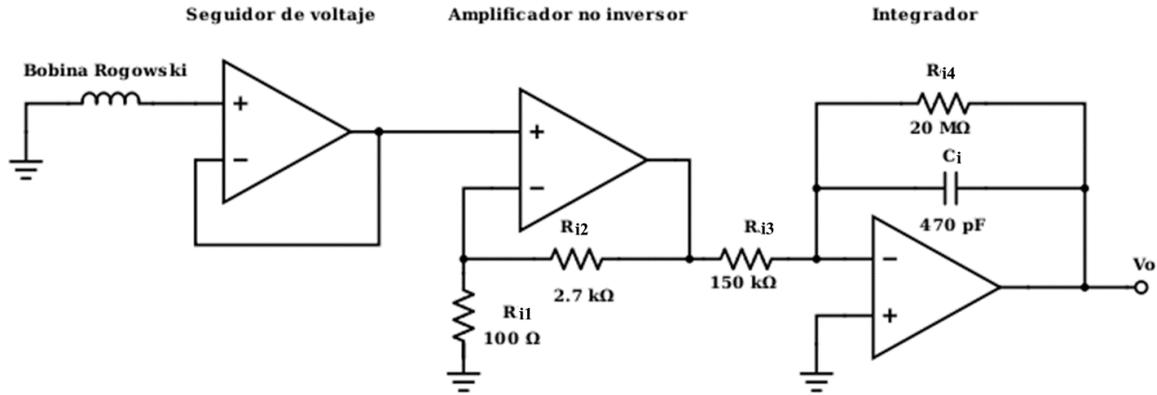


Figura 5.2: Circuito construido para obtener, amplificar e integrar la señal de voltaje proveniente de la bobina Rogowski.

El circuito se diseñó con un polo de integración a 33.9 Hz, que se supuso lo suficientemente inferior al rango de frecuencias con el que planeó trabajar, de entre 500 Hz y 2 kHz. Como en este caso la relación entre la frecuencia mínima f_{min} y la frecuencia del polo de integración f_{pi} , $f_{min}/f_{pi} \ll 1$, se cumple que la magnitud de la ganancia del integrador $|H_i|$ será

$$|H_i| = \frac{R_{i4}}{R_{i3}} \frac{f_{pi}}{f_{min}} \quad (5.1)$$

y al trabajar con una frecuencia mínima de 500 Hz, la ganancia es 4.51, y como la ganancia del integrador no inversor es de 28, la ganancia total del circuito es de 126.29. En la [Figura 5.3](#) se muestra cómo se desempeñaron las bobinas Rogowski hechas comparándolas con la salida de un transformador de corriente disponible comercialmente.

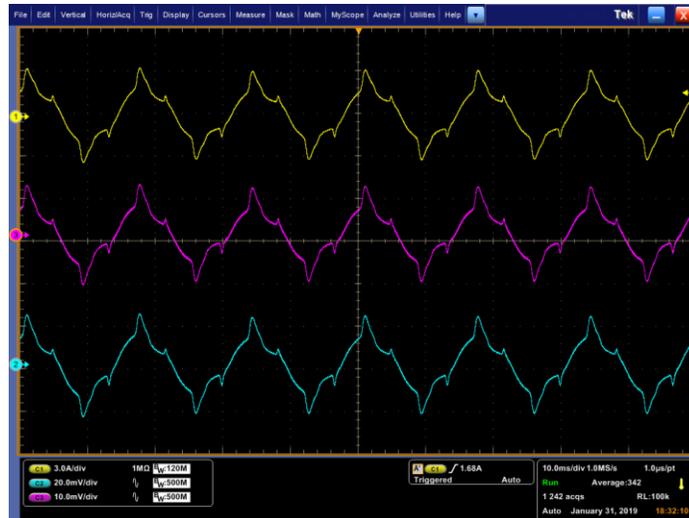


Figura 5.3: Desempeño de las bobinas Rogowski construidas midiendo una corriente a 60 Hz, al compararlas con la salida de un transformador de corriente comercial (amarillo, arriba). Una bobina Rogowski con las 215 vueltas descritas en esta sección (morado, centro) y una bobina Con solo 110 vueltas (azul, abajo)

Como sensor de velocidad para el prototipo construido se emplearon dos sensores reflectivos TCRT5000, como el que se ve en la [Figura 5.4](#), compuestos por un fototransistor Q_L y un LED infrarrojo D_L , conectados como se muestra en la [Figura 5.4](#). Se aprovechó que la superficie de los clavos empleados como proyectiles ferromagnéticos es lo suficientemente reflectante como para reflejar el haz de luz proveniente de D_L hacia el transistor Q_L de cada sensor, provocando que el transistor Q_L se sature cuando el proyectil ferromagnético pase frente a uno de ellos, y haya un voltaje de 0 V en la salida V_L del sensor correspondiente.

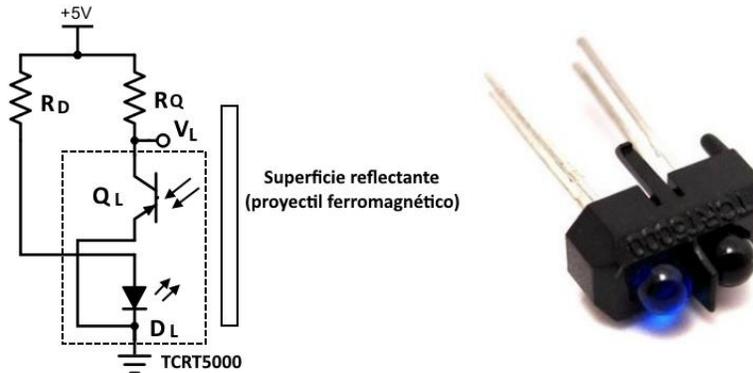


Figura 5.4: Sensor reflectivo empleado para estimar la velocidad de salida del proyectil ferromagnético.

El sensor de velocidad se montó sobre un “brazo” creado mediante impresión 3D a la salida de la bobina de lanzamiento/almacenamiento como se puede ver en la [Figura 5.5](#). Se midió minuciosamente la distancia x_L entre los dos TCRT5000 que resultó de 2.92 mm, las velocidad de salida se estima mediante la [Ecuación \(5.2\)](#) donde u_{sal} es la velocidad de salida y t_v es el tiempo que tarda el proyectil ferromagnético en pasar de estar justo en frente al TCRT5000 más cercano a la boca del tubo de la bobina de lanzamiento, a estar frente al más alejado.

$$u_{sal} = \frac{x_L}{t_v} \quad (5.2)$$

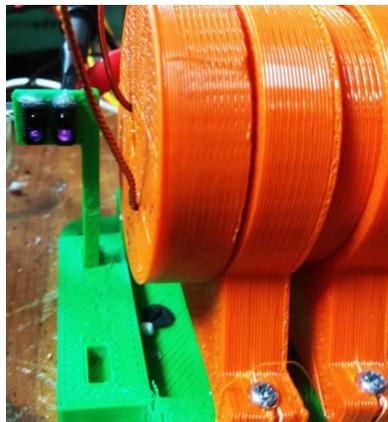


Figura 5.5: Sensor de velocidad montado a la salida de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.

5.3 Pruebas experimentales del prototipo desarrollado

El prototipo con el que se cumplieron las características del lanzamiento dictadas por el objetivo general de este trabajo de tesis, empleó la bobina de lanzamiento con las características descritas en la [Tabla 4.IV](#). Para realizar el lanzamiento, el elemento capacitivo del sistema de almacenamiento fue cargado a 350 V, y se obtuvieron las formas de onda que se muestran en la [Figura 5.6](#).

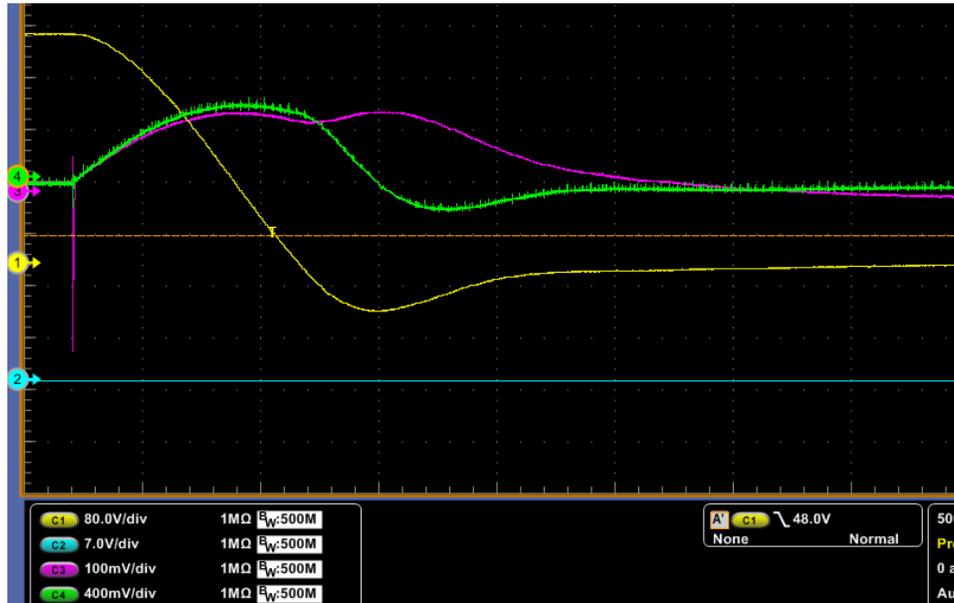


Figura 5.6: Formas de onda obtenidas para el prototipo final cuando el elemento capacitivo se cargó a 350 V. En amarillo el voltaje en el banco de capacitores, en verde la corriente en el inductor L_1 , y en morado la corriente en el inductor L_2 .

De acuerdo con los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo matemático implementado con Simulink las formas de onda de las corrientes en los inductores de la bobina de lanzamiento/almacenamiento, son como las que se muestran en la [Figura 5.7](#).

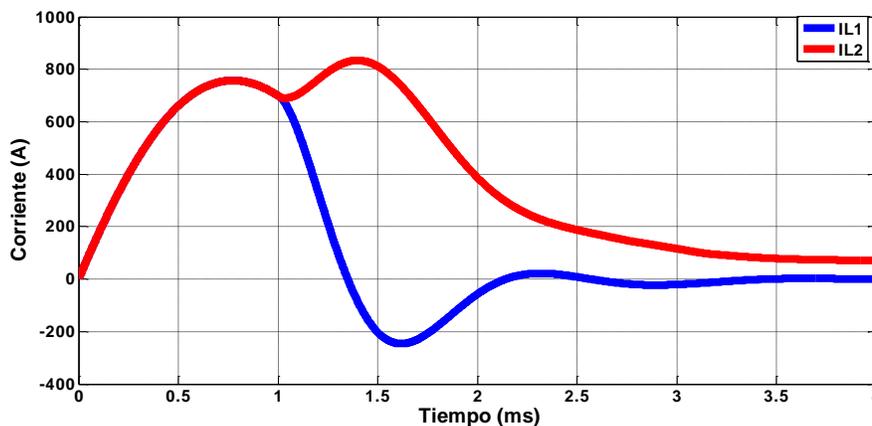


Figura 5.7: Formas de onda simuladas para el disparo hecho a 353 V.

En la [Figura 5.8](#) se muestran las formas de onda obtenidas en las bobina Rogowski después de que la señal fuera filtrada, amplificada y compensada utilizando las herramientas que brinda el software *Matlab*.

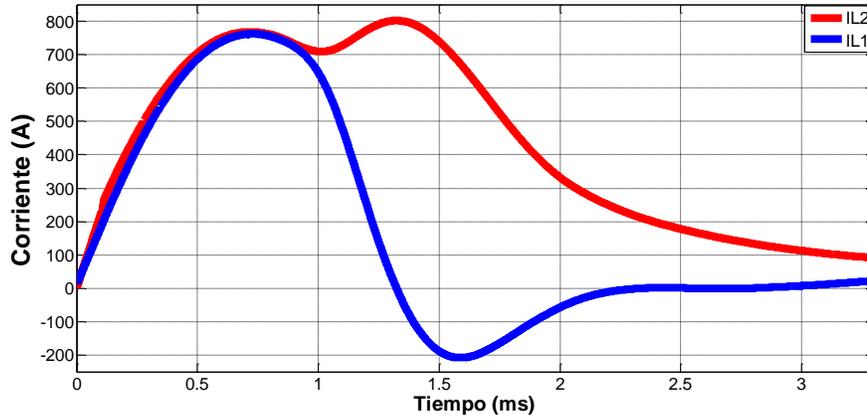


Figura 5.8: Formas de onda de la corriente de los inductores de la bobina de lanzamiento, obtenidas con las bobinas Rogowski.

Se determinó que el primer pico de corriente en el inductor L_2 , la sección interna de la bobina de lanzamiento/almacenamiento fue de 768.3 A, contra los 757.1 A obtenidos al simular el modelo matemático desarrollado, es decir un error relativo del 1.47%. En cuanto al segundo pico en la corriente en L_2 , el resultado obtenido mediante simulaciones fue de 833.8 A, y el resultado medido fue de 801.9 A, es decir se tuvo un error del -3.82%.

En la [Figura 5.9](#) se puede observar la evolución del voltaje en las terminales del elemento capacitivo del sistema de almacenamiento del prototipo creado. En cuanto a la magnitud del voltaje no se observaron diferencias significativas, sin embargo se observa que el voltaje medido se adelantó con respecto al voltaje simulado, esto puede ser resultado de asumir que los inductores L_1 y L_2 se comportaban como solenoides largos.

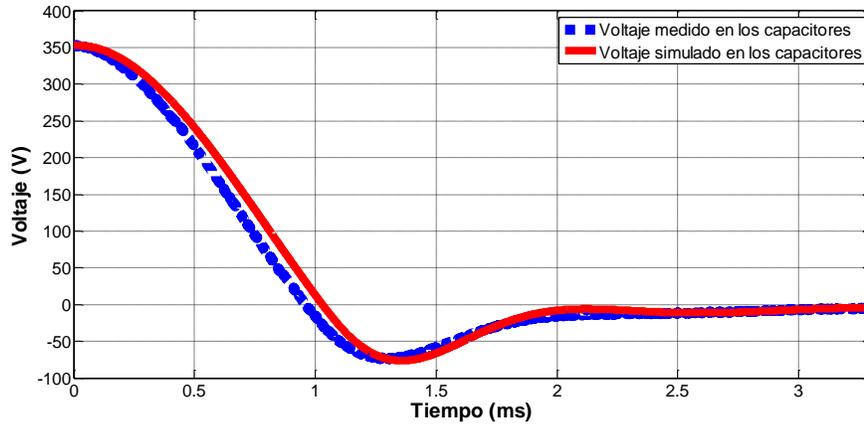


Figura 5.9: Formas de onda simulada y medida del voltaje en el capacitor del sistema de almacenamiento, a un voltaje inicial de 353 V.

Finalmente, como se puede deducir de la [Ecuación \(5.2\)](#) a partir de el t_v medido fue de 695 μ s, la velocidad de salida alcanzada por el proyectil ferromagnético fue de 34.20 m/s, un 0.25% superior a lo esperado, de 34.12 m/s (como se muestra en la [Figura 5.14](#)), de acuerdo con las simulaciones. Y por lo tanto se logró una eficiencia de conversión η del 3.49%.

Las variables con las que no se contaba con el equipo para medirla fue el flujo magnético generado por los inductores L_1 y L_2 ϕ_1 y ϕ_2 respectivamente En la [Figura 5.10](#) puede observarse el comportamiento simulado de dichas variables a través del tiempo.

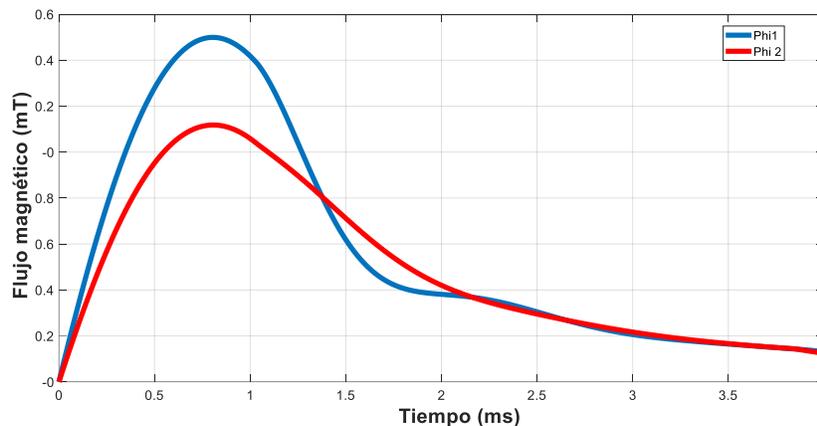


Figura 5.10: Flujo magnético generado por ambos inductores de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.

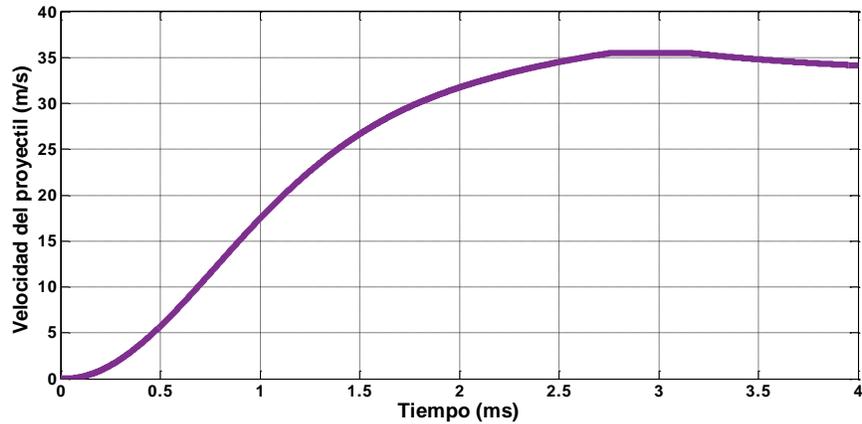


Figura 5.11: Comportamiento de la velocidad del proyectil simulada, se logra ver el efecto suckback, que hizo que su velocidad decayera de un máximo de 35 m/s a 34.2 m/s.

De acuerdo con las simulaciones, si no se hubiera implementado la cubierta ferromagnética alrededor de la bobina de lanzamiento/almacenamiento, como se muestra en la [Figura 5.12](#), el acoplamiento magnético entre las secciones interna y externa de la bobina de lanzamiento hubiera sido menor que el esperado la velocidad de salida para el disparo hecho con un voltaje inicial de 353 V en el elemento capacitivo del sistema de almacenamiento del acelerador de reluctancia hubiera sido de 31.77 m/s, es decir una eficiencia de conversión del 2.57 %. Por lo que se tuvo una mejora relativa en la eficiencia de conversión al utilizar una cubierta ferromagnética del 35.8% de la eficiencia de conversión.

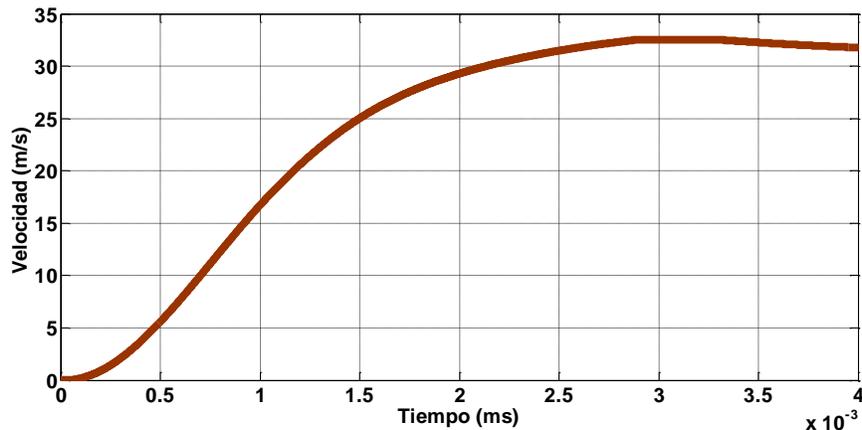


Figura 5.12: Evolución de la velocidad del proyectil en una bobina sin cubierta ferromagnética.

En la [Figura 5.13](#) se muestra la evolución de la velocidad de salida cuando se emplea una bobina simple como bobina de lanzamiento, con las mismas características de resistencia y número total de vueltas que la bobina de lanzamiento del prototipo experimental, es decir, cuando esta no se divide en una sección interna y otra externa. En ella se alcanzó una velocidad de salida de 32.03 m/s, es decir una eficiencia de conversión del 2.69%, o un decaimiento relativo del 29.74%.

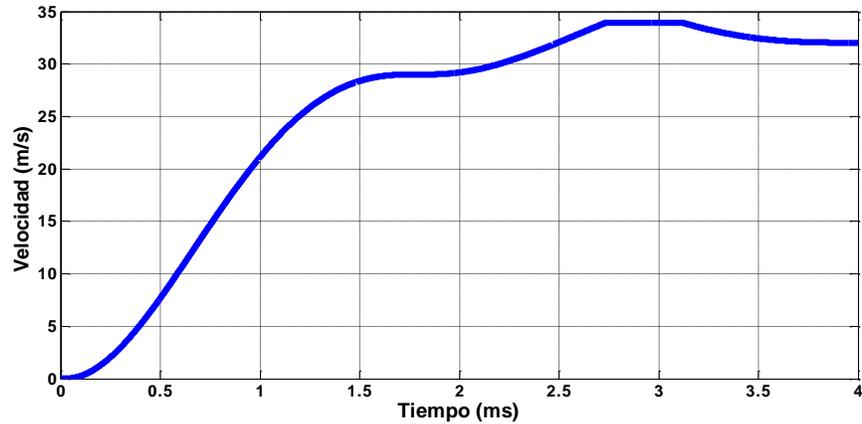


Figura 5.13: Evolución de la velocidad del proyectil de un lanzador con una bobina de lanzamiento simple.

Se alcanza a ver que se pudo mejorar la eficiencia de conversión con el simple hecho de aprovechar la compresión del pulso de corriente, ya que se eliminaron gran parte de las pérdidas debidas al efecto *suckback*.

5.3.1 Discusión de los resultados experimentales

En resumen, con el prototipo construido se han obtenido los resultados mostrados en la [Tabla 5.I](#).

Se ha logrado una eficiencia de conversión superior al 3.00 % propuesta como una eficiencia relativamente alta, y se logró una velocidad de salida de 34.2 m/s, apenas un 2.29 % por debajo de lo que se propuso como velocidad objetivo, pero ya dentro del rango que manejan las pistolas lanzadoras de clavos comercialmente disponibles, como puede verse en el Capítulo 1.

Tabla 5.I: Resultados para los valores pico en la corriente de L2, y la velocidad de salida del proyectil.

Parámetro	Calculado	Medido	Error
Primer pico de corriente en L₂	757.1 A	768.3 A	1.47 %
Segundo pico de corriente en L₂	833.9 A	801.9 A	-3.82 %
Velocidad de salida	34.12 m/s	34.20 m/s	0.25 %

El modelo en puede predecir las variables de corriente y velocidad de salida con mucha exactitud. Sin embargo, como se puede ver en la [Figura 5.14](#) donde pueden verse con fines ilustrativos resultados no publicados obtenidos con otro prototipo, al asumirse que se trabaja con solenoides largos, mientras la relación entre el radio externo de la bobina y su longitud crece, y los resultados obtenidos con el modelo desarrollado tienden a alejarse de los resultados experimentales, ya que este modelo tiende a subestimar la inductancia real de la bobina de lanzamiento.

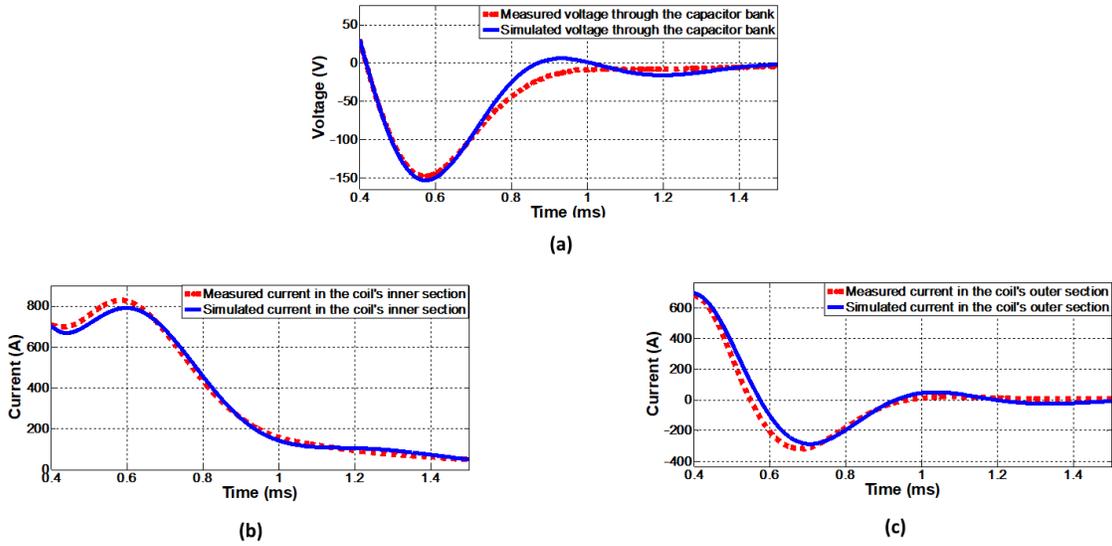


Figura 5.14: Resultados experimentales obtenidos con un prototipo con características geométricas más alejadas del ideal de un solenoide largo. (a) Voltaje en el banco de capacitores, (b) corriente en el inductor L2, (c) corriente en el inductor L1. Las formas de onda roja son los resultados experimentales y las azules los resultados de las simulaciones

En la [Tabla 5.II](#) se muestra la mejora de la velocidad de salida y, por consiguiente de la eficiencia de conversión de los resultados obtenidos con el prototipo elaborado, al compararlo con un prototipo sin cubierta ferromagnética en su bobina de lanzamiento, y con un prototipo sin compresión de corriente (con un sistema de almacenamiento puramente capacitivo), tomados de los datos de los disparos simulados en las Figuras 11, 12 y 13. En todos los casos las bobinas de lanzamiento simuladas tienen las mismas características geométricas y de resistencia eléctrica que la bobina empleada en el prototipo experimental.

Tabla 5.II: Mejora de la eficiencia de conversión al emplear la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada.

Bobina	Velocidad de salida <i>U_{sal}</i>	Eficiencia de conversión η
Prototipo Experimental	34.2 m/s	3.49 %
Bobina sin cubierta ferromagnética	31.7 m/s	2.57 %
Bobina sin compresión de corriente	32.03 m/s	2.69 %

Se observó una mejora en la eficiencia de conversión para la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada con respecto a una bobina convencional, y a una bobina sin cubierta ferromagnética.

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1 Conclusiones

Se logró desarrollar un sistema de almacenamiento capacitivo/inductivo completamente nuevo al configurar a la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia como dos inductores acoplados magnéticamente, lo que permitió eliminar las pérdidas resistivas si se hubiera utilizado un conjunto adicional de inductores de almacenamiento.

El acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento capacitivo/inductivo pudo cumplir con las condiciones impuestas por el objetivo general de este trabajo de tesis. Lanzando proyectiles ferromagnéticos de alrededor de 70 mm de longitud, con una masa de alrededor de 4– 5 g, con una eficiencia de conversión del 3.49%, y una velocidad de salida de 34.2 m/s.

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis:

- Se creó y se validó un modelo matemático para el sistema de almacenamiento de energía desarrollado.
- Se logró desarrollar un prototipo portátil de un acelerador de reluctancia, de menos de 3 kg de peso, en el que el sistema de almacenamiento de energía es una configuración capacitiva/inductiva, y donde los inductores de almacenamiento también cumplen la función de ser parte de la bobina de lanzamiento. En ninguna parte de la literatura, hasta el inicio de este trabajo de tesis, se había empleado un sistema de almacenamiento de energía que no fuera puramente capacitivo para energizar a la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.
- Con el sistema de almacenamiento capacitivo/inductivo se pudo aumentar la eficiencia de conversión del sistema con respecto a versiones de esta misma bobina de lanzamiento, pero sin los efectos derivados de la adición de inductores externos como inductores de almacenamiento.
- Las predicciones hechas con el modelo matemático fueron bastante parecidas a las formas de onda obtenidas experimentalmente para la corriente, voltaje y velocidad de salida. Sin embargo dichas predicciones pueden perder exactitud conforme la bobina de lanzamiento construida se aleja de las características de un solenoide largo.

6.2 Trabajos futuros

- Se sugiere la implementación de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento inductivo/capacitivo relativamente grande, para así aprovechar la mejora en la densidad de energía del sistema, sin preocuparse por las pérdidas resistivas que se dan en lanzadores más pequeños.
- Se sugiere ahondar en la operación del STRETCH-Meatgrinder como un sistema de almacenamiento de energía para un lanzador electromagnético.
- Se sugiere la implementación de algoritmos para la optimización del diseño de la bobina de lanzamiento/almacenamiento.
- Se sugiere cubrir más aspectos del uso de aceleradores de reluctancia como herramientas manuales, ya sea en el aspecto de dispositivos de seguridad, o en el aspecto de partes o procesos de fabricación que permitan abaratar los costos y mejorar las prestaciones de estos lanzadores electromagnéticos.

ANEXO A: Características de los lanzadores y disparos reportados en la literatura

En la [Tabla A.I](#) se muestran los disparos hechos con aceleradores de reluctancia reportados en la literatura., solo se tomaron en cuenta los resultados experimentales y se descartaron los resultados simulados. Se seleccionaron los disparos con los que se obtuvo la mayor velocidad de salida para cada lanzador diferente.

Los criterios empleados, que se consideraron por sí solos suficientes para considerar que un disparo reportado en la literatura se realizó con un lanzador diferente a otro presentado en la misma referencia fueron los siguientes:

- Que presente diferente configuración de las características de número de vueltas N , longitud l , y/o radio medio a en la bobina de lanzamiento.
- Que emplee un número diferente de bobinas de lanzamiento.
- Que presente un valor diferente de capacitancia C en su banco de capacitores.
- Que las características del proyectil sean distintas: material con el que fue fabricado, forma geométrica, longitud p , y masa m .

Como una excepción a estos criterios, se decidió omitir los datos obtenidos con los lanzadores presentados en la referencia [19] cuando trabajaban como lanzadores de 1 y 2 etapas, ya que las diferencias no fueron significativas, porque lo que se quería probar en ese trabajo era la mejora en la eficiencia al aumentar el número de etapas de un acelerador de reluctancia sin modificar las características del proyectil, ni del banco de capacitores, ni del nivel de energía utilizada para cada disparo. Se consideró que la inclusión de dichos datos solo provocaría una sobrerrepresentación de datos de lanzamientos hechos con una ϵ_E de 675 J.

Los criterios que no se consideraron necesarios ni suficientes, para considerar que un disparo reportado en la literatura se realizó con un lanzador diferente a otro reportado en la misma referencia, fueron los siguientes:

- Que el valor de la posición inicial del proyectil dentro de la bobina de lanzamiento z_i , fuera diferente.
- Que el voltaje inicial en el banco de capacitores hubiera sido diferente.

En la [Tabla A.I](#) se consideró que la forma del proyectil material era sólida si no presentaba ahuecamiento (por ej. que tuviera forma de tubo), y todos los proyectiles, excepto el empleado en el Disparo 14 tuvieron forma aproximadamente cilíndrica. A los distintos tipos de acero empleados en cada disparo se les consideró como un solo

material, ya que, para fines prácticos, dentro del rango de sus características magnéticas típicas, los resultados obtenidos en cuanto a la velocidad de salida U_{sal} y eficiencia de conversión η son muy parecidos entre sí [29], y esto se ha confirmado con simulaciones [6, 18] y casos prácticos [18, 22].

Tabla A.I: Características de los disparos reportados en la literatura: ϵ_E es la energía cinética que se tomó del sistema de almacenamiento del lanzador para realizar el disparo, U_{sal} fue la velocidad de salida del disparo correspondiente, m la masa del proyectil, ϵ_k la energía cinética desarrollada por el proyectil, y η la eficiencia de conversión de cada lanzador.

Referencia	No. de disparo	Tipo de proyectil/ Material	No. de etapas	ϵ_E (J)	U_{sal} (m/s)	m (g)	ϵ_k (J)	η
[6]	1	Sólido/ Acero	1	216.32	18.9	25	4.465	9%
[6]	2	Sólido/ Ferrita	1	216.32	8.4	25	0.882	2%
[23]	3	Sólido/ Acero	5	405	52.1	8	10.86	2.68%
[23]	4	Sólido con muesca/ Acero	5	405	51.9	8.6	11.582	2.86%
[23]	5	Sólido con aletas/ Acero	5	405	50.7	7.8	10.025	2.48%
[130]	6	Sólido/ Acero	1	1063.13	14	25	2.45	0.23%
[130]	7	Sólido/ Acero	2	2004.75	35	25	15.31	0.76%
[130]	8	Sólido/ Acero	3	2764.13	54	25	36.45	1.32%
[130]	9	Sólido/ Acero	4	3351	71	25	63.01	1.88%
[19]	10	Sólido/ Acero	3	675	15.97	62.4	7.97	1.18%
[19]	11	Sólido/ Acero	3	675	16.27	87.2	11.54	1.71%
[19]	12	Sólido/ Acero	3	675	15.66	112	13.77	2.04%
[14]	13	Sólido/ Hierro dulce	1	6.56	3.83	2	0.015	0.23%
[18]	14	Sólido/ Acero	1	1040	22.13	181	43.95	4.22%
[96]	15	Sólido/ Acero	1	1815	54.3	1.9	2.801	0.154%
[33]	16	Sólido/ Acero	1	528.125	18.1	46	7.535	1.43%
[33]	17	Sólido esférico/ Acero	1	528.125	23.01	32.9	8.71	1.65%
[106]	18	Sólido/ Acero	3	432	19.93	36	7.15	1.66%

Referencia	No. de disparo	Tipo de proyectil/ Material	No. de etapas	ϵ_E (J)	U_{sal} (m/s)	m (g)	ϵ_k (J)	η
[106]	19	Sólido/ Acero	3	432	19.51	55	10.47	2.42%
[106]	20	Sólido/ Acero	3	432	18.74	74	12.99	3.01%
[97]	21	Sólido/ Acero	1	126.15	23.51	6	1.66	1.31%
[97]	22	Sólido/ Acero	2	252.3	35.2	6	3.72	1.47%
[97]	23	Sólido/ Acero	3	378.45	45.96	6	6.34	1.67%
[97]	24	Sólido/ Acero	3	378.45	52.43	5	6.87	1.82%
[32]	25	Sólido/ Hierro	1	125.6	22.33	20	4.99	3.97%
[108]	26	Sólido/ Acero	1	1.64	4.17	2.57	0.022	1.36%
[34]	27	Hueco/ Acero	1	146.25	12	44	3.17	2.17%
[22]	28	Sólido ranurado/ Permendur Vanadio	1	100.34	23.07	30.475	8.11	8.08%
[22]	29	Sólido/ Permendur Vanadio	1	100.52	22.13	35.004	8.57	8.53%
[22]	30	Sólido ranurado/ Acero	1	101.85	22.60	29.634	7.57	7.43%
[22]	31	Sólido/ Acero	1	101.98	19.60	33.616	6.46	6.33%
[22]	32	Sólido ranurado/ Hierro	1	101.85	22.83	29.989	7.82	7.67%
[22]	33	Sólido/ Hierro	1	101.64	18.59	33.996	5.87	5.78%
[100]	34	Sólido laminado/ Hierro	1	130.7	21.06	25	5.54	4.24%
[100]	35	Sólido laminado/ Hierro	1	443.82	18.07	25	4.08	0.92%
[100]	36	Sólido laminado/ Hierro	1	596.79	17.1	25	3.66	0.61%
[100]	37	Sólido laminado/ Hierro	1	82.59	16.22	25	3.29	3.98%
[100]	38	Sólido laminado/ Hierro	1	66.16	23.17	25	6.71	10.14%

Anexo B: Modelado matemático del *STRETCH-Meatgrinder* como un sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia

Se desarrolló el modelo matemático de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento tipo *STRETCH-Meatgrinder* para analizar su viabilidad como un sistema de almacenamiento para aplicaciones portátiles para aceleradores de reluctancia. Se llegó a la conclusión de que las pérdidas eléctricas introducidas por un conjunto adicional de inductores de almacenamiento, en aplicaciones con un volumen reducido, no los hacía un sistema de almacenamiento apropiado para aplicaciones portátiles.

Sin embargo, el modelo matemático y las simulaciones realizadas con él se incluyen en este trabajo de tesis, ya que podrían ser de utilidad para trabajos futuros que busquen desarrollar aplicaciones para aceleradores de reluctancia, donde la portabilidad no sea una característica prioritaria.

A.B Desarrollo de un modelo matemático para un acelerador de reluctancia con un circuito *STRETCH-Meatgrinder* como sistema de almacenamiento

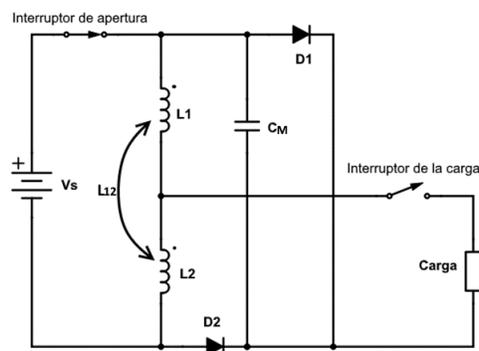


Figura B.1: Diagrama eléctrico equivalente de un sistema de almacenamiento *STRETCH-Meatgrinder* donde L_1 y L_2 son los inductores de almacenamiento magnéticamente acoplados, L_{12} su inductancia mutua, y C_M la parte capacitiva del sistema de almacenamiento.

Se desarrolló un modelo matemático para un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento tipo *STRETCH-Meatgrinder*, cuyo circuito equivalente puede verse

en la [Figura B.1](#), basándose en el modelo lagrangiano desarrollado por William Slade [6].

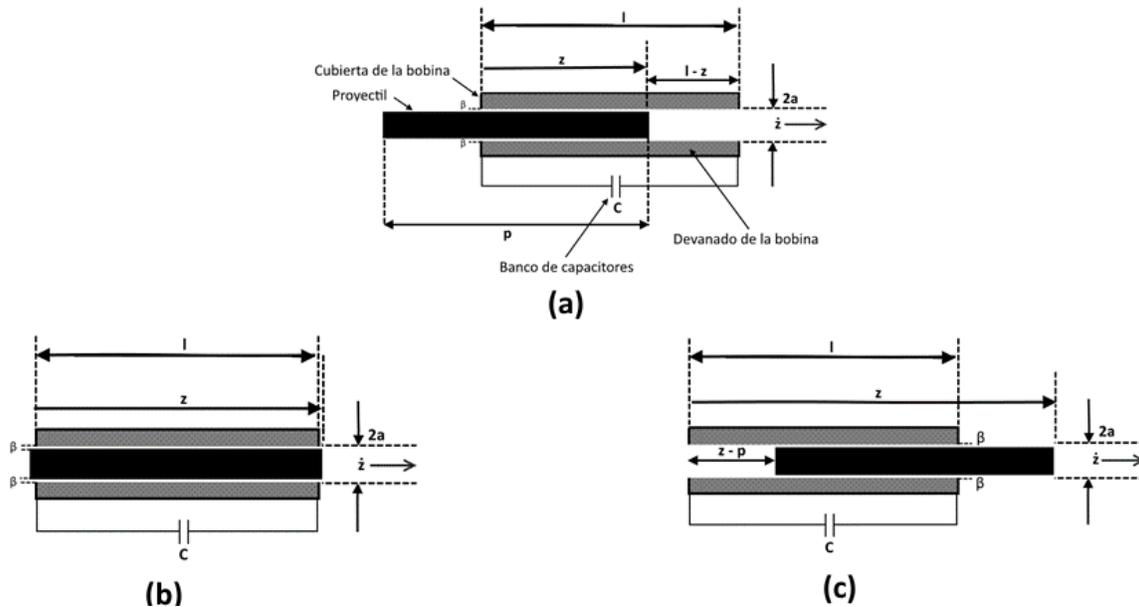


Figura B.2: Representación del acelerador de reluctancia modelado por William Slade [6]. (a) El proyectil entrando a la bobina recibe un impulso hacia la dirección de disparo deseada, (b) el proyectil llenando la bobina no experimenta fuerzas en la dirección del eje longitudinal de la bobina de lanzamiento, (c) el proyectil saliendo de la bobina experimenta fuerzas de frenado si aún hay corriente fluyendo a través de los devanados de la bobina de lanzamiento. En este diagrama y en las ecuaciones presentadas en esta sección l es la longitud de la bobina de lanzamiento, a es el radio de la bobina de lanzamiento, z es la posición del proyectil dentro de la bobina de lanzamiento, β son los espacios rellenos de aire entre el proyectil y la cubierta ferromagnética de la bobina de lanzamiento, p es la longitud del proyectil ferromagnético, y C es el banco de capacitores que hace las veces de sistema de almacenamiento capacitivo.

El lanzador modelado por William Slade, que puede verse en la [Figura B.2](#), posee un sistema de almacenamiento capacitivo, representado en la [Figura B.2](#) por el capacitor C , por lo que las ecuaciones de movimiento son diferentes a las necesarias para modelar a un acelerador de reluctancia con un *STRETCH-Meatgrinder* como sistema de almacenamiento de energía. Sin embargo, la división de los tres estados del proyectil dentro de la bobina del cañón, la representación geométrica de la bobina de lanzamiento, la notación de los distintos parámetros geométricos y mecánicos de la bobina de lanzamiento y del proyectil que se siguen empleando en las ecuaciones desarrolladas para este modelo matemático (donde l es la longitud de la bobina de lanzamiento, a es el radio de la bobina de lanzamiento, p es la longitud del proyectil, β el espacio circular relleno de aire entre el proyectil y la cubierta ferromagnética de la bobina de lanzamiento, y m es la masa del proyectil), y las ecuaciones obtenidas para dicho modelo para describir la energía potencial magnética en la bobina de lanzamiento U_m , [Ecuación \(B.1\)](#), y el aporte de esta misma bobina a la energía “cinética” eléctrica T_e , [Ecuación \(B.2\)](#) (donde N es el número de vueltas de la bobina del lanzador, y Q_L es la carga eléctrica presente en su rama del circuito) [6], aún resultan de utilidad:

$$\begin{aligned}
 U_m \approx & \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 \\
 & - \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \\
 & \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{B.1}$$

$$T_e = \pi a^2 N \dot{Q}_L \dot{B} \tag{B.2}$$

La operación del *STRETCH-Meatgrinder*, puede dividirse en cinco etapas. A continuación se describen los circuitos equivalentes, los *lagrangianos*, y las ecuaciones de movimiento obtenidas para cada etapa cuando su carga es la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia. Las coordenadas generales elegidas para hacer el análisis fueron: Q_L la carga en la rama que contiene a la bobina de lanzamiento, Q_A la carga en la rama que contiene al inductor L_1 del *STRETCH-Meatgrinder*, B la componente longitudinal del campo magnético transitorio dentro de la bobina de lanzamiento, y z la posición del proyectil dentro de la bobina el lanzador con respecto al eje longitudinal de esta última.

Para la elaboración de este modelo matemático, en cuanto a las fuerzas generalizadas, sólo se tomaron en cuenta las pérdidas resistivas, asignándosele la resistencia en serie equivalente R_1 , R_2 y R_L a cada inductor L_1 , L_2 y L_L respectivamente. La bobina de lanzamiento se representa con el inductor con núcleo móvil L_L .

Durante la etapa I y II, los inductores de almacenamiento del *STRETCH-Meatgrinder* han quedado cargados al nivel de corriente deseado, el interruptor de apertura deja de conducir, y el circuito se comporta como un *Meatgrinder* común de una etapa. Su circuito equivalente se muestra en la [Figura B.3](#).

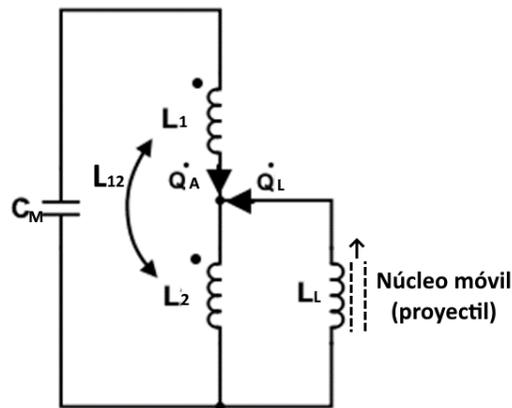


Figura B.3: *STRETCH-Meatgrinder* como un sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia durante las etapas I y II.

Para este circuito, la energía cinética total T del sistema es:

$$T = \frac{1}{2}(L_1 + L_2 + 2L_{12})\dot{Q}_A^2 + (L_{12} + L_2)\dot{Q}_A\dot{Q}_L + \frac{1}{2}L_2\dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 \quad (\text{B.3})$$

donde m es la masa del proyectil. Y su energía potencial U está dada por:

$$U = \frac{Q_A^2}{2C} + \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 - \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.4})$$

Por lo que el lagrangiano \mathcal{L} de esta etapa es:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}(L_1 + L_2 + 2L_{12})\dot{Q}_A^2 + (L_{12} + L_2)\dot{Q}_A\dot{Q}_L + \frac{1}{2}L_2\dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 - \frac{Q_A^2}{2C} - \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 + \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.5})$$

En este caso las únicas pérdidas que se consideraron fueron resistivas, por lo que las fuerzas generalizadas durante esta etapa fueron

$$F_{QA} = -(R_1 + R_2)\dot{Q}_A - R_2\dot{Q}_L \quad (\text{B.6})$$

$$F_{QL} = -R_2\dot{Q}_A - (R_2 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.7})$$

donde R_1 , R_2 , y R_L son las resistencias equivalentes de los devanados de las bobinas L_1 , L_2 , L_L , respectivamente.

Al minimizar la integral de acción mediante la aplicación del formalismo lagrangiano (véase [Ecuación \(3.20\)](#)) se obtienen las ecuaciones de movimiento para la etapa I y II de la operación del *STRETCH-Meatgrinder*:

$$(L_1 + L_2 + 2L_{12})\ddot{Q}_A + \frac{Q_A}{C} + (L_2 + L_{12})\ddot{Q}_L = -(R_1 + R_2)\dot{Q}_A - R_2\dot{Q}_L \quad (\text{B.8})$$

$$(L_2 + L_{12})\ddot{Q}_A + L_2\ddot{Q}_L + \pi a^2 N \dot{B} = -R_2\dot{Q}_A - (R_2 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.9})$$

$$N\dot{Q}_L = \frac{l + 2\beta}{\mu_0} B - M_0 \tanh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \times \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.10})$$

$$m\dot{z} = \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \times \begin{cases} 1 & \text{Entrando} \\ 0 & \text{Llenando} \\ -1 & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.11})$$

Al finalizar la etapa II, el capacitor queda completamente descargado, y el sentido de la corriente en L_1 cambia de dirección, de esta manera L_1 y L_2 se descargan en paralelo a través de la bobina del cañón, similar a lo que ocurre en un multiplicador de corriente XRAM, y el circuito equivalente de la etapa III se observa en la [Figura B4](#).

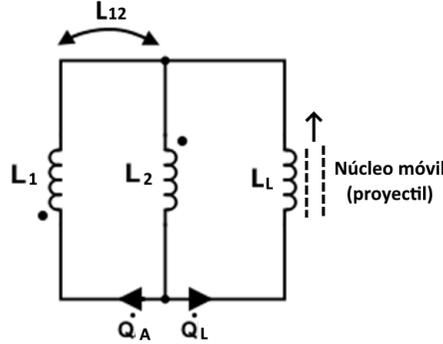


Figura B.4: Circuito equivalente del *STRETCH-Meatgrinder* como un sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia, durante la etapa III.

Durante esta etapa la energía cinética total en el sistema está dada por:

$$T = \frac{1}{2} (L_1 + L_2 + 2L_{12}) \dot{Q}_A^2 + (L_{12} + L_2) \dot{Q}_A \dot{Q}_L + \frac{1}{2} L_2 \dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2} m \dot{z}^2 \quad (\text{B.12})$$

y la energía potencial por:

$$U = \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 - \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

Por lo que el lagrangiano del sistema \mathcal{L} durante esta etapa será:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (L_1 + L_2 + 2L_{12}) \dot{Q}_A^2 + (L_{12} + L_2) \dot{Q}_A \dot{Q}_L + \frac{1}{2} L_2 \dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2} m \dot{z}^2 - \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 + \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.14})$$

y las fuerzas generalizadas están dadas por:

$$F_{Q_A} = -(R_1 + R_2)\dot{Q}_A - R_2\dot{Q}_L \quad (\text{B.15})$$

$$F_{Q_L} = -R_2\dot{Q}_A - (R_2 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.16})$$

Al aplicar el formalismo lagrangiano se observa que las [Ecuaciones \(B.10\)](#) y [\(B.11\)](#) siguen vigentes para esta etapa, y lo seguirán estando para todas las demás, mientras las dos ecuaciones restantes, relacionadas con sus variables eléctricas serán

$$(L_1 + L_2 + 2L_{12})\ddot{Q}_A + (L_2 + L_{12})\ddot{Q}_L = -(R_1 + R_2)\dot{Q}_A - R_2\dot{Q}_L \quad (\text{B.17})$$

$$(L_2 + L_{12})\ddot{Q}_A + L_2\ddot{Q}_L + \pi a^2 N \dot{B} = -R_2\dot{Q}_A - (R_2 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.18})$$

Al finalizar la etapa III, uno de los inductores queda totalmente descargado. En la [Figura B.5](#) se muestra el circuito equivalente cuando L_1 ha quedado totalmente descargado y solo queda L_2 suministrando corriente a la carga.

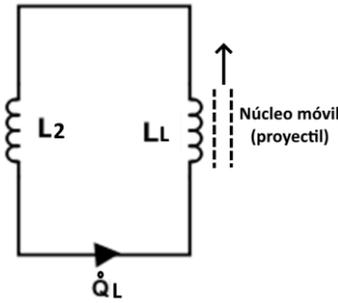


Figura B.5: Etapa IV del funcionamiento del *STRETCH-Meatgrinder* como sistema de almacenamiento para un acelerador de reluctancia, cuando la corriente en el inductor L_1 es la primera que decae.

Entonces la energía cinética total del sistema vendrá dada por:

$$T = \frac{1}{2}L_2\dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 \quad (\text{B.19})$$

y la potencial por:

$$U = \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 - \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.20})$$

Por lo que el lagrangiano será:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}L_2\dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 - \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 + \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.21})$$

y las fuerzas generalizadas están dadas por:

$$F_{QA} = 0 \quad (\text{B.22})$$

$$F_{QL} = -(R_2 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.23})$$

Y junto con las [Ecuaciones \(B.10\)](#) y [\(B.11\)](#), las dos ecuaciones de movimiento restantes serán

$$Q_A = 0 \quad (\text{B.24})$$

$$L_2\ddot{Q}_L + \pi a^2 N \dot{B} = -(R_2 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.25})$$

En caso que sea la corriente en L_2 la que decaiga primero, la corriente en L_1 será igual a la corriente en L_2 , pero en dirección contraria, como se muestra en la [Figura B.6](#).

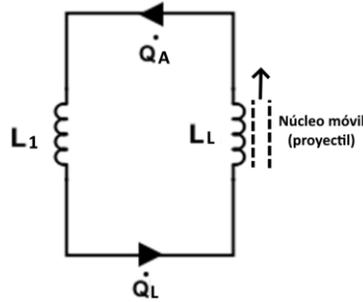


Figura B.6: Circuito equivalente de la etapa IV de la operación de un *STRETCH-Meatgrinder* actuando como un sistema de almacenamiento de energía para un acelerador de reluctancia, donde la corriente en L_2 decae primero.

En este caso la energía cinética total del sistema se expresa como:

$$T = \frac{1}{2}L_1\dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 \quad (\text{B.26})$$

y para la energía potencial seguirá siendo la misma expresión, [Ecuación \(B.20\)](#), que en el caso anterior por lo que el lagrangiano del sistema es:

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2}L_1\dot{Q}_L^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 - \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 + \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.27})$$

y las fuerzas generalizadas están dadas por:

$$F_{QL} = -(R_1 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.28})$$

Junto con las [Ecuaciones \(B.10\)](#) y [\(B.11\)](#), las dos ecuaciones de movimiento restantes serán:

$$\dot{Q}_A = -\dot{Q}_L \quad (\text{B.29})$$

$$L_1\ddot{Q}_L + \pi a^2 N \dot{B} = -(R_1 + R_L)\dot{Q}_L \quad (\text{B.30})$$

La etapa V, es una etapa especial porque puede darse en cualquier momento del proceso, es cuando se desconecta a la bobina de lanzamiento del acelerador de reluctancia del sistema de almacenamiento, y el circuito equivalente del *STRETCH-Meatgrinder* durante esta etapa puede observarse en la [Figura B.7](#). Los inductores se descargan en el capacitor, recuperando así la energía restante en ellos, en forma de campo eléctrico almacenado entre las terminales del capacitor.

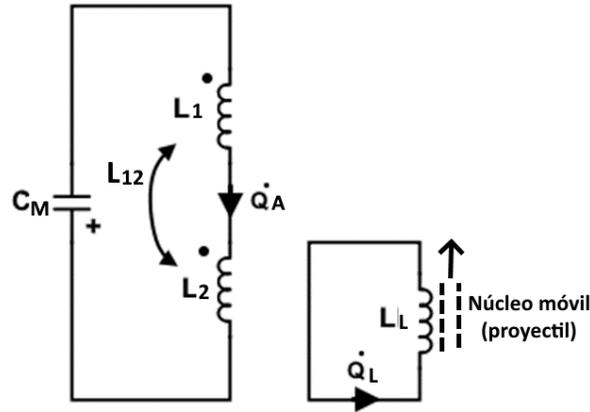


Figura B.7: Circuito equivalente del *STRETCH-Meatgrinder* en la etapa V de su operación, cuando se desconecta la bobina de lanzamiento del sistema de almacenamiento de energía.

La energía cinética total del sistema se expresa como:

$$T = \frac{1}{2}(L_1 + L_2 + 2L_{12})\dot{Q}_A^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2}m\dot{z}^2 \quad (\text{B.31})$$

y la potencial por

$$U = \frac{Q_A^2}{2C_M} + \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 - \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.32})$$

Por lo que el lagrangiano es

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (L_1 + L_2 + 2L_{12}) \dot{Q}_A^2 + \pi a^2 N \dot{Q}_L B + \frac{1}{2} m \dot{z}^2 - \frac{Q_A^2}{2C_M} - \pi a^2 \frac{l + 2\beta}{2\mu_0} B^2 + \pi a^2 \frac{\mu_r \mu_0}{\mu_r - 1} M_0^2 \ln \cosh \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r \mu_0} \frac{B}{M_0} \right) \begin{cases} z & \text{Entrando} \\ l & \text{Llenando} \\ (l + p - z) & \text{Saliendo} \end{cases} \quad (\text{B.33})$$

Y las fuerzas generalizadas:

$$F_{Q_A} = -(R_1 + R_2) \dot{Q}_A \quad (\text{B.34})$$

$$F_{Q_L} = -R_L \dot{Q}_L \quad (\text{B.35})$$

Las ecuaciones de movimiento obtenidas para esta etapa, junto con las [Ecuaciones \(B.10\)](#) y [\(B.11\)](#) son:

$$(L_1 + L_2 + 2L_{12}) \ddot{Q}_A + \frac{Q_A}{C_M} = -(R_1 + R_2) \dot{Q}_A \quad (\text{B.36})$$

$$\pi a^2 N \dot{B} = -R_L \dot{Q}_L \quad (\text{B.37})$$

B.2 Implementación del modelo en Simulink para su simulación

Se implementó el modelo desarrollado utilizando el software *Simulink*, como se muestra en la [Figura B.8](#), para su simulación.

En las [Figuras B.9](#) y [B.10](#) se muestran con detalle los subsistemas “*Selec esta*” y “*Selec est*”, encargados de hacer las transiciones entre los diferentes estados del desplazamiento del proyectil dentro de la bobina del lanzador. En el caso de “*Selec esta*” ([Figura B.9](#)), se monitorea la posición del proyectil para determinar la forma en que el campo magnético B afectará a la magnitud y el sentido de la fuerza ejercida sobre el proyectil. En “*Selec est*” ([Figura B.10](#)) también se monitoreará la posición del proyectil para determinar cómo afectará esta variable a la corriente que circula a través de la bobina del lanzador \dot{Q}_L .

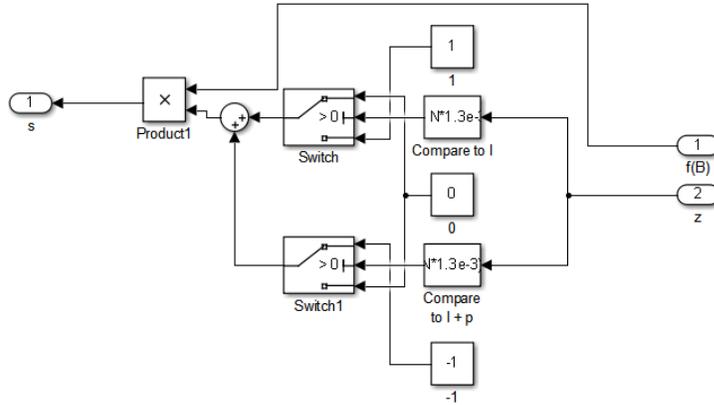


Figura B.9: Detalle del subsistema “Selec esta”.

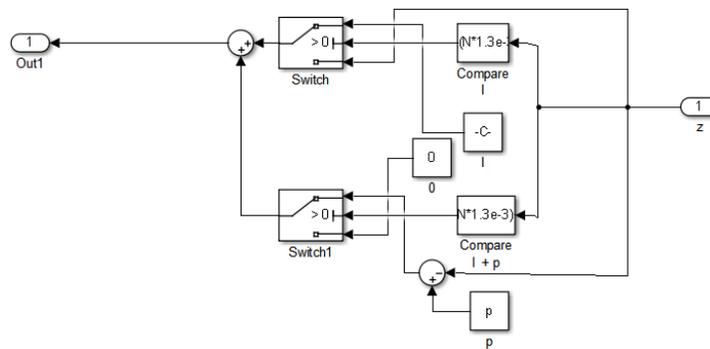


Figura B.10: Detalle del subsistema “Selec est”.

El subsistema “Bandera cambio de polaridad” monitorea el voltaje en el capacitor durante las etapas I y II del *STRETCH-Meatgrinder*, y hace la función de D_1 (véase [Figura B.1](#)): impedirá que el voltaje del capacitor cambie de polaridad al término de la etapa II. Una vista detallada de este subsistema puede verse en la [Figura B.11](#).

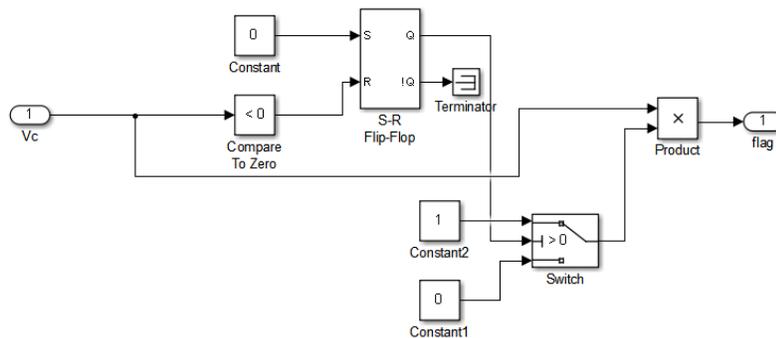


Figura B.11: Detalle del subsistema “Bandera cambio de polaridad”.

El subsistema “III-IV” se encarga de hacer la transición entre los estados III y IV del *STRETCH-Meatgrinder*, monitorea las corrientes en los inductores del *STRETCH-Meatgrinder*: L_1 , L_2 , para determinar cuál de ellas llega primero a cero, y seleccionar al

conjunto de ecuaciones de movimiento apropiadas. En la [Figura B.12](#) puede observarse una visión detallada de este subsistema.

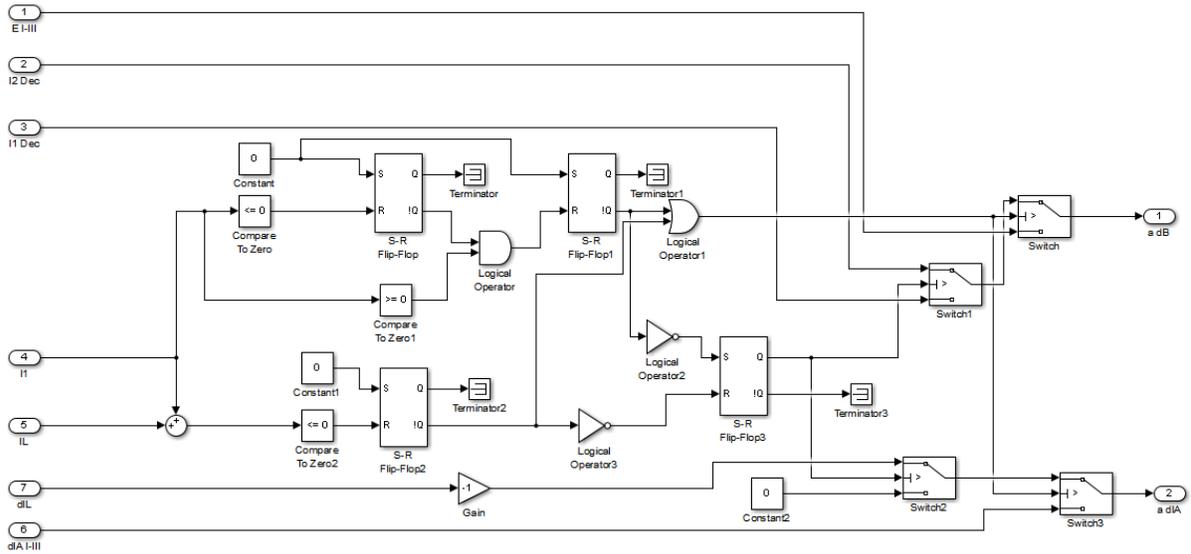


Figura B.12: Detalle del subsistema “III-IV”.

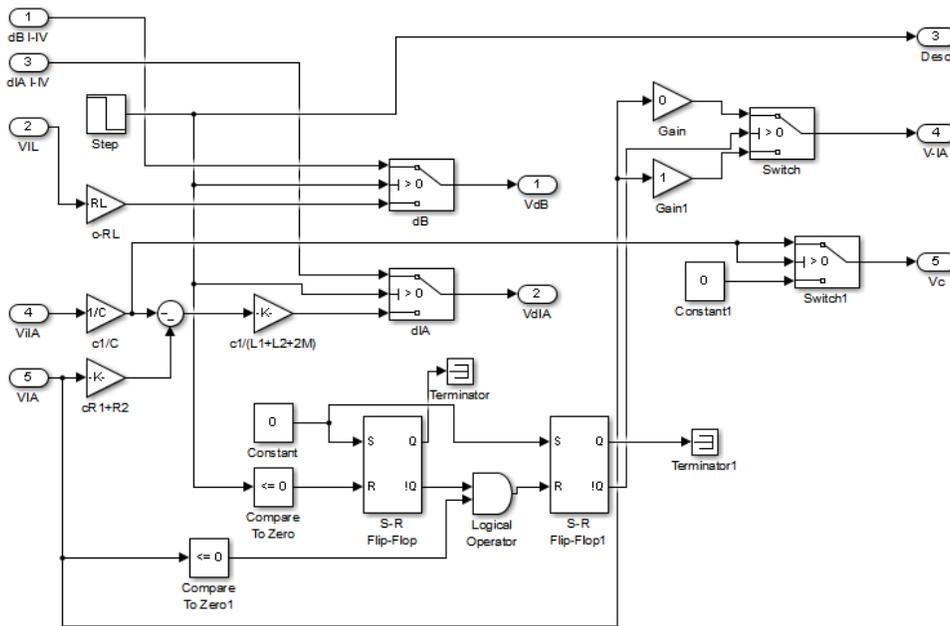


Figura B.13: Detalle del subsistema “IV-V”.

El subsistema “IV-V”, mostrado en detalle en la [Figura B.13](#), se encarga de desconectar a la bobina lanzamiento del resto del sistema de almacenamiento. En este caso la señal escalón observada, es el análogo de la señal de control a la entrada de una compuerta de un dispositivo semiconductor. Sus salidas son la corriente en el inductor L_1 y el voltaje en el capacitor, que dejará de ser cero, para cargarse y así actuar como un sistema de recuperación de energía.

Es de notarse que al desconectar la carga del STRETCH-Meatgrinder, se tiene que plantear una nueva condición inicial para la corriente en el inductor L_1 . La magnitud de dicha condición inicial $I_{AV(0+)}$, se obtiene con

$$I_{AV(0+)} = \frac{I_{AV(0-)}R_1 + I_{2V(0-)}R_2}{R_1 + R_2} \quad (\text{B.38})$$

donde $I_{AV(0-)}$ e $I_{2V(0-)}$ son las corrientes en los inductores L_1 y L_2 justo antes del disparo de la compuerta del interruptor de apertura, respectivamente. En el modelo implementado con *Simulink* la captura de la corriente terminal de la etapa anterior la llevan a cabo las memorias “V-IC-L1” y “V-IC-L2”, y la nueva condición inicial la determina el subsistema “IC-V”, que se muestra a detalle en la [Figura B.14](#).

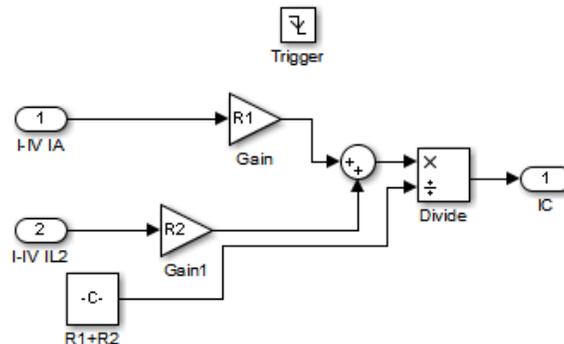


Figura B.14: Detalle del subsistema “IC-V”.

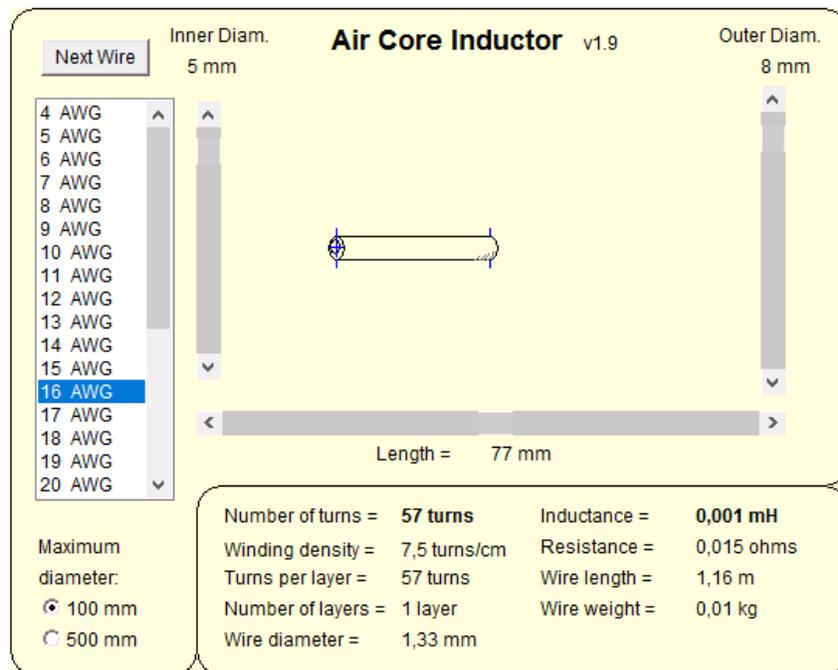
B.3 Prueba del modelo implementado mediante la comparación con simulaciones hechas con el software *PSIM*

Para probar que las formas de onda de las corrientes y los voltajes en los inductores y en el capacitor, respectivamente; suministradas por las simulaciones hechas con modelo implementado en *Simulink* se implementó el circuito eléctrico equivalente del *STRETCH-Meatgrinder* en el software *PSIM*.

Para representar a la bobina del cañón se propuso un inductor cilíndrico con núcleo de aire, equivalente a la bobina del cañón sin un proyectil en su interior; utilizando el simulador de inductores suministrado por B. Hansen en [131] ([Figura B.15](#)). Las características del inductor se desarrollaron a partir de las características de un proyectil similar a un clavo de tres pulgadas como los utilizados por varios modelos de pistolas de clavos comercialmente disponibles, siguiendo recomendaciones generales para lograr eficiencias relativamente altas ($p \approx 1$ para maximizar la transferencia de flujo magnético hacia el proyectil, que el proyectil y la bobina de lanzamiento fueran de diámetros similares, para aumentar la superficie a magnetizar del proyectil, y que la bobina fuera elaborada con alambre de calibre grueso para reducir la resistencia del devanado de la bobina). Las características físicas del proyectil y la bobina pueden verse en la [Tabla B.I](#).

Tabla B.I: Características de la bobina de lanzamiento y el proyectil simulados

Bobina de lanzamiento			
Parámetro	Abreviatura	Magnitud	Unidades
Longitud	l	77	mm
Radio interno	a	2.5	mm
Número de vueltas	N	57	Adimensional
Resistencia equivalente	R_L	15	m Ω
Calibre del alambre		16	AWG
Inductancia (sin proyectil)	L_L	1	μ H
Proyectil ferromagnético			
Longitud	p	77	mm
Espacio entre proyectil y cubierta	β	835	μ m
Masa	m	4.32	g
Inducción magnética de saturación	B_{sat}	871.2	mT
Permeabilidad magnética relativa	μ_r	2500	Adimensional

**Figura B.15:** Características físicas de la bobina de lanzamiento simulada.

El *STRETCH-Meatgrinder* se diseñó en base a un inductor cilíndrico con núcleo de aire con tres capas de alambre dividido en dos: donde L_1 esta constituido por las dos

capas más internas, y L_2 por la capa externa. Las características propuestas para el *STRETCH-Meatgrinder* se muestran en la [Tabla B.II](#).

Tabla B.II: Características del circuito *STRETCH-Meatgrinder* simulado.

Parámetro	Abreviatura	Magnitud	Unidades
Inductancia de L_1	L_1	15	μH
Inductancia de L_2	L_2	4	μH
Inductancia mutua	L_{12}	7	μH
Resistencia de los devanados de L_1	R_1	30	$\text{m}\Omega$
Resistencia de los devanados de L_2	R_2	15	$\text{m}\Omega$
Corriente inicial en los inductores acoplados	$I_A(0)$	1.3	kA
Capacitancia de C_M	C_M	1	μF

En la [Figura B.16](#) se muestra el circuito equivalente implementado en PSIM. Este circuito, y el modelo implementado con *Simulink* se simularon con un paso de $1 \cdot 10^{-8}$ s. En la [Figura B.17](#) se pueden observar las formas de onda de las corrientes en cada inductor, obtenidas con ambas simulaciones, cuando se omitió la etapa V del *STRETCH-Meatgrinder* (desconexión de la bobina del cañón). Se observan diferencias, pero estas pueden ser atribuidas al efecto del paso del proyectil por el interior de la bobina del cañón. En la [Figura B.18](#) se pueden ver las formas de onda de los voltajes para cada simulación.

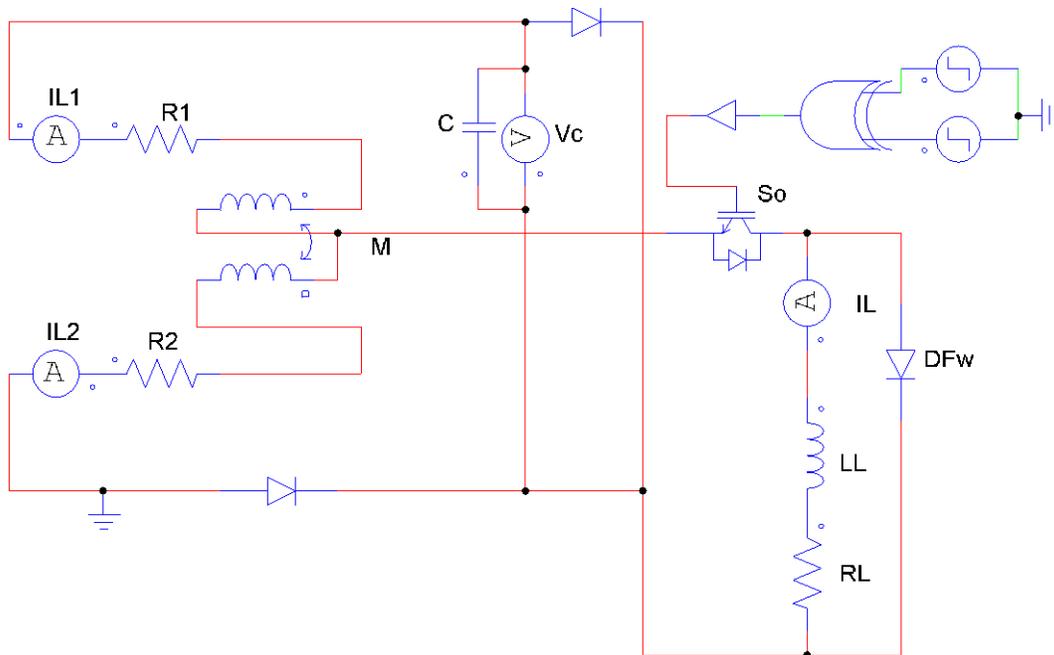


Figura B.16: Circuito de prueba implementado con el software PSIM. En este circuito no se muestra el efecto del proyectil pasando dentro de la bobina de lanzamiento (representada por el inductor LL y el resistor RL):

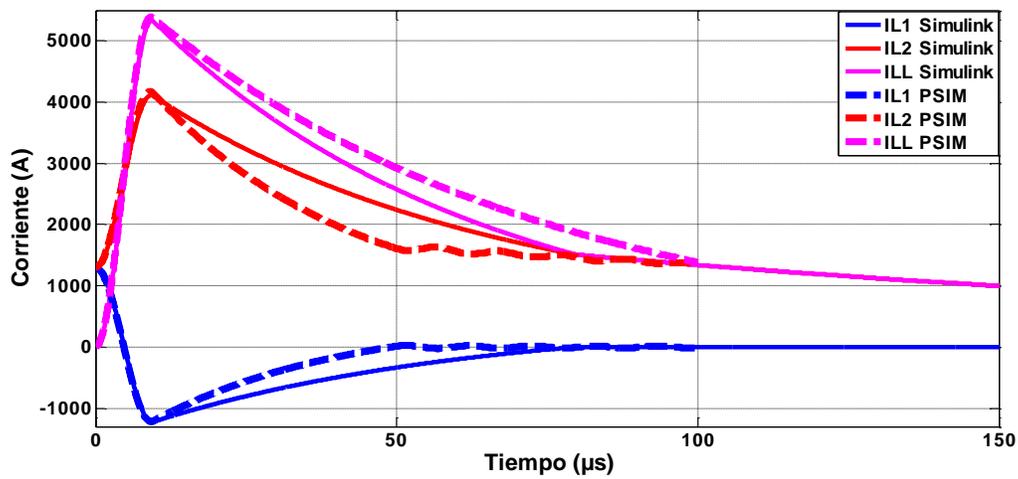


Figura B.17: Formas de onda en cada inductor del sistema obtenidas en ambas simulaciones.

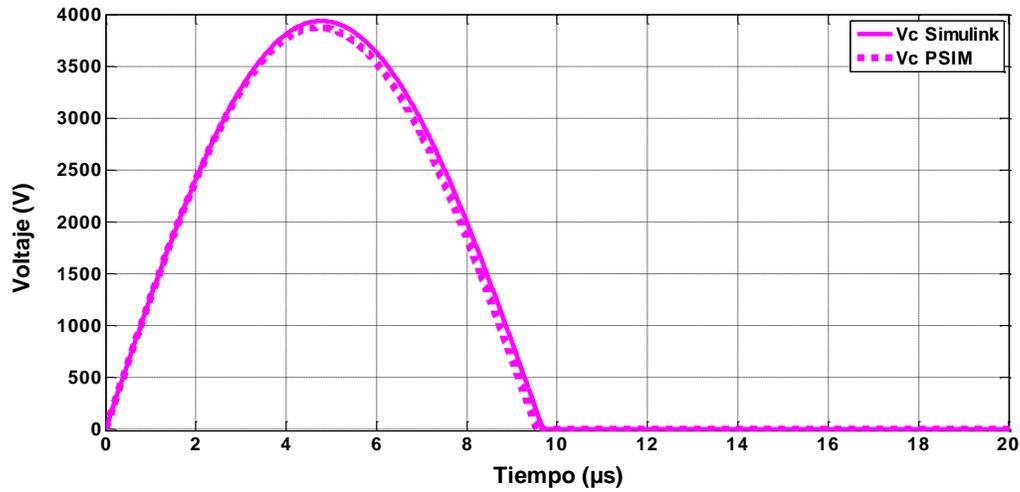


Figura B.18: Formas de onda de la tensión en el capacitor para cada simulación.

En la [Figura B.19](#) se pueden observar el resultado de la simulación obtenida para la densidad del campo magnético al interior de la bobina de lanzamiento, y en la [Figura B.20](#) se muestra la velocidad de salida desarrollada por el proyectil ferromagnético. Ninguna de esas variables pudieron ser respaldadas mediante otro tipo de simulaciones, y solo se muestran con fines ilustrativos de las predicciones que puede llevar a cabo el modelo. Es de esperarse que las predicciones, en cuanto a la velocidad de salida desarrollada por el proyectil ferromagnético, no sean muy alejadas de lo que se obtendría en resultados experimentales, ya que modelos similares, que también usan el formalismo lagrangiano, suelen hacer predicciones bastante precisas con respecto a la velocidad de salida del proyectil.

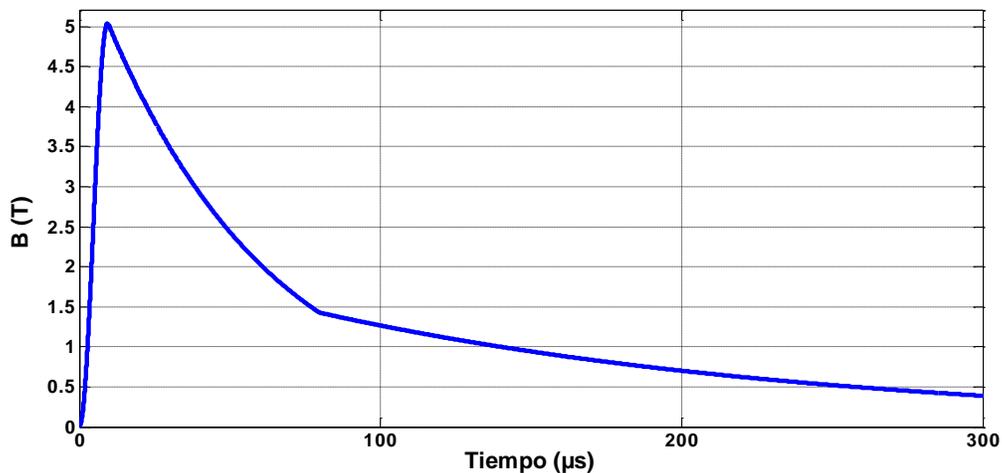


Figura B.19: Densidad de campo magnético al interior de la bobina de lanzamiento.

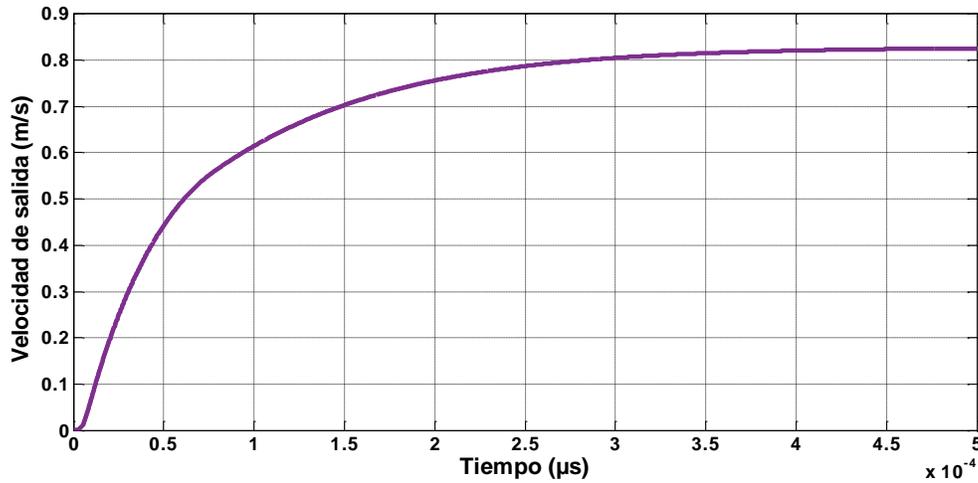


Figura B.20: Velocidad de salida simulada del proyectil.

En la [Figura B.21](#) se muestran las formas de onda para las corrientes en cada inductor para ambas simulaciones cuando se desconecta a la bobina del cañón del *STRETCH-Meatgrinder* (hay transición hacia la etapa V). Se observan menos discrepancias entre las corrientes, este hecho muy probablemente atribuible a que la bobina del cañón y el *STRETCH-Meatgrinder* dejaron de interactuar a partir de $t = 20 \mu\text{s}$. En la [Figura B.22](#) se muestra el voltaje en el capacitor para cada simulación. Se observa como se recupera la energía remanente en los inductores L_1 y L_2 y se almacena de nuevo en forma de un nivel de tensión eléctrica en el capacitor C_M . Se observa un nivel de voltaje final ligeramente menor en el caso de la simulación del modelo implementada con *SIMULINK*, situación de esperarse, ya que parte de la energía eléctrica inicialmente almacenada que no se disipó en forma de calor, se transformó en energía cinética como movimiento desarrollado por el proyectil ferromagnético.

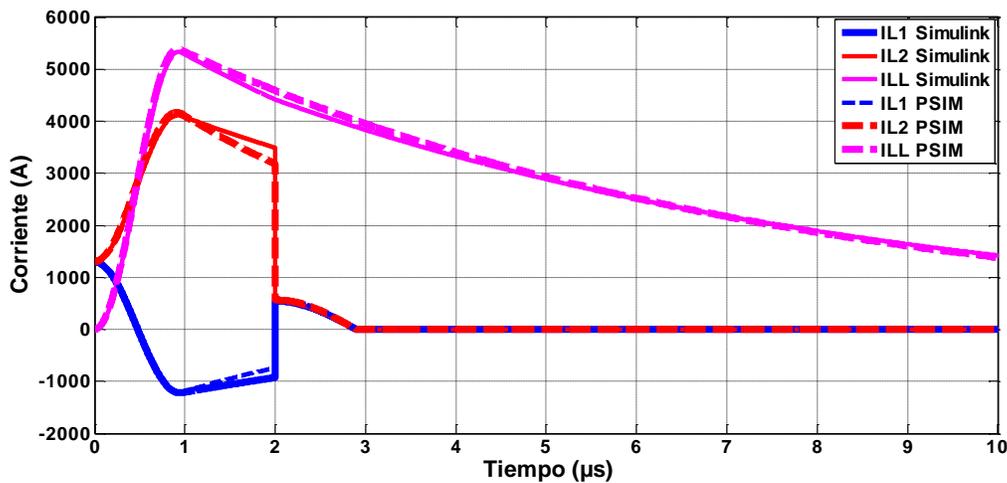


Figura B.21: Formas de onda de las corrientes en cada inductor cuando la bobina de lanzamiento se desconecta del *STRETCH-Meatgrinder* a los 20 μs .

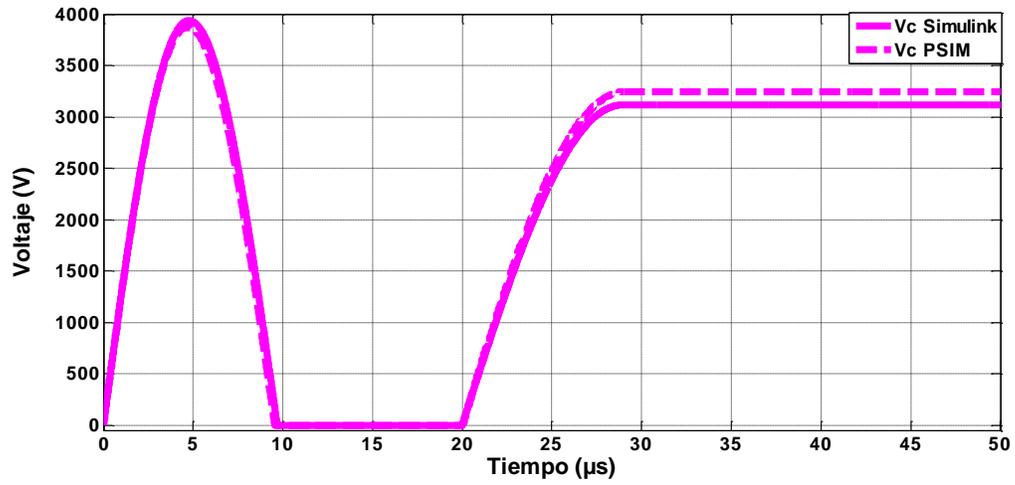


Figura B.22: Formas de onda del voltaje en el capacitor C_M para las simulaciones hechas con Simulink, y la hecha con PSIM,

Anexo C: Ecuaciones que describen el comportamiento de las corrientes en un *ringer*

Se dedujeron las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de un sistema de almacenamiento tipo *ringer* [30] para tres casos: el *ringer* funcionando solo con los dos inductores de almacenamiento magnéticamente acoplados L_1 y L_2 , un *ringer* con una carga totalmente inductiva L_L , y un *ringer* con pérdidas resistivas en serie con cada inductor cuya carga es la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia.

En este anexo se presentan las ecuaciones deducidas para las corrientes de los dos primeros casos: el del *ringer* ideal sin carga ni pérdidas y el del *ringer* ideal sin pérdidas resistivas con una carga puramente inductiva no acoplada magnéticamente con los otros inductores del circuito, como aproximaciones útiles al comportamiento de un *ringer* trabajando como un sistema de almacenamiento de energía para un acelerador de reluctancia donde se trabaje con un conjunto de inductores de almacenamiento adicionales, o con una bobina de lanzamiento/almacenamiento como la desarrollada en este trabajo de tesis respectivamente. Todo esto para hacer estimaciones aproximadas de las corrientes y los voltajes que experimentarán los componentes utilizados en un circuito con componentes reales.

C.1 El *ringer* ideal sin carga

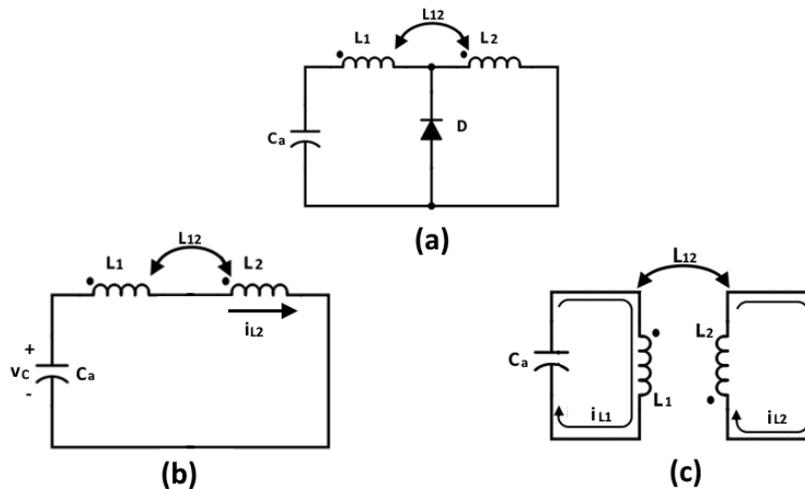


Figura C.1: Diagrama del *ringer* ideal sin carga a) y sus dos etapas de funcionamiento, (b) la etapa de carga y (c) la etapa de multiplicación de corriente.

El funcionamiento del *ringer* con componentes ideales sin carga puede verse en la [Figura C.1](#), que se divide en una etapa de carga y una de multiplicación de corriente. Durante la primera etapa, la corriente en ambos inductores es la misma, y se alcanza un primer pico de corriente I_{P1} , [Ecuación \(C.1\)](#)

$$I_{P1} = \sqrt{\frac{C_a}{(L_1 + L_2 + 2L_{12})}} V_{Ci} \quad (C.1)$$

lo que ocurre en el instante de tiempo T_{P1}

$$T_{P1} = \frac{\pi}{\sqrt{4C_a(L_1 + L_2 + 2L_{12})}} \quad (C.2)$$

Inmediatamente después del instante T_{P1} , empieza la etapa de multiplicación de corriente: la polaridad del voltaje en C_a se revierte y el diodo D se cierra, el circuito equivalente de esta etapa puede verse en la [Figura C.1 \(b\)](#). La corriente en L_2 cuya inductancia es usualmente menor que L_1 , empieza a incrementarse hasta que alcanza un segundo pico de corriente I_{P2} dado por

$$I_{P2} = \frac{L_{12}I_{P1} + \sqrt{L_{12}^2 I_{P1}^2 - L_2(L_1 I_{P1}^2 - C_a V_i^2)}}{L_2} + I_{P1} \quad (C.3)$$

lo que ocurre en el instante de tiempo T_{P2}

$$T_{P2} = \sqrt{\pi^2 C_a \frac{L_1 L_2 - L_{12}^2}{L_2}} + T_{P1} \quad (C.4)$$

Durante esta etapa la corriente fluyendo a través de L_1 (i_{L1}) será una senoide atrasada 90° con respecto al voltaje entre las terminales del capacitor C_a (v_C), y la corriente en L_2 (i_{L2}) será una senoide con un componente de CD de magnitud $(I_{P1} + I_{P2})/2$, y continuarán oscilando, como puede verse en la [Figura C.2](#), indefinidamente a una frecuencia ω_R (rad/s) dada por $2\pi/\omega$

$$\omega_R = \sqrt{\frac{L_2}{C_a(L_1 L_2 - L_{12}^2)}} \quad (C.5)$$

con sus valores máximos y mínimos mostrados en la [Tabla C.I](#).

Tabla C.I: Valores máximos y mínimos de las corrientes y del voltaje en el capacitor en un ringer ideal sin carga.

Variable	Valor máximo	Valor mínimo
i_{L1}	I_{P1}	$-I_{P1}$
i_{L2}	I_{P2}	I_{P1}
v_C	$\sqrt{\frac{L_1}{C_a}} I_{P1}$	$-\sqrt{\frac{L_1}{C_a}} I_{P1}$

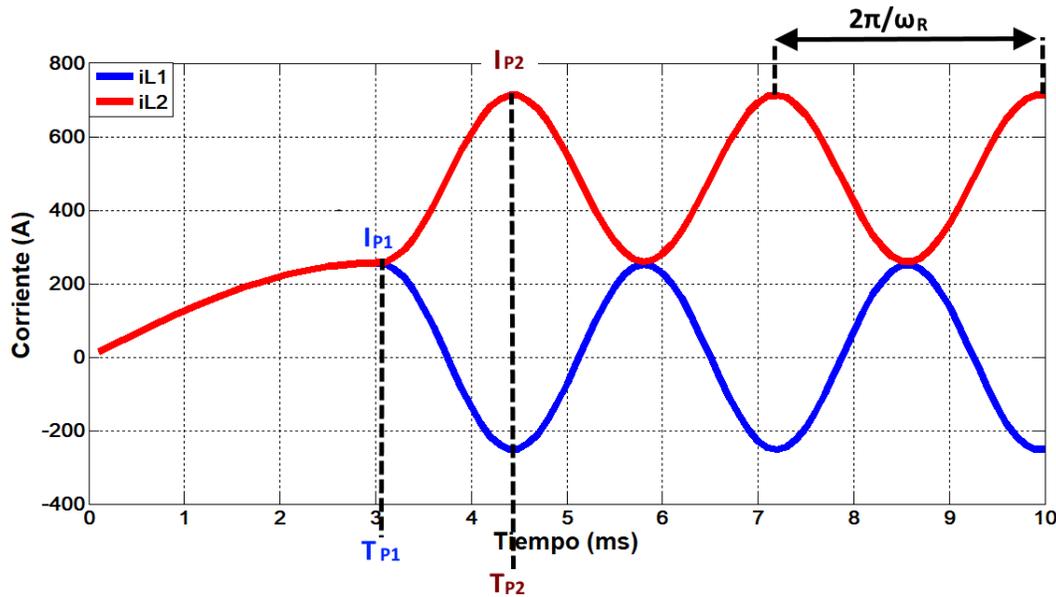


Figura C.2: Formas de onda de las corrientes en los inductores de almacenamiento de un ringer sin carga, con componentes ideales. En este circuito C_a fue 1 mF, V_{Ci} 500 V, L_1 1 mH, L_2 1mH, y L_{12} 900 μ H.

C.2 El *ringer* ideal con una carga inductiva no acoplada magnéticamente

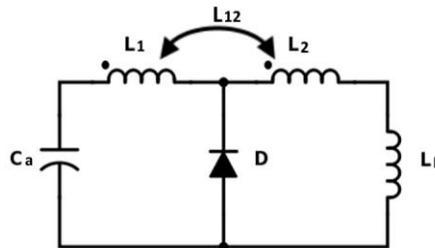


Figura C.3: Ringer con una carga inductiva L_L no acoplada magnéticamente.

Debido a la naturaleza inductiva de la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia, una aproximación útil al comportamiento de este tipo de lanzador con un *ringer* como sistema de almacenamiento de energía con un conjunto de inductores de

almacenamiento adicionales, es el *ringer* con una carga inductiva L_L no acoplada magnéticamente, como puede verse en la [Figura C.3](#).

Esta configuración tiene las mismas etapas de operación y, aparte de la adición de L_L , comparte las mismas variables de interés que el *ringer* sin carga. Para este caso las [Ecuaciones \(C.1\)](#), [\(C.2\)](#), [\(C.3\)](#), [\(C.4\)](#), [\(C.5\)](#) se convierten en:

$$I_{P1} = \sqrt{\frac{C_a}{L_1 + L_2 + 2L_{12} + L_L}} V_{Ci} \quad (C.6)$$

$$T_{P1} = \frac{\pi}{\sqrt{4C_a(L_1 + L_2 + 2L_{12} + L_L)}} \quad (C.7)$$

$$I_{P2} = \frac{L_{12}I_{P1} + \sqrt{L_{12}^2 I_{P1}^2 - (L_2 + L_L)(L_1 I_{P1}^2 - C_a V_i^2)}}{L_2 + L_L} + I_{P1} \quad (C.8)$$

$$T_{P2} = \pi \sqrt{C_a \frac{L_1(L_2 + L_L) - L_{12}^2}{L_2 + L_L}} + T_{P1} \quad (C.9)$$

$$\omega_R = \sqrt{\frac{L_2 + L_L}{C_a [L_1(L_2 + L_L) - L_{12}^2]}} \quad (C.10)$$

Las formas de onda de las corrientes a través de sus inductores y el voltaje entre las terminales de C_a serán similares al del *ringer* ideal sin carga, y sus valores máximos y mínimos están dados por las mismas expresiones que las dadas en la [Tabla C.I](#).

Las limitaciones para estas aproximaciones al comportamiento de un acelerador de reluctancia, con un *ringer* como sistema de almacenamiento, son que la inductancia de su bobina de lanzamiento es variable y dependiente de la posición y de las propiedades magnéticas del proyectil. Además no se están considerando las pérdidas mecánicas y eléctricas. Sin embargo es una primera aproximación útil para poder estimar la capacidad de los componentes electrónicos de un diseño dado.

Anexo D: Productos obtenidos durante el desarrollo del trabajo de tesis

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se escribió y se presentó, el 21 de junio de 2016, el artículo "*Experimental results concerning to the effects of the initial position of the projectile on the conversion efficiency of a reluctance accelerator*" en la Treceava Conferencia Internacional de Electrónica de Potencia (CIEP). DOI: 10.1109/ciep.2016.7530737. En dicho artículo se habla de la relación entre la posición inicial de un proyectil ferromagnético en la bobina de lanzamiento de un acelerador de reluctancia y la eficiencia de conversión del mismo. Se encontró que existe un valor de posición óptima para una combinación de lanzador, energía inicialmente almacenada, y proyectil dada.

En junio de 2018 se presentó una solicitud de patente ante el IMPI de la bobina de lanzamiento/almacenamiento desarrollada para el sistema de almacenamiento del prototipo construido, descrita en el Capítulo 3 de este trabajo de tesis. Con el título "*Bobina de lanzamiento para un acelerador de reluctancia*", cuyo número de archivo es MX/a/2018/006873.

En mayo de 2019 se publicó el artículo "*The Ringer as an Inductive Power Source for a Reluctance Accelerator*" en la revista IEEE Transactions on Plasma Science. DOI: 10.1109/TPS.2019.2899103. En este artículo se planteó por primera vez en la literatura la combinación de un acelerador de reluctancia con un sistema de almacenamiento de energía inductivo-capacitivo, y no puramente capacitivo como en todos los ejemplos encontrados.

Referencias

- [1] S. Hundertmark, "Applying railgun technology to small satellite launch," in *Recent Advances in Space Technologies (RAST), 2011 5th International Conference on*, 2011, pp. 747-751.
- [2] P. Suryawanshi, A. Chavan, L. Jamkar, S. Pandey, and K. Kanakgiri, "Analysis of linear induction motor for Aircraft Launch System considering end-effects," in *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, 2016, pp. 1-6.
- [3] L. Jun, C. Ronggang, and L. Shizhong, "The development of EML technology in China," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, 2012, pp. 1-5.
- [4] J. C. Schaaf, R. C. Zowarka, K. Davey, and J. M. Weldon, "The AMT maglev test sled-EML weapons technology transition to transportation," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 33, pp. 379-383, 1997.
- [5] K. A. Polzin, J. E. Adwar, and A. K. Hallock, "Optimization of Electrodynamic Energy Transfer in Coilguns With Multiple, Uncoupled Stages," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 49, pp. 1453-1460, 2013.
- [6] G. W. Slade, "A simple unified physical model for a reluctance accelerator," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 4270-4276, 2005.
- [7] H. Chen, X. Liu, and T. Xu, "Design and optimization of single phase tubular switched reluctance linear launcher," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2014 17th International Symposium on*, 2014, pp. 1-6.
- [8] E. Owlia, S. A. Mirjalili, and M. Shahnazari, "Design and modeling of an electromagnetic launcher for weft insertion system," *Textile Research Journal*, vol. 89, pp. 834-844, 2019/03/01 2018.
- [9] I. R. McNab, "Brief History of the EML Symposia: 1980–2018," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, pp. 2136-2142, 2019.
- [10] R. J. Kaye, E. C. Cnare, M. Cowan, B. W. Duggin, R. J. Lipinski, B. M. Marder, *et al.*, "Design and performance of Sandia's contactless coilgun for 50 mm projectiles," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 680-685, 1993.
- [11] A. Badel, P. Tixador, and M. Arriet, "Optimized use of superconducting magnetic energy storage for electromagnetic rail launcher powering," *Superconductor Science and Technology*, vol. 25, p. 014006, 2011/12/01 2011.
- [12] T. G. Engel and E. J. Timpson, "A general theory of DC electromagnetic launchers," *Journal of Applied Physics*, vol. 118, p. 083902, 2015.
- [13] Y. Zhang, J. Lu, S. Tan, B. Li, H. Wu, and Y. Jiang, "Heat Generation and Thermal Management of a Rapid-Fire Electromagnetic Rail Launcher," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, pp. 2143-2150, 2019.
- [14] L. M. Cooper, A. R. Van Cleef, B. T. Bristoll, and P. A. Bartlett, "Reluctance Accelerator Efficiency Optimization via Pulse Shaping," *Access, IEEE*, vol. 2, pp. 1143-1148, 2014.

- [15] D. A. Bresie and J. A. Andrews, "Design of a reluctance accelerator," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 623-627, 1991.
- [16] G. W. Slade. (2006). *Notes on the effects of metallic coil sheaths and armature losses in reluctance coilguns*. Available: <http://users.skynet.be/BillsPage/MassAccelerators.html>
- [17] D. Zhiye, Z. Ting, R. Jiangjun, H. Guodong, Z. Yadong, Y. Yao, *et al.*, "Research on Electromagnetic Performance Affected by Shielding Enclosure of a Coil Launcher," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 1077-1083, 2013.
- [18] J. L. Rivas, "Validación experimental de un modelo matemático para un acelerador de reluctancias," Maestría, Departamento de Ingeniería Electrónica, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, México, 2015.
- [19] F. Daldaban and V. Sari, "Design and implementation of a three-coil linear reluctance launcher," in *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International*, 2014, pp. 1084-1088.
- [20] G. W. Slade, "Fast finite-element solver for a reluctance mass accelerator," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 2184-2192, 2006.
- [21] R. J. Kaye, B. N. Turman, and S. L. Shope, "Applications of coilgun electromagnetic propulsion technology," in *Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. Conference Record of the Twenty-Fifth International*, 2002, pp. 703-707.
- [22] T. Barrera and R. Beard, "Exploration and verification analysis of a Linear Reluctance Accelerator," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2014 17th International Symposium on*, 2014, pp. 1-6.
- [23] X. Hongjun, L. Bin, L. Zhiyuan, and K. Zhao, "Design and Experiment of Reluctance Electromagnetic Launcher With New-Style Armature," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 1066-1069, 2013.
- [24] I. R. McNab, "Large-Scale Pulsed Power Opportunities and Challenges," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 42, pp. 1118-1127, 2014.
- [25] D. K. Singh, A. Gupta, R. Mittal, and V. Saggar, "Penetrating injury to cervical spine from a nail gun," *The Indian Journal of Neurotrauma*, vol. 6, pp. 147-149, 2009.
- [26] G. M. Buchalter, L. P. Johnson, M. V. Reichman, and J. Jacobs, "Penetrating trauma to the head and neck from a nail gun: a unique mechanism of injury," *Ear, Nose and Throat Journal*, vol. 81, pp. 779-784, 2002.
- [27] B. J. Heard, *Handbook of firearms and ballistics: examining and interpreting forensic evidence* vol. 1: John Wiley & Sons, 2011.
- [28] (2012). *Nailgun as a Weapon?* Available: <https://www.youtube.com/watch?v=hZUeQBqBdIg>
- [29] G. W. Slade. (2004). *A Brief Theoretical Study of Reluctance-based Mass Accelerators and Actuators*. Available: <http://users.skynet.be/BillsPage/MassAccelerators.html>
- [30] J. L. Rivas-Camacho, M. Ponce-Silva, and V. H. Olivares-Peregrino, "The Ringer as an Inductive Power Source for a Reluctance Accelerator," *IEEE Transactions on Plasma Science*, pp. 1-7, 2019.

- [31] A. Mosallanejad and A. Shoulaie, "A novel structure to enhance magnetic force and velocity in tubular linear reluctance motor," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 20, pp. 1063-1076, 2012.
- [32] B. D. Bezerra, "ESTUDO E APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO ELETROMAGNÉTICA," Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [33] J. Castillo, N. Gama, and D. Amaya, "Projectile accelerator prototype using electromagnetic fields," *Res. J. Appl. Sci.*, vol. 13, pp. 59-66, 2018.
- [34] J. L. Rivas-Camacho, M. Ponce-Silva, and V. H. Olivares-Peregrino, "Experimental results concerning to the effects of the initial position of the projectile on the conversion efficiency of a reluctance accelerator," in *2016 13th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, 2016, pp. 92-97.
- [35] C. N. Nybeck, D. A. Dodson, D. A. Wetz, and J. M. Heinzl, "Characterization of Ultracapacitors for Transient Load Applications," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, pp. 2493-2499, 2019.
- [36] Y. Uehara and S. Furuya, "Coilgun energized by commercial power supply," in *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, 2008, pp. 1420-1425.
- [37] O. Liebfried, V. Brommer, and S. Scharnholz, "Development of XRAM generators as inductive power sources for very high current pulses," in *Pulsed Power Conference (PPC), 2013 19th IEEE*, 2013, pp. 1-6.
- [38] M. Shangang, Y. Xinjie, and L. Zhen, "Determining Key Parameters for the STRETCH Meat Grinder Circuit," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 1485-1490, 2015.
- [39] O. Liebfried and V. Brommer, "A Four-Stage XRAM Generator as Inductive Pulsed Power Supply for a Small-Caliber Railgun," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 2805-2809, 2013.
- [40] H. D. Fair, "Electromagnetic launch science and technology in the United States enters a new era," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 158-164, 2005.
- [41] J. Libich, J. Máca, J. Vondrák, O. Čech, and M. Sedlaříková, "Supercapacitors: Properties and applications," *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 224-227, 2018/06/01/ 2018.
- [42] R. Rath, P. Kumar, S. Mohanty, and S. K. Nayak, "Recent advances, unsolved deficiencies, and future perspectives of hydrogen fuel cells in transportation and portable sectors," *International Journal of Energy Research*, vol. 0, 25 July 2019 2019.
- [43] I. R. McNab and F. C. Beach, "Naval Railguns," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 463-468, 2007.
- [44] S. Scharnholz, V. Brommer, G. Buderer, and E. Spahn, "High-power MOSFETs and fast-switching thyristors utilized as opening switches for inductive storage systems," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, pp. 437-441, 2003.
- [45] W. Shaopeng, C. Dansong, and C. Shumei, "Optimization design and research of a hybrid excitation compulsator," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, 2012, pp. 1-4.
- [46] E. Dierks, I. R. McNab, J. A. Mallick, and S. Fish, "Battery–Inductor Parametric System Analysis for Electromagnetic Guns," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 268-274, 2011.

- [47] A. Sitzman, D. Surls, and J. Mallick, "Modification and Testing of a Battery-Inductor Repetitive Pulsed Power Supply for a Small Railgun," in *Plasma Science, 2007. ICOPS 2007. IEEE 34th International Conference on*, 2007, pp. 1014-1014.
- [48] M. G. Pimperton, "The meatgrinder : an efficient current-multiplying inductive energy storage and transfer circuit," Doctor of Philosophy Doctoral, Department of Electronic and Electrical Engineering, Loughborough University of Technology, Leicestershire, UK, 1990.
- [49] G. Albright, J. Edie, and S. Al-Hallaj, "A comparison of lead acid to lithium-ion in stationary storage applications," *Published by AllCell Technologies LLC*, 2012.
- [50] E. M. Krieger, J. Cannarella, and C. B. Arnold, "A comparison of lead-acid and lithium-based battery behavior and capacity fade in off-grid renewable charging applications," *Energy*, vol. 60, pp. 492-500, 2013.
- [51] J. Larminie and J. Lowry, *Electric vehicle technology explained*: John Wiley & Sons, 2012.
- [52] C. Simpson, "Characteristics of rechargeable batteries," *National Semiconductor*, pp. 1-12, 2011.
- [53] Panasonic. (2017). *Specifications for NCR18650GA*. Available: <https://cdn.shopify.com/s/files/1/0674/3651/files/panasonic-ncr18650-ga-spec-sheet.pdf>
- [54] K. Khan, M. A. Hossain, A. Obaydullah, and M. Wadud, "PKL Electrochemical Cell and the Peukert's Law," *IJARIIIE*, vol. 4, pp. 4219-4227, 2018.
- [55] R. Harchandani and P. Gorade, "Pulse forming network for Marx generator with boosting operation," in *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, 2017, pp. 1768-1771.
- [56] A. A. Neuber, Y. J. Chen, J. C. Dickens, and M. Kristiansen, "A Compact, Repetitive, 500kV, 500 J, Marx Generator," in *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, 2005, pp. 1203-1206.
- [57] M. Giesselmann and T. Heeren, "Rapid capacitor charger," in *Conference Record of the Twenty-Fifth International Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop.*, 2002, pp. 146-149.
- [58] G. A. Mesyats, *Pulsed Power* vol. 1. Aufl.: Springer Science + Business Media, 2005.
- [59] R. Allen and J. Neri, "A Battery Powered, 200-KW Rapid Capacitor Charger for a Portable Railgun in Burst Mode Operation at 3 RPS," in *Plasma Science, 2007. ICOPS 2007. IEEE 34th International Conference on*, 2007, pp. 867-867.
- [60] B. M. Huhman, J. M. Neri, and D. A. Wetz, "Investigations into the use of an LLC converter for rep-rate capacitor charging systems," in *Plasma Science (ICOPS), 2013 Abstracts IEEE International Conference on*, 2013, pp. 1-1.
- [61] H. J. Ryoo, S. R. Jang, Y. S. Jin, J. S. Kim, Y. B. Kim, S. H. Ahn, *et al.*, "Design of high voltage capacitor charger with improved efficiency, power density and reliability," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 1076-1084, 2013.
- [62] S. Maestri, R. Garcia Retegui, G. Uicich, M. Benedetti, and J. M. Cravero, "Comparison of topologies suitable for capacitor charging systems," in *Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on*, 2013, pp. 1-9.

- [63] A. Medina-Garcia, M. Schlenk, D. Morales, and N. Rodriguez, "Resonant Hybrid Flyback, a New Topology for High Density Power Adaptors," *Electronics*, vol. 7, p. 363, 2018.
- [64] A. Pokryvailo, C. Carp, and C. Scapellati, "High-Power High-Performance Low-Cost Capacitor Charger Concept and Implementation," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 38, pp. 2734-2745, 2010.
- [65] C. Ying-Chun, K. Yu-Lung, C. Hung-Shiang, and C. Yu-Min, "Analysis and Implementation of Half-Bridge Series-Parallel Resonant Converter for Battery Chargers," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 47, pp. 258-270, 2011.
- [66] M. Wolf and A. Pokryvailo, "High Voltage Resonant Modular Capacitor Charger Systems With Energy Dosage," in *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, 2005, pp. 1029-1032.
- [67] V. Brommer, O. Liebfried, and S. Scharnholz, "A High-Power Capacitor Charger Using IGCTs in a Boost Converter Topology," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 2600-2604, 2013.
- [68] M. Rahimo, "La conmutación se renueva: Avances recientes de las tecnologías de IGCT para la electrónica de alta potencia," *Revista ABB*, pp. 67-71, 2016.
- [69] M. Rezal, N. Mariun, and I. Aris, "Simple boost converter using Timer IC 555 for charging capacitor banks," in *Research and Development (SCORED), 2010 IEEE Student Conference on*, 2010, pp. 272-274.
- [70] F. De Stasi, "Working with Boost Converters," *National Semiconductor*, pp. 1-11, 2015.
- [71] P. C. Antoneli and P. X. de Oliveira, "Development and Testing of a High Intensity Electrical Stimulator for Isolated Rat Heart Defibrillation," in *XXVI Brazilian Congress on Biomedical Engineering*, 2019, pp. 431-437.
- [72] N. O. Sokal and R. Redl, "Control algorithms and circuit designs for optimal flyback-charging of an energy-storage capacitor (e.g., for flash lamp or defibrillator)," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, pp. 885-894, 1997.
- [73] J. Elmes, C. Jourdan, O. Abdel-Rahman, and I. Batarseh, "High-Voltage, High-Power-Density DC-DC Converter for Capacitor Charging Applications," in *2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2009, pp. 433-439.
- [74] D. Baba, "Isolated Supply Overview and Design Trade-Offs," *National Semiconductor Power Designer# 124*, 2009.
- [75] G. Boccock, *The Essential Guide to Power Supplies*: Primedia E-launch LLC, 2014.
- [76] H. Bluhm, *Pulsed power systems: principles and applications* vol. 1. DE: Springer Verlag, 2006.
- [77] B. Hansen. (2010). *FEMM - Hollow Cylinder Projectile*. Available: http://www.coilgun.info/femm/femm_hollow_cylinder.htm
- [78] Y. Xinjie and C. Xiangxiang, "Comparisons of Three Inductive Pulse Power Supplies," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 1340-1345, 2013.
- [79] Y. Xinjie, M. Shangang, and L. Zhen, "System Implementation and Testing of the STRETCH Meat Grinder With ICCOS," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 1474-1479, 2015.

- [80] A. Sitzman, D. Surls, and J. Mallick, "Design, Construction, and Testing of an Inductive Pulsed-Power Supply for a Small Railgun," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 43, pp. 270-274, 2007.
- [81] X. Yu and X. Chu, "STRETCH Meat Grinder With ICCOS," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 41, pp. 1346-1351, 2013.
- [82] P. Dedie, V. Brommer, A. Badel, and P. Tixador, "Three-stage superconducting XRAM generator," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 18, pp. 1189-1193, 2011.
- [83] A. Sitzman, D. Surls, and J. Mallick, "Stretch Meat Grinder: A Novel Circuit Topology for Reducing Opening Switch Voltage Stress," in *Pulsed Power Conference, 2005 IEEE*, 2005, pp. 493-496.
- [84] P. Dedie, V. Brommer, and S. Scharnholz, "Twenty-Stage Toroidal XRAM Generator Switched by Countercurrent Thyristors," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 263-267, 2011.
- [85] R. D. Ford, R. D. Hudson, and R. T. Klug, "Novel hybrid XRAM current multiplier," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 29, pp. 949-953, 1993.
- [86] H. Mengbing and P. Senior, "Pulsed power expansion and compression using mutual coupling," in *Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC), 2011 2nd International Conference on*, 2011, pp. 6711-6714.
- [87] O. Zucker, J. Wyatt, and K. Lindner, "The meat grinder: Theoretical and practical limitations," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 391-394, 1984.
- [88] K. Lindner, J. Long, D. Girogi, T. Navapanich, and O. Zucker, "A Meatgrinder circuit for energizing resistive and varying inductive loads (EM guns)," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 22, pp. 1591-1596, 1986.
- [89] A. Sitzman, D. Surls, and J. Mallick, "Stretch Meat Grinder: A Novel Circuit Topology for Reducing Opening Switch Voltage Stress," in *2005 IEEE Pulsed Power Conference*, 2005, pp. 493-496.
- [90] H. Yong, G. Guishan, S. Shengyi, G. Yongchao, L. Yexun, Q. Xu, *et al.*, "Validation of a coilgun design code," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, 2012, pp. 1-4.
- [91] Z. Tao, G. Wei, Z. Honghai, C. Bin, H. Kai, and R. Ren, "Design and testing of a 15-stage synchronous induction coilgun," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, 2012, pp. 1-4.
- [92] B. Zou, Y. Cao, J. Wu, H. Wang, and X. Chen, "Magnetic-Structural Coupling Analysis of Armature in Induction Coilgun," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 39, pp. 65-70, 2011.
- [93] A. Waindok and G. Mazur, "Mutual inductances in a mathematical model of the three-stage reluctance accelerator," in *Electrodynamics and Mechatronics (SCE III), 2011 3rd International Students Conference on*, 2011, pp. 115-118.
- [94] K. Seog-Whan, J. Hyun-Kyo, and H. Song-yop, "An optimal design of capacitor-driven coilgun," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 207-211, 1994.
- [95] P. P. Mongeau, "Inductively commutated coilguns," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 27, pp. 568-572, 1991.

- [96] Y. Orbach, M. Oren, A. Golan, and M. Einat, "Reluctance Launcher Coil-Gun Simulations and Experiment," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, pp. 1358-1363, 2019.
- [97] A. Molnar, "The Demonstration Model of an Electromagnetic Accelerator Gun," *Acta Universitatis Sapientiae, Electrical and Mechanical Engineering*, vol. 10, pp. 77-89, 2018.
- [98] B. Zhu, J. Lu, J. Wang, and S. Xiong, "A Compulsator Driven Reluctance Coilgun-Type Electromagnetic Launcher," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, pp. 2511-2518, 2017.
- [99] Z. Keyi, X. Hongjun, L. Zhiyuan, L. Bin, Z. Qian, S. Liwei, *et al.*, "Optimum design of driving circuit parameters for magnetic-resistance coil launcher," in *2014 17th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology*, 2014, pp. 1-5.
- [100] M. Rezal, S. J. Iqbal, and K. W. Hon, "Better performance pulsed launcher system by adjusting projectile initial position," in *Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International*, 2008, pp. 1060-1063.
- [101] G. Shun-Shou, S. Cheng-Wei, Z. Ying-Min, C. Jian-Jun, and W. De-Man, "The test and analysis of a 3-stage reconnection coilgun," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 35, pp. 142-147, 1999.
- [102] Z. Tao, G. Wei, D. Zhiqiang, C. Yanhui, L. Mingtao, and S. Xiaochao, "Experimental results from a 4-stage synchronous induction coilgun," in *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on*, 2012, pp. 1-5.
- [103] J. Nett and L. Gernandt, "Inductive acceleration of moving projectiles and synchronization between the driving field and the projectile motion," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 31, pp. 499-503, 1995.
- [104] B. Daniels, "Design and Construction of a Pulsed Linear Induction Motor," Department of Mechanical Engineering, University of Cape Town, Cape Town, 2007.
- [105] J. Kim and J. Ahn, "Modeling and optimization of a reluctance accelerator using DOE-based response surface methodology," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 31, pp. 1321-1330, 2017.
- [106] F. Daldaban and V. Sari, "The optimization of a projectile from a three-coil reluctance launcher," *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 24, pp. 2771-2788, 2016.
- [107] A. Mosallanejad, "Analyses of the effect of length difference between plunger and winding on tubular linear reluctance motor performance," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, vol. 25, pp. 2948-2960, 2015/11/01 2015.
- [108] M. J. Harris, M. Shaikh, B. Bristoll, K. Vine, and P. A. Bartlett, "The Efficiency of a Two-Stage Reluctance Accelerator Through Pulse Shaping," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 121-127, 2017.
- [109] B. J. Baliga, *Fundamentals of Power Semiconductor Devices* vol. 1. Aufl. Boston, MA: Springer-Verlag, 2008.
- [110] H. Bai and C. Mi, *Transients of Modern Power Electronics*, 2011.
- [111] J. Sung-Roc, R. Hong-Je, G. Goussev, and R. Geun Hie, "Comparative Study of MOSFET and IGBT for High Repetitive Pulsed Power Modulators," *Plasma Science, IEEE Transactions on*, vol. 40, pp. 2561-2568, 2012.

- [112] S. Scharnholz, R. Schneider, E. Spahn, A. Welleman, and S. Gekenidis, "Investigation of IGBT-devices for pulsed power applications," in *Pulsed Power Conference, 2003. Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International*, 2003, pp. 349-352 Vol.1.
- [113] D. Giorgi, H. Helava, K. Lindner, J. Long, and O. Zucker, "The ringer: an efficient, high repetition rate circuit for electromagnetic launchers," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 25, pp. 203-206, 1989.
- [114] K. Umetani, "A generalized method for Lagrangian modeling of power conversion circuit with integrated magnetic components," *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 7, pp. S146-S152, 2012.
- [115] L. Chem, "PRODUCT SPECIFICATION Rechargeable Lithium Ion Battery Model : ICR18650HA1 1300mAh," 2010.
- [116] D. Choi, C. Randall, E. Furman, B. Ma, U. B. Balachandran, S. Zhang, *et al.*, "Energy and power densities of capacitors and dielectrics," in *2015 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP)*, 2015, pp. 52-55.
- [117] F. W. MacDougall, J. B. Ennis, R. A. Cooper, J. Bates, and K. Seal, "High energy density pulsed power capacitors," in *Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International Pulsed Power Conference (IEEE Cat. No.03CH37472)*, 2003, pp. 513-517 Vol.1.
- [118] M. Bramoulle, "Electrolytic or film capacitors?," in *Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (Cat. No. 98CH36242)*, 1998, pp. 1138-1141.
- [119] C. Dubilier. *Aluminum Electrolytic Capacitor Application Guide*. Available: <http://www.cde.com/resources/catalogs/AEappGUIDE.pdf>
- [120] G. A. M., *The Electrolytic Capacitor*. New York: Murray Hill Books, Inc., 1945.
- [121] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of power electronics*: Springer Science & Business Media, 2007.
- [122] R. Patel and G. Fritz, "Switching power supply design review 60 watt flyback regulator," *Unitrode Corporation. Disponível em:* < [http://www. unitrode. com/](http://www.unitrode.com/) > *acesso em*, vol. 5, 2009.
- [123] Rohm. (2016). *Isolated Flyback Converter Basics: What are Discontinuous Mode and Continuous Mode?* Available: https://micro.rohm.com/en/techweb/knowledge/acdc/acdc_pwm/acdc_pwm_01/1152
- [124] N. G. Negrete, "Design and Control of Photolash Capacitor Charging Circuits," *Masters of Engineering in Electrical Engineering and Computer Science*, Department of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [125] J. Holzgrafe, N. Lintz, N. Eyre, and J. Patterson, "Effect of Projectile Design on Coil Gun Performance," 2012.
- [126] B. Hansen. (2001, May 30). *Mark II Results - Firing tube*. Available: <https://coilgun.info/mark2/resultfiringtube.htm>
- [127] I. A. Metwally, "Coaxial-Cable Wound Rogowski Coils for Measuring Large-Magnitude Short-Duration Current Pulses," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 62, pp. 119-128, 2013.

-
- [128] M. Rohani, C. Yii, M. Isa, S. Hassan, A. Mukhtaruddin, N. Yusof, *et al.*, "Effect of unshielded and shielded Rogowski coil sensor performance for partial discharge measurement," in *Research and Development (SCORED), 2015 IEEE Student Conference on*, 2015, pp. 21-25.
- [129] E. Abdi-Jalebi and R. McMahon, "High-Performance Low-Cost Rogowski Transducers and Accompanying Circuitry," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, pp. 753-759, 2007.
- [130] M. M. Vaneghi, A. A. Khatibzadeh, G. A. Khanbeigi, and M. R. Besmi, "Design and switching position optimization of multi-stage coilgun," in *Business, Engineering and Industrial Applications (ICBEIA), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 130-134.
- [131] B. Hansen. (2001, 28/05/2014). *Inductor Simulator*. Available: <http://coilgun.info/mark2/inductorsim.htm>