

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

Proyecto de Titulación

Modelo de carga no lineal para Generador de Plasma

Proyecto para optar al título de
Ingeniero de Ejecución Electrónico

Alumno
Angelo Sarrocchi R.

Profesor Guía
Dr. Marcelo Pérez L.

Comisión evaluadora
Dr. Christian Rojas M., Correferente, UTFSM

Octubre 2025, Valparaíso, Chile



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Modelo de carga no lineal para Generador de Plasma

Nombre del candidato(a): Angelo Francesco Sarrocchi Ríos

Carrera / Grado: Ingeniero de Ejecución Electrónico

Campus: _Casa Central **Departamento:** _Electrónica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Marcelo Pérez Leiva, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente

DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 03-11-2025 **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 03-11-2025 **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

Modelo de carga no lineal para Generador de Plasma

Angelo Sarrocchi R.

Proyecto para optar al título de
Ingeniero de Ejecución Electrónico, Mención en Electrónica Industrial

Profesor Guía: Dr. Marcelo Pérez L.

Octubre 2025

En la modernidad, el plasma se usa para generar luz, soldaduras de arco, generación de descargas eléctricas de uso industrial y hasta para la elaboración de chips de computadores o paneles solares, entre otras cosas. Inclusive se espera que se pueda usar para propulsar cohetes espaciales y para facilitar la fusión termonuclear controlada, estos últimos presentan problemas aún no solucionados que han impulsado los estudios en estas áreas de conocimiento. Es por esto que la modelación de una carga no lineal que represente la relación entre las variables eléctricas presentes en la generación de plasma se vuelve útil para poder estudiar y simular distintos sistemas que lo utilicen.

En el presente proyecto se modelan dos cargas no lineales mediante el uso de tablas y de funciones, las cuáles replican la relación existente entre la corriente de descarga y el voltaje de salida del sistema, comportándose como lo haría un generador de plasma. Estas cargas son modeladas en el entorno de simulación de PLECS, utilizando MatLab para el análisis matemático requerido. Las cargas son conectadas a un generador de pulsos de voltaje DC y una inductancia, ambos de parámetros variables con el motivo de analizar la sensibilidad de las cargas frente a los cambios de dichos parámetros. Para ambos modelos, la corriente en el inductor es aquella medida y entregada al bloque de la carga, controlando así su voltaje de salida. Finalmente el proyecto busca comparar ambos modelos con el motivo de recomendar cuál de los dos utilizar para futuras investigaciones que requieran una carga no lineal modelada en base a un Generador de Plasma.

Al realizar la comparación de los modelos se concluye que la carga a recomendar es aquella modelada mediante tablas debido a su similitud con la curva de referencia y a su facilidad de implementación y ajuste.

Palabras clave: Generador de Plasma, modelación, carga no lineal.

Abstract

Non-Linear Load Model for Plasma Generation

Angelo Sarrocchi R.

Final Project Report towards the fulfillment of the degree:
Ingeniero de Ejecución Electrónico, Mención en Electrónica Industrial

Advisor: Dr. Marcelo Pérez L.

October 2025

In modern days, plasma is used to generate light, arc welding, the generation of electrical discharges for industrial use, and even for the elaboration of computer chips or solar panels, among other things. It is even expected to be used to propel space rockets and to facilitate controlled thermonuclear fusion, these latter applications still present unsolved problems that have driven studies in these areas of knowledge. This is why the modeling of a non-linear load that represents the relationship between the electrical variables present in the generation of plasma becomes useful for studying and simulating different systems that utilize it.

In the present project, two non-linear loads are modeled using tables and functions, which replicate the existing relationship between the discharge current and the output voltage of the system, behaving as a plasma generator would. These loads are modeled in the PLECS simulation environment, using MatLab for the required mathematical analysis. The loads are connected to a DC voltage pulse generator and an inductance, both with variable parameters, with the aim of analyzing the sensitivity of the loads to changes in said parameters. For both models, the current in the inductor is the one measured and delivered to the load block, thus controlling its output voltage. Finally, the project seeks to compare both models with the purpose of recommending which of the two to use for future research that requires a non-linear load modeled based on a Plasma Generator.

Upon comparing, it is concluded that the load to recommend is the one modeled using tables due to its similarity to the reference curve and its ease of implementation and adjustment.

Keywords: Plasma Generator, modeling, non-linear load.

Índice general

Resumen	i
Abstract	ii
1. Introducción	1
1.1. Contexto de la Generación de Plasma	1
1.1.1. Principios Básicos	2
1.1.2. Generación de Plasma	2
1.1.3. Característica No Lineal y Zonas de Descarga	3
1.2. Objetivos de la Tesis y Contenido del Proyecto	4
1.2.1. Objetivos del Proyecto	4
1.2.2. Motivación y Dificultades del Proyecto	4
1.2.3. Trabajo a Desarrollar	4
1.2.4. Evaluaciones a Realizar	4
1.2.5. Resultados Esperados	5
1.3. Estado del Arte	6
1.3.1. Tópicos a Tratar	6
1.3.2. Trabajos Relacionados con los Temas a Tratar	6
1.3.3. Resumen	7
1.4. Alternativas de Solución	8
1.4.1. Tipo de Generación de Plasma a Usar	8
1.4.2. Software de Simulación a Utilizar	9
1.5. Alternativas Seleccionadas	12
1.5.1. Criterios de Selección	12
1.5.2. Evaluación de Alternativas	13
1.5.3. Resumen	14
2. Modelación de carga no lineal utilizando Tablas	16
2.1. Generación de Curva I/V por Tablas	16
2.1.1. Definición de Parámetros	16
2.1.2. Análisis de Funcionamiento por Etapas.	18
2.1.3. Gráfico XY de Voltaje vs Corriente	20
2.2. Análisis de Sensibilidad	21
2.2.1. Efecto del Cambio de Ciclo de Trabajo del Pulso	21
2.2.2. Efectos de Cambios en la Inductancia de Salida	22
2.2.3. Análisis Paramétrico de Sensibilidad	23
2.3. Resumen de Resultados	25

3. Modelación de carga no lineal utilizando Funciones	26
3.1. Generación de Curva I/V por Funciones	26
3.1.1. Definición de Función	26
3.1.2. Análisis de Funcionamiento	28
3.1.3. Gráfico XY de Voltaje vs Corriente	31
3.2. Análisis de Sensibilidad	32
3.2.1. Efecto del Cambio de Ciclo de Trabajo del Pulso	32
3.2.2. Efectos del Cambio en la Inductancia de Salida	34
3.2.3. Análisis Paramétrico de Sensibilidad	35
3.3. Resumen de Resultados	36
4. Discusión y Conclusiones	38
4.1. Comparación de Modelos	38
4.1.1. Comparación de Curvas Voltaje-Corriente	38
4.2. Comparación de la Sensibilidad de la Carga	39
4.2.1. Comparación de Análisis Matemático	40
4.3. Conclusiones	41
A. Código Suplementario	43
A.1. Código Suplementario para Modelación de carga no lineal Utilizando Tablas	43
A.1.1. Código de Generación de Tabla y Extracción de Vectores	43
A.2. Código Suplementario para Modelación de carga no lineal Utilizando Funciones	44
A.2.1. Código de Generación de Función	44
A.2.2. PLECS C-Script Code Declarations	45
A.2.3. PLECS C-Script Output Function Code	45
B. Tablas e Imágenes Suplementarias	47
B.1. Ejemplo de Aplicaciones de Plasma	47
B.2. Ejemplo de configuraciones para modelar en Matlab/Simulink	47
B.3. Ejemplo de configuraciones para modelar en PLECS	49
Bibliografía	51

Índice de figuras

1.1. Generador de Plasma	1
1.2. Corriente de Descarga vs Voltaje.	3
2.1. Topología de Sistema de Generación de Plasma por Tabla	17
2.2. Gráfico Semilogarítmico Matlab de Corriente de Descarga vs Voltaje.	17
2.3. Voltaje de entrada, corriente de entrada y voltaje de salida vs tiempo.	18
2.4. Etapa 1.	19
2.5. Etapa 2.	19
2.6. Etapa 3.	20
2.7. Gráfico de la Simulación de Voltaje vs Corriente	21
2.8. Gráfico de la Relación de Voltaje vs Corriente	21
2.9. Resultados para 1mH y distintos Anchos de Pulsos	22
2.10. Ciclo de trabajo de 100us y distintas Inductancias	22
2.11. Ciclo de trabajo de 500us y distintas Inductancias	23
2.12. Ciclo de trabajo de 1000us y distintas Inductancias	23
2.13. Análisis Paramétrico de Sensibilidad	24
2.14. Corriente de Descarga según Ciclo de Trabajo	24
3.1. Curva generada por la función V(I)	28
3.2. Topología de Sistema de Generación de Plasma por Función V(I)	28
3.3. Voltaje de entrada, corriente de entrada y voltaje de salida vs tiempo.	29
3.4. Etapa 1.	30
3.5. Etapa 2.	30
3.6. Etapa 3.	31
3.7. Gráfico de la Simulación de Voltaje vs Corriente	31
3.8. Gráfico de la Relación de Voltaje vs Corriente	32
3.9. Resultados para 1mH y distintos Anchos de Pulsos	32
3.10. Ciclo de trabajo de 100us y distintas Inductancias	34
3.11. Ciclo de trabajo de 500us y distintas Inductancias	34
3.12. Ciclo de trabajo de 1000us y distintas Inductancias	34
3.13. Análisis Paramétrico de Sensibilidad	35
4.1. Comparación Curvas Voltaje-Corriente	39
4.2. Comparación de sensibilidad de la carga	39
4.3.	41
B.1. Tubos Nixie	47
B.2. Configuración de Lookup Table en Simulink	47
B.3. Bloques de Funciones en Simulink	48

B.4. Componentes de Electrónica de Potencia Especializados de Simulink.	48
B.5. Bloques de Tablas en PLECS	49
B.6. Bloques de Funciones en PLECS	49
B.7. Componentes Eléctricas en PLECS	50
B.8. Componentes Pasivas en PLECS	50

Índice de tablas

4.1. Errores de corriente máxima y tiempo de descarga para cada inductancia según el ancho de pulso de entrada.	40
---	----

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto de la Generación de Plasma

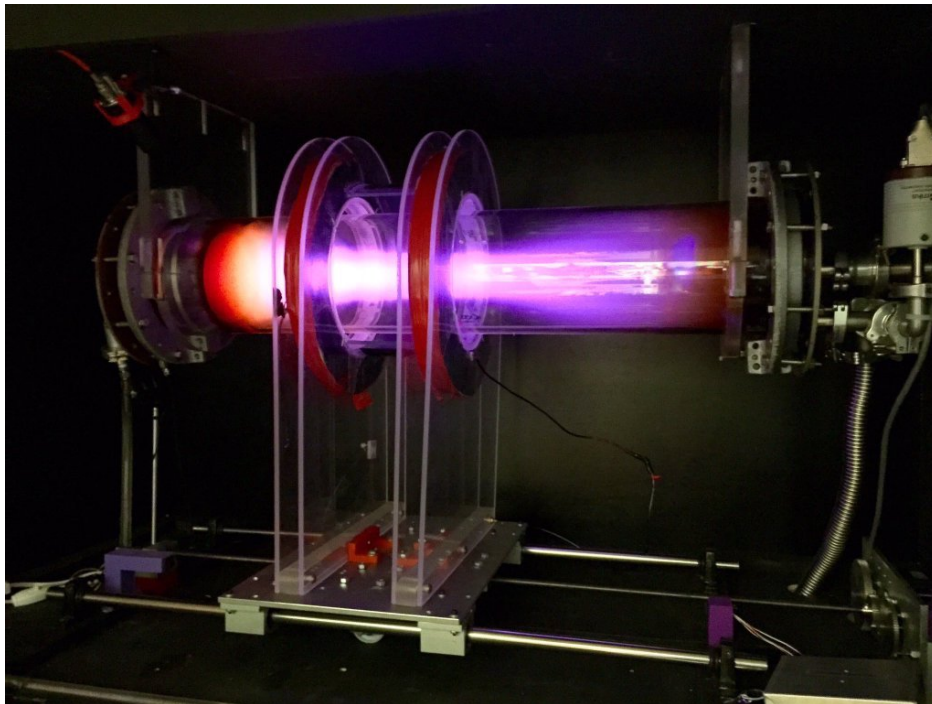


Figura 1.1: Generador de Plasma

En la física, la palabra plasma fue por primera vez usada a finales de los años veinte por Irving Langmuir para describir parte de el fenómeno que ocurre al tratar de generar descargas eléctricas en gases, mientras investigaban formas de desarrollar tubos de vacío que pudieran conducir grandes cantidades de corriente, lo que él describía como plasma era una forma de gas ionizado. Esta descripción no es suficiente y fue posteriormente identificado como el cuarto estado de la materia [1], se define como:

“Plasma será un gas quasineutro de partículas cargadas y neutras las cuáles exhiben un comportamiento colectivo.”

En otras palabras el plasma es el estado de la materia en el que una sustancia ionizada, generalmente un gas, se vuelve altamente conductiva, hasta el punto en el que el movimiento de sus partículas cargadas genera corrientes y por lo tanto campos magnéticos que afectan el comportamiento de otras partículas, por lo que estos campos dominan el comportamiento del plasma.

Cuando se piensa en ejemplos para este estado de la materia, se tiende a pensar en los rayos ocurrientes en tormentas eléctricas o en nuestro Sol y las estrellas visibles, puesto que estas están compuestas por plasma, pero la verdad es que nuestra sociedad está construida en parte gracias a los avances realizados en la generación y estudio de plasma. El plasma se usa para generar luz, soldaduras de arco, generación de descargas eléctricas de uso industrial y hasta para la elaboración de chips de computador o paneles solares mediante el uso de láseres generados por plasmas, entre otras cosas. Inclusive se espera que se pueda usar para propulsar cohetes espaciales y para la fusión termonuclear controlada, estos últimos presentan problemas aún no solucionados que han impulsado los estudios en estas áreas de conocimiento.

1.1.1. Principios Básicos

Cuando energías externas son aplicadas a un gas natural, esta ioniza sus átomos produciendo pares de ión-electrón. Esto se calificará como plasma si cumple las siguientes condiciones:

1. Si $\lambda_D \ll L$, con L el largo del plasma y λ_D llamado Largo Debye.
2. Si $\frac{n^4 \pi \lambda_D^3}{3} \gg 1$, para plasma $n = n_i = n_e$, donde n es la densidad del plasma, n_i la de iones y n_e la de electrones.
3. Si $\omega \tau > 1$, donde ω es la frecuencia del plasma y τ es el tiempo medio entre colisiones.

La energía térmica, campo magnético, rayo de electrones o láser de electrones se pueden usar como fuentes externas de energía con el motivo de la generación de plasma.

1.1.2. Generación de Plasma

Cuando un campo eléctrico es aplicado a un gas noble los portadores de carga libres producidos como resultado de la ionización, se aceleran y pueden colisionar con átomos y moléculas del gas, produciendo una ruptura eléctrica del gas, el cuál pasará a ser plasma, dependiendo de sus características y de si cumple las condiciones previamente mencionadas.

Generalmente esto se logra mediante el uso de cámaras de gas, a diferentes presiones, las cuáles están conectadas mediante un ánodo y un cátodo a un circuito hecho para proporcionar la descarga de corriente necesaria para la ruptura. Estos circuitos se diferencian en el tipo de fuente utilizada, sea corriente continua, corriente alterna a baja frecuencia o radiofrecuencia.

Cuando un electrón primario es liberado desde el cátodo de la cámara de gas y acelerado en el campo eléctrico, puede llegar a ionizar los átomos del gas luego de un llamado "recorrido medio libre" para la ionización, λ_i . En este proceso se crea un par ión electrón, este par puede por su parte acelerar 2 electrones, quienes posteriormente podrán acelerar 4 y así sucesivamente, creando una "avalancha" de electrones.

Los iones son acelerados hacia el cátodo donde tienen la oportunidad de liberar un nuevo electrón, que reemplace al primario y genere la siguiente avalancha. La ruptura ocurrirá cuando el proceso de avalancha se pueda mantener por si mismo, en ese momento el plasma es generado y se encuentra inicialmente en la zona de descarga Townsend que será explicada posteriormente.

1.1.3. Característica No Lineal y Zonas de Descarga

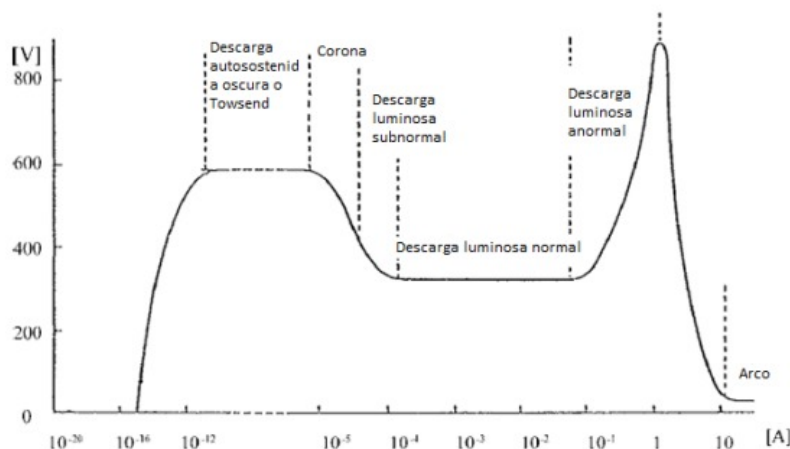


Figura 1.2: Corriente de Descarga vs Voltaje.

En la Figura 1.2, obtenida del artículo [2], se puede observar la relación no lineal que ocurre entre la corriente proporcionada a la cámara de gas y el voltaje generado por la reacción del plasma generado. Como se explicó anteriormente el plasma inicialmente se encontrará en la zona de descarga Townsend, pero es posible mediante el control de la generación trabajar en distintas zonas:

Zona de descarga Townsend: También conocida como descarga autosostenida u oscura, es la zona en la que la ruptura eléctrica del gas se vuelve auto sostenida. En esta zona no se observan características lumínicas en la cámara y se perciben voltajes en la carga cercanos a los 600[V], los cuáles son independientes de la corriente de descarga, la cuál puede llegar a 1[μ A].

Zona de descarga luminosa subnormal: Esta zona se alcanza con corrientes de descarga correspondientes superiores a 1[μ A] hasta los 0.1[mA]. En esta zona el voltaje en la carga comienza a descender y se genera un brillo subnormal el cual cubre sólo parcialmente la superficie del cátodo.

Zona de descarga luminosa normal: Esta zona se alcanza cuándo la corriente de descarga en el cátodo es superior a los 0.1[mA] hasta valores cercanos a 0.1[A], en esta zona el voltaje en la carga se estabiliza cercano a los 400[V] y el cátodo se cubre por completo la superficie del cátodo, llamado brillo normal, este tipo de brillo se divide en distintas regiones o "resplandores" usados para distintas aplicaciones lumínicas como lamparas de neón, tubos Nixie (Figura B.1), lámparas fluorescentes o en espectrometría de masas para química analítica, entre otras cosas.

Zona de descarga luminosa anormal: Corresponde a la zona que se alcanza cuándo se presentan corrientes de descarga por sobre los 0.1[A] hasta valores cercanos a 1[A], en esta zona el voltaje en la carga aumenta hasta llegar a valores cercanos a 800[V] generando brillos anormales en el cátodo debido a el aumento de iones en el plasma, este brillo se caracteriza por un aumento en intensidad.

Zona de descarga de Arco: Al aumentar la corriente de descarga en el cátodo por sobre 1[A]

se experimenta la zona de arco, en esta zona el brillo anómalo se vuelve inestable, el canal de descarga se contrae a una pequeña parte de la superficie negativa del electrodo y se nota un diferencial de resistencia negativo en el que el voltaje disminuye a medida que la corriente de descarga aumenta.

1.2. Objetivos de la Tesis y Contenido del Proyecto

1.2.1. Objetivos del Proyecto

El proyecto "Modelo de carga no lineal para Generador de Plasma" tiene como objetivo modelar matemáticamente e implementar, mediante software de simulación, una carga no lineal que represente el comportamiento de un generador de plasma replicando la curva de relación no lineal que presentan la corriente de descarga y el voltaje de salida del sistema. Para ello, se desarrollarán modelos definidos por tablas y funciones matemáticas, que simulen adecuadamente el comportamiento de un generador de plasma descrito por la Figura 1.2.

1.2.2. Motivación y Dificultades del Proyecto

La dificultad del modelo de carga no lineal a realizar recae en la representación de la relación existente entre el voltaje de salida y su dependencia de la corriente aplicada al sistema. En esta relación 2 voltajes iguales pueden ser la salida correspondiente para distintas corrientes, como lo es por ejemplo 500[V] para las corrientes de aproximadamente $1 \cdot 10^{-12}$ [A], $2 \cdot 10^{-5}$ [A], $4 \cdot 10^{-1}$ [A] y 2[A]. Por lo que no se puede modelar en base a el voltaje de entrada aplicado, sino que se debe usar la corriente de forma tal que se entregue el voltaje adecuado en base a la corriente que se está recibiendo.

1.2.3. Trabajo a Desarrollar

El proyecto comenzará con el estudio del fenómeno de generación de plasma, su funcionamiento físico-teórico, y las distintas configuraciones posibles según el tipo de fuente de poder, la cámara y las conexiones de electrodos.

Una vez comprendido el fenómeno, se procederá a simular el funcionamiento de un generador de plasma controlado por corriente. Esta simulación se abordará mediante dos enfoques principales:

1. Mediante tablas: Se generará una tabla que modele el voltaje de descarga característico del plasma en función de la corriente entregada. Posteriormente, se simulará el comportamiento del generador controlando el voltaje de salida del circuito según la corriente recibida por la carga, utilizando los valores de la tabla correspondiente.

2. Mediante funciones: Se analizará el gráfico semilogarítmico de voltaje de descarga versus corriente recibida, el cuál previamente se usa para generar la tabla, con el fin de obtener un modelo basado en funciones matemáticas que repliquen dicha relación. Este modelo permitirá regular el voltaje de salida en la simulación al evaluar la corriente recibida por el plasma.

1.2.4. Evaluaciones a Realizar

Las evaluaciones se enfocarán principalmente en verificar que el voltaje generado por la simulación se ajuste a la corriente entregada al circuito. Se analizarán las formas de onda del voltaje de entrada, la corriente de entrada y el voltaje de salida en el dominio del tiempo, así como

la relación V/I entre corriente de entrada y voltaje de salida y que esta sea acorde a la esperada teóricamente. Asimismo, se evaluarán los modelos propuestos bajo distintas variaciones de la fuente de poder, frecuencias y ciclos de trabajo.

1.2.5. Resultados Esperados

Al finalizar el proyecto "Modelo de carga no lineal para Generador de Plasma", se espera contar con dos modelos funcionales. Estos modelos deben ser capaces de replicar el comportamiento del plasma en sus distintas zonas de descarga, en particular en la zona de arco. Se espera que cada uno permita un estudio detallado del fenómeno en medios de simulación, y que sean capaces de reproducir con precisión la relación corriente-voltaje descrita en la literatura especializada. Cada modelo será finalmente evaluado en base a su fidelidad con la relación original, para así seleccionar el que mejor permita que se use la carga desarrollada, para implementar y desarrollar en entornos de simulación, con circuitos que usen generación de plasma.

1.3. Estado del Arte

1.3.1. Tópicos a Tratar

Para la realización del presente proyecto, los temas principales a tratar son:

- La generación de plasma, su funcionamiento y requerimientos.
- El modelamiento de cargas no lineales, su identificación y representación matemática del comportamiento dinámico de cargas que no presentan una relación lineal entre voltaje y corriente.
- Simulación en ambientes como MATLAB/Simulink o PLECS, implementación y análisis del modelo.

La modelación de cargas no lineales es un campo ampliamente estudiado en sistemas de electrónica de potencia, donde se utilizan modelos empíricos, modelos basados en circuitos equivalentes y modelos matemáticos. Aplicando esto a la literatura existente sobre generación de plasma, se identifica un comportamiento de carga no lineal, debido a factores tales como la presión del gas, la geometría de la cámara de generación y los diversos tipos de alimentación, pero por sobre todo debido a la interacción entre la corriente aplicada y el voltaje generado en la reacción.

Es por lo anterior que se vuelve útil para el estudio, desarrollo y aplicación de estos sistemas el desarrollo de un modelo aplicable a entornos de simulación tales como aquellos ofrecidos por los software PLECS ó Simulink.

La evaluación de modelos consistirá en encontrar ecuaciones que rijan el comportamiento de cada etapa de la generación de plasma siendo capaz de funcionar en las diversas zonas existentes durante su generación, relacionando las variables de interés de modo tal que puedan ser representadas en un esquema de simulación.

1.3.2. Trabajos Relacionados con los Temas a Tratar

Cargas No Lineales

Para el modelamiento de cargas no lineales, existen diversos trabajos que analizan diversos modelos matemáticos para cargas no lineales como es el caso de "Nonlinear Load Modeling and Harmonic Analysis for Power Systems" [3], el cuál si bien no es directamente aplicable al proyecto sirve para el estudio de la modelación de estos tipos de cargas y el proceso a seguir en su propuesta y evaluación.

Generación de Plasma

Al buscar temas relacionados con la generación de plasma, se debe iniciar por la teoría, donde se encuentran diversos libros que explican el fenómeno en detalle, entre estos se debe destacar "Plasma Physics, an Introduction to Laboratory, Space, and Fusion Plasmas" [4], en el cual A. Piel introduce todos los conceptos relacionados al Plasma en conjunto con un poco de historia sobre sus inicios y un enfoque práctico en las aplicaciones y uso en laboratorio. El segundo libro a destacar corresponde a "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion" [1] en el cual, al igual que el libro anterior, se presenta de forma clara el origen de la generación de plasma, algunos métodos de generación, pero este ofrece un enfoque mucho más específico sobre sus aplicaciones y usos en física nuclear.

Por otro lado existen estudios que analizan a fondo las diversas zonas de descarga, como es el caso de la Tesis “Análisis espectroscópico y caracterización de un plasma de resplandor” [5], el cuál trabaja en específico con la zona lumínica del plasma, llegando inclusive a crear un modelo físico para el estudio de esta. La anterior tesis entrega información detallada sobre las geometrías presentes en la zona lumínica, zona que fue extremadamente importante para las primeras investigaciones del fenómeno debido a sus aplicaciones como fuentes de luz económicas con grandes gamas de colores.

Posteriormente se busca comprender los distintos métodos de generación de plasma, para lo cuál se presenta “Methods of High-Density Plasma Generation” [6], en el que se describen dichos métodos, sus topologías básicas, ventajas y desventajas y en esencia propuestas específicas para su generación en laboratorio.

Si se busca continuar con el estudio de modelos físicos, es posible encontrar diversas aplicaciones, se destaca “A Low-Cost Cold Plasma Generator Circuits Designed for Laboratory Applications” [7] en el cuál se diseñan diversos circuitos con un enfoque de minimización de costos que permiten la generación de plasma frío mediante fuentes pulsadas. Así mismo se destaca “Study of a Low Power Arc Plasma Generator” [8], que presenta la construcción de un modelo físico de generación de plasma de arco y un estudio detallado sobre las variables que influyen, para luego aplicarlo al entorno Matlab, obteniendo la curva de relación entre corriente y voltaje de arco.

Finalmente se destaca “An Energy-Based Analysis of High Voltage Resonant-Based Pulsed Low Power Converter for Water Treatment Application” [9] el cuál presenta aplicaciones de generación de plasma, pero esta vez con una aplicación específica al tratamiento de agua, por lo que en vez de utilizar gases para la realización del fenómeno, se estudia el uso de agua y el efecto que la generación de plasma deja en ella. Este artículo es útil para percibir las amplias aplicaciones de el plasma en nuestra sociedad y motivar futuros estudios.

Ambientes de Simulación

Para el trabajo de análisis de cargas no lineales en ambientes de simulación se encuentra “Simulation of Nonlinear Electrical Loads” [10] que usa MATLAB/Simulink mostrando como representar en este ambiente cargas no lineales para su estudio transitorio y análisis de estabilidad, lo cuál es fácilmente traducible para otros ambientes, tales como PLECS, siendo lo importante de este artículo la aplicación de la carga en este tipo de entornos y las formas de análisis.

1.3.3. Resumen

Finalmente, con el estudio de los trabajos descritos anteriormente, se obtiene información general sobre la modelación de cargas no lineales para distintas aplicaciones así como en entornos de simulación específicos. Además, se obtiene conocimiento extenso sobre la historia del fenómeno del plasma y los procesos físicos que ocurren en él, sean las distintas zonas de descarga existentes o sus diversas geometrías lumínicas. De la misma forma se encuentran ejemplos concretos de modelos físicos y sus diversos métodos de estudio e investigación, variando desde la forma de generación y fuentes de poder usadas, hasta las presiones de los gases e incluso líquidos en sus respectivas cámaras y sus temperaturas, encontrando estudios detallados de la influencia de estas variables físicas. Todo esto con el motivo de la preparación del desarrollo de este proyecto.

1.4. Alternativas de Solución

En el presente capítulo se darán a conocer las diversas alternativas de solución consideradas para el desarrollo del Proyecto "Modelo de carga no lineal para Generador de Plasma", enfocándonos especialmente en el tipo de generación de plasma a modelar y el software de simulación a utilizar para el análisis del modelo. Todo esto considerando que la carga se modelará de dos formas: mediante tablas y mediante funciones matemáticas.

1.4.1. Tipo de Generación de Plasma a Usar

Según [6], para la generación de plasmas de laboratorio existen diversas alternativas, entre ellas se encuentra el uso de campos eléctricos y láseres. El costo y complejidad de la generación por láser escapa de los objetivos de este proyecto, por lo que nos enfocaremos en las siguientes opciones de generación mediante campo eléctrico:

- Descargas de corriente continua
- Descargas de corriente continua pulsada
- Descarga por radio frecuencia

Alternativa 1: Descarga de Corriente Continua

En esta alternativa se considera modelar el comportamiento de la cámara de gas en la que es generado el plasma al ser esta conectada a una fuente de poder DC. La topología de este modelo consiste en la fuente DC conectada en serie a una resistencia y a la cámara de gas. La resistencia permite el control de la corriente y por lo tanto el control de la zona de descarga generada por el plasma, sean estas Townsend, brillo subnormal, brillo normal, brillo anormal o arco.

Ventajas:

Esta alternativa es aquella más simple en su topología y comportamiento, por lo que sus costos son moderados y su análisis es simple, lo que se resume en menos variables que considerar para una modelación de carga no lineal.

Desventajas:

Dentro de las desventajas de esta alternativa de generación se encuentra la operación a baja potencia y control limitado, el cuál es causado por la resistencia, volviéndose esta última la limitante en potencia y al mismo tiempo la única forma de control del sistema.

Alternativa 2: Descarga de Corriente Continua Pulsada

Si bien similar a la alternativa 1, esta se diferencia en que la corriente continua usada en esta oportunidad es pulsada, lo que introduce control al mismo tiempo que complejidad, puesto que dichos pulsos deben ser generados por fuentes capaces de entregar voltajes altos con cambios de estado rápidos, debido a que se busca una carga rápida al inicio del pulso, la cuál se regula con el ancho de pulso y debe posteriormente descargarse cuando el pulso se apaga. Es por esto que esta alternativa no hace uso de resistencias en su topología.

Ventajas:

La ventaja de esta alternativa sobre la anterior es que permite operación a mayor potencia y

entrega más posibilidades de control gracias al ajuste de los anchos de pulso y valores máximos entregados por la fuente.

Desventajas:

Dentro de las desventajas de esta alternativa de generación se encuentra el aumento de variables a considerar para la modelación de la carga no lineal, ya que si bien el número de variables es limitado sigue siendo mayor a la de la alternativa 1.

Por otro lado se debe notar que esta alternativa es ligeramente más costosa de la anterior, esto debido al aumento en su complejidad y necesidades de la fuente.

Alternativa 3: Descarga de Radio Frecuencia

Para esta alternativa la fuente de poder usada debe ser AC a frecuencias de 1k[Hz] a 100M[Hz], esta fuente se debe posteriormente acoplar a un inductor o a un capacitor. Cuando se acopla usando un capacitor se tiende a obtener mayor eficiencia de ionización en el medio de la cámara debido a que el voltaje alterno de alta frecuencia hace oscilar a los electrones del medio evitando que sean absorbidos por los electrodos. Por otro lado, cuando se acopla a un inductor, este funcionando como solenoide, aplica un flujo magnético variable en el tiempo a la cámara de gas, lo que induce la generación de plasma y acelera rápidamente los electrones del medio.

Ventajas:

La radio frecuencia es la alternativa que permite operación a mayor potencia manteniendo el uso de cámaras de gas a baja presión, además de entregar diversas variables que se pueden controlar para ajustar los resultados deseados.

Desventajas:

Esta alternativa es aquella con mayor complejidad en su estructura, costos y variables a considerar. Esto debido al uso de fuentes AC de radio frecuencia, al uso de condensadores o inductores especializados para estas aplicaciones y todas las variables relacionadas al uso de estas componentes al momento de modelar.

1.4.2. Software de Simulación a Utilizar

Para el trabajo de análisis de la modelación de cargas no lineales, el uso de entornos de simulación óptimos se vuelve una herramienta central. Para este proyecto se consideran dos principales alternativas para la simulación de nuestro modelo, estas son Matlab/Simulink y PLECS.

Alternativa 1: Matlab/Simulink

MATLAB es una plataforma de cómputo técnico, y Simulink es su entorno gráfico para modelado y simulación de sistemas dinámicos. Es ampliamente usado en investigación, industria y educación para sistemas de control, procesamiento de señales y modelado de sistemas eléctricos.

Según MathWorks [11]:

“Simulink is a block diagram environment for multidomain simulation and Model-Based Design.”

Es por esto que Simulink debe ser una de las alternativas a considerar para la simulación del modelo. Además este software permite:

Modelación por tablas:

Simulink tiene una serie de bloques en su librería *Simulink / Lookup Tables* que permiten el trabajo con diversas dimensiones de tablas y diversas posibilidades de interpolación. El bloque utiliza una entrada como input, la cuál es buscada en la tabla, interpolada de ser necesario y la salida corresponderá al resultado obtenido de la tabla.

El bloque es de parámetros configurables, entre los cuales se encuentra el contenido de la tabla, representado en formato spreadsheet, como se muestra en la Figura B.2. Al hacer click en la opción *Edit table and breakpoints* de la figura a) se obtiene el editor de tabla de la figura b).

Modelación por función:

Simulink tiene una serie de bloques en su librería *Simulink / User-Defined Functions* que permiten el llamado y aplicación de funciones generadas por el usuario, similar a las tablas estos tienen un input al cuál se le aplica la función, el resultado de la operación es la señal emitida como output.

Como muestra la Figura B.3 todos estos bloques son de parámetros configurables, siendo capaces de utilizar funciones matemáticas simples como en el caso de la figura a) o de aplicar funciones descritas en el lenguaje de programación C/C++ como en la imagen b), permitiendo aplicaciones de mayor complejidad.

Ventajas:

Las ventajas de esta alternativa son las siguientes.

- Plataforma integral para simulación, análisis y diseño.
- Gran soporte y documentación extensa.
- Integración directa con scripts y funciones en MATLAB.
- Muy flexible para modelar sistemas multidominio (eléctrico, mecánico, térmico, control, etc.).

Desventajas:

Por otro lado con esta alternativa presenta:

- Curva de aprendizaje más pronunciada para modelado eléctrico especializado.
- Simulaciones pueden ser más lentas si el modelo es grande o conmutado.
- Requiere toolboxes adicionales (Simscape, Simscape Electrical) para ciertos modelos.
- Costos elevados si se requieren múltiples toolboxes.

Alternativa 2: PLECS

PLECS (Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation) es una herramienta especializada en la simulación de sistemas de potencia y electrónica de potencia. Está diseñada para modelar sistemas híbridos que combinan circuitos eléctricos con controles, mecánica y térmica, todo dentro de un mismo entorno.

Según el manual de usuario de PLECS [12]:

“PLECS is a simulation software tool for modeling and simulating complex electrical circuits with power electronics and their associated control systems.”

Ofrece tanto un entorno gráfico tipo schematic como un modo de simulación basado en bloques, en ecuaciones (implementadas como código en C) o en modelos físicos, todos estos aplicables a un mismo entorno. Permite modelado térmico y magnético, además del eléctrico. Integra herramientas para simulación en tiempo real y diseño de controladores.

Es por lo anterior que PLECS debe ser considerado para la simulación del modelo. se debe notar que PLECS permite:

Modelación por tablas:

PLECS ofrece 3 tipos de bloques para controlar señales mediante el uso de tablas, estos se encuentran en la librería *PLECS / Control / Functions & Tables* y son de uso simple, consistiendo en las Lookup Tables de 1, 2 y 3 dimensiones.

Los bloques de tablas en PLECS, al igual que en Simulink, funcionan tomando una señal de entrada, aplicando este valor a la tabla, interpolando de ser necesario para entregar el resultado correspondiente como output, en el caso de este software solo se calculan interpolaciones lineales. Además como se observa en la Figura B.5, los bloques son de parámetros configurables donde el contenido de las tablas es entregado de forma vectorial para los ejes x e y, se destaca que para tablas de mayores dimensiones a 1 el resultado se obtiene mediante operaciones matriciales dictadas por el parámetro llamado *Matrix output values* que se observa en la figura b).

Modelación por función:

Dentro de la misma librería que en la que se encuentran los bloques de Lookup Tables, PLECS ofrece bloques que permiten aplicar funciones a señales, estos pueden ser funciones simples con el bloque *Fcn* que permite el uso de expresiones matemáticas o pueden ser expresiones de mayor complejidad como con el bloque *C-Script* el cuál permite el uso de código C para definir funciones.

Como se puede ver en la Figura B.6, los bloques previamente descritos son de parámetros de simple edición, siendo en la imagen b) donde se presenta la mayor capacidad de ajuste de parámetros. La pestaña *Setup* permite, entre otras cosas, el cambio de la cantidad de inputs o outputs del bloque, definición de cruces por cero o incluso la definición de parámetros descritos en la inicialización de la simulación. La pestaña de *Code* es en la que se debe definir la función en C a aplicar a la señal que entre en el bloque.

Ventajas:

Las ventajas de esta alternativa son:

- Software especializado y optimizado para simulación rápida y precisa de electrónica de potencia.
- Interfaz intuitiva para crear circuitos y controles integrados.
- Eficiencia de rendimiento con cargas no lineales y conmutación de sistemas.
- Permite simulaciones térmicas y magnéticas sin necesidad de toolboxes adicionales.

Desventajas:

Por otro lado con esta alternativa hay:

- Menor flexibilidad para modelar sistemas fuera del ámbito de potencia.
- Licenciamiento separado del ecosistema MATLAB/Simulink.
- Comunidad más pequeña y menos documentación en comparación con Simulink.
- Menos integración directa con otras herramientas de análisis avanzadas.

1.5. Alternativas Seleccionadas

Luego de considerar las ventajas y desventajas de cada alternativa descrita anteriormente, se establecen los siguientes criterios de selección a utilizar:

1.5.1. Criterios de Selección

Según lo anterior, existen dos problemas a solucionar el método de generación de plasma y el software de simulación a usar. A continuación se describen los criterios de selección para cada problema.

Método de Generación de Plasma

Se definieron 3 alternativas para el modo de generación de plasma. Estas consisten en descargas de corriente continua, descargas de corriente continua pulsada y descargas de radio frecuencia. Los criterios a considerar son los siguientes:

1. **Simplicidad de la topología:** Puesto que esta determinará su facilidad de análisis y modelación, considerando las variables y la cantidad de componentes que influyen en el sistema. Esto es importante dado al tiempo limitado del proyecto.
2. **Control Disponible:** Se considera criterio de selección el nivel de control que se puede ejercer sobre el sistema puesto que se desea un modelo de carga flexible y adaptable a distintas situaciones.
3. **Potencia de Operación:** Puesto que dependiendo de los niveles de potencia en los que pueda operar el sistema influirán en los objetivos que se usen para la aplicación de la carga no lineal.
4. **Costo:** Se debe tomar en cuenta el costo del método de generación para posibilidad de futura investigación y aplicaciones prácticas del modelo.

Software a Utilizar

Para esta decisión se definieron 2 alternativas, Matlab/Simulink y PLECS. Los criterios a considerar serán los siguientes:

1. **Facilidad de uso:** Puesto que el tiempo para realizar el proyecto es limitado, un software intuitivo y con una curva de aprendizaje manejable es esencial para el uso óptimo del software

2. **Documentación disponible:** Puesto que la documentación disponible sobre las capacidades y posibles errores del software influyen de forma importante en la implementación de simulaciones en este
3. **Licencias:** Se debe considerar el costo de licencias tanto del software en si como de librerías o toolboxes que se puedan necesitar para el desarrollo del proyecto.
4. **Velocidad del Software:** La velocidad es un factor crítico para la simulación, en particular la de cargas no lineales. Aquí influyen entonces los niveles de optimización que pueda tener el programa para las simulaciones, en particular, de electrónica de potencia

1.5.2. Evaluación de Alternativas

A continuación se presentan las evaluaciones de las alternativas correspondientes a cada problema.

Método de Generación de Plasma

1. Descarga de Corriente Continua

- Simplicidad de Topología: Topología más simple de las opciones.
- Control Disponible: Posee sólo una resistencia la cuál es capaz de limitar en que zona de trabajo mantenerse.
- Potencia de Operación: Opera a baja potencia, tiende a usarse por sus características lumínicas más que para entregar potencia.
- Costo: Alternativa de menor costo.

2. Descarga de Corriente Continua Pulsada

- Simplicidad de Topología: Usa topologías de complejidad mayor a aquella de descarga DC, puesto que depende de el método de generación de pulsos, sin embargo, se mantiene simple en su funcionamiento y teoría.
- Control Disponible: El ajuste del ancho de pulso y de componentes que limiten la corriente permiten mayor grado de control, sobretodo en corriente máxima, tiempos de carga y de descarga.
- Potencia de Operación: Opera a mayores potencias que la alternativa anterior, dependiendo en particular del generador de corriente pulsada.
- Costo: Su principal costo depende de el método de generación de corriente pulsada.

3. Descarga de Radio Frecuencia

- Simplicidad de Topología: Alternativa con topología de mayor complejidad, depende de la fuente AC y de su acoplo a capacitores o inductores, del cuál depende el funcionamiento del sistema.
- Control Disponible: La complejidad de su topología presenta grandes oportunidades para controlar las variables de salida de este.
- Potencia de Operación: Alternativa que permite operación a mayor potencia.

- Costo: Debido a la complejidad de esta alternativa, su costo aumenta considerablemente en relación a las alternativas anteriores.

Analizando los criterios previamente descritos se obtiene que la alternativa más conveniente, es la generación de plasma mediante descargas de corriente continua pulsada, siendo la alternativa a seleccionar.

Software a Utilizar

1. Matlab/Simulink

- Facilidad de Uso: Matlab/Simulink a pesar de su entorno de simulación gráfico, presenta una curva de aprendizaje alta.
- Documentación Disponible: Posee documentación extensiva tanto por parte de la comunidad como de los desarrolladores.
- Licencias: A pesar de que las licencias para operar Matlab/Simulink son costeadas por la Universidad Técnica Federico Santa María para sus alumnos, ciertos toolboxes o librerías que pueden ser necesarias para simulaciones de electrónica de potencia son pagadas.
- Velocidad: Si bien es un software reconocido por su flexibilidad, no es reconocido por su velocidad.

2. PLECS

- Facilidad de Uso: Software presenta curva de aprendizaje baja, con un entorno de simulación gráfico intuitivo, librerías de fácil acceso y simple de comprender.
- Documentación Disponible: Posee documentación extensiva por parte de los desarrolladores, incluyendo diversos demos de circuitos que sirve para comprender funcionamiento de bloques y del sistema en general. Debido a la especialización del programa, no presenta tanta documentación por parte de la comunidad en comparación a la alternativa anterior.
- Licencias: La Universidad Técnica Federico Santa María provee a sus estudiantes con licencias de PLECS Standalone, la cuál es la única necesaria para el desarrollo del proyecto.
- Velocidad: Software optimizado y especializado para la simulación de circuitos electrónicos, mecánicos y térmicos, es reconocido por su velocidad.

Analizando los criterios previamente descritos, se obtiene que la alternativa más conveniente es la del software PLECS, siendo la alternativa a seleccionar. Se debe notar que PLECS es un entorno de simulación de circuitos, por lo que en caso de ser necesario el análisis matemático de datos, se utilizará Matlab.

1.5.3. Resumen

Se presentan las distintas alternativas de solución que corresponden a decisiones que tomar para el método de generación de plasma y el software a utilizar, con tres y dos alternativas descritas respectivamente, que permiten la modelación de la relación no lineal entre el voltaje y la corriente del sistema. Se han escogido las alternativas que presentan las mejores condiciones para

su desarrollo en base a una serie de criterios previamente establecidos. Dichas alternativas son el uso de generación de plasma mediante descargas de corriente continua pulsada y el análisis de la carga en el entorno PLECS. Se debe notar que si bien PLECS se usará para la simulación del sistema, Matlab se usará para el análisis matemático de los datos de ser necesario.

Capítulo 2

Modelación de carga no lineal utilizando Tablas

Cuándo se utilizan métodos de modelación por Tablas se busca utilizar un set de datos discretos para establecer una relación entre 2 o más variables al interpolar entre los valores de dicho set de datos. Este método, tiene la ventaja de su simplicidad puesto que para modelar la relación de las variables no se requiere ningún análisis matemático de estas, sino que se depende de datos ya obtenidos mediante mediciones previas. De la misma forma, su desventaja es su dependencia a la fidelidad del set de datos utilizados para la tabla y la calidad de la interpolación entre los datos, puesto que es posible una mala representación a causa de el uso de un método de interpolación no adecuado o la falta de un set de datos de mayor tamaño.

2.1. Generación de Curva I/V por Tablas

Modelar mediante tablas busca recrear el comportamiento no lineal de la Figura 1.2. Posteriormente se estudia el comportamiento del modelo en distintas etapas así como también como varía su respuesta a distintos valores para el ciclo de trabajo de los pulsos de voltaje de entrada y distintos valores de la inductancia. En particular para anchos de pulso de 100[μ s], 500[μ s] y 1000[μ s], además de inductancias de 1[mH], 2[mH] y 5[mH].

Por otro lado los valores correspondientes al delta de descarga de corriente y corriente peak del Circuito Generador de Plasma serán de particular interés para determinar la corriente de operación de la carga y la frecuencia de los puntos de entrada.

2.1.1. Definición de Parámetros

Para crear una tabla que asegure un correcto funcionamiento del sistema, se reconstruye el gráfico de la Figura 1.2 en Matlab mediante el uso de puntos de interés en los cuales la curva experimenta cambios de pendiente y el uso de la herramienta de interpolación *makima*, la cuál es una modificación de la interpolación cubica, que se elige por sobre otros métodos porque ofrece una transición más suave entre los puntos, evitando oscilaciones no deseadas que pueden aparecer al usar otras técnicas como *spline* o *pchip*. Este tipo de interpolación preserva mejor la forma de los datos y proporciona un gráfico más realista y visualmente coherente, especialmente cuando los puntos presentan variaciones abruptas o distribuciones irregulares. Además, para realizar pruebas y mediciones se construye en PLECS el circuito de la Figura 2.1.

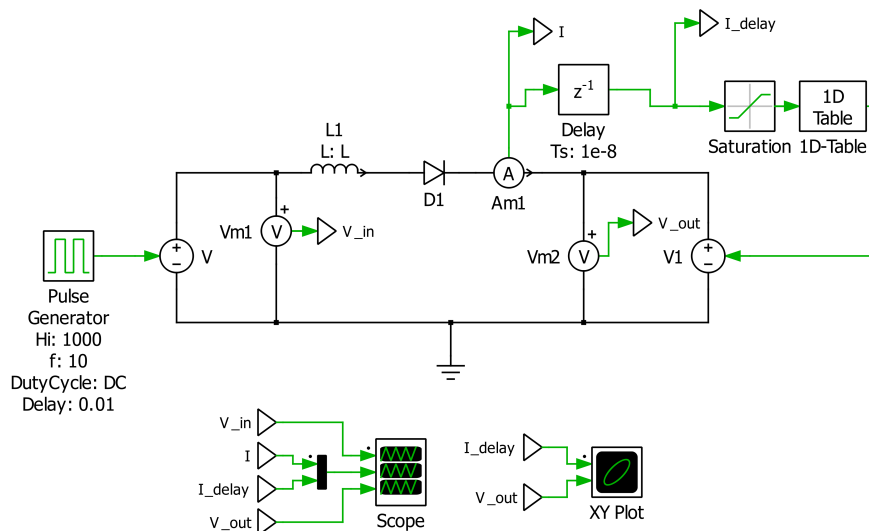


Figura 2.1: Topología de Sistema de Generación de Plasma por Tabla

El gráfico de la Figura 2.2 es aquel generado de la forma descrita anteriormente. De este gráfico semilogarítmico se obtienen 600 puntos igualmente espaciados para ser representados como vectores en la tabla de control del circuito, que recibirá la corriente y entregará el voltaje correspondiente.

En este caso, se mantiene el uso de una escala logarítmica para el eje de corriente puesto que entrega mayor precisión para la selección de puntos, ya que al ser espaciados igualmente esta escala permite que la cantidad de datos para valores pequeños de corriente sea igual a la cantidad para valores más grandes, notar que esto no ocurre en escala lineal puesto que se necesitarían muchos más puntos para representar la relación de los valores pequeños de corriente y el voltaje.

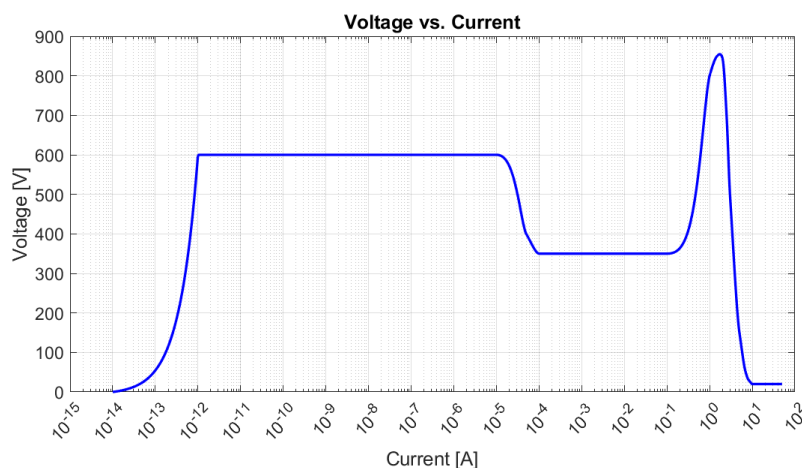


Figura 2.2: Gráfico Semilogarítmico Matlab de Corriente de Descarga vs Voltaje.

2.1.2. Análisis de Funcionamiento por Etapas.

Como se puede ver en la Figura 2.1, tal como describe la topología, se usa una fuente de voltaje controlada por un generador de pulsos de altos de 1000[V], bajos de 0, frecuencia de 10[Hz] y un ciclo de trabajo de 0.0001, esta frecuencia se selecciona para facilitar el estudio de un pulso por simulación. Esto está conectado en serie a una inductancia de 1[mH] la cuál entrega una corriente que pasa por un diodo para prevenir corrientes en dirección a la fuente, esta es posteriormente medida con un amperímetro siendo esta la corriente de entrada, a la cual se le aplica un delay de $1 \cdot 10^{-8}s$, correspondiente a dar un paso de simulación, el cuál permite que no existan errores de simulación al controlar la generación de plasma al mismo tiempo que se genera la corriente, manteniendo intacto el comportamiento dinámico principal de la señal, esta es posteriormente saturada entre 0 e infinito y entregada a la tabla de una dimensión, el output de esta última será el voltaje reflejado por la fuente controlada de voltaje. Estas señales se observan en la Figura 2.3.

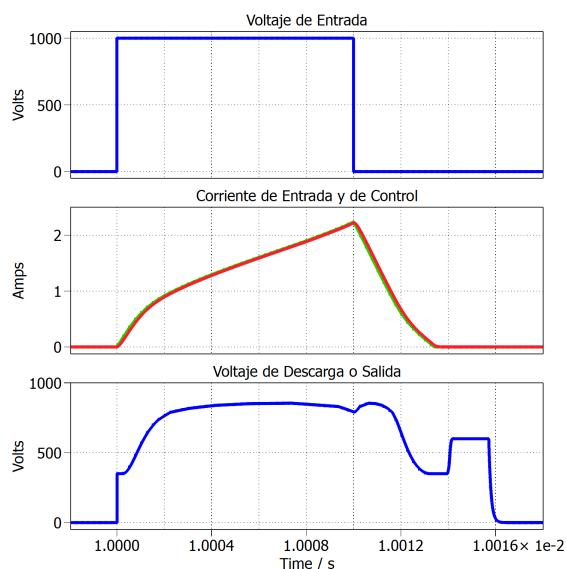


Figura 2.3: Voltaje de entrada, corriente de entrada y voltaje de salida vs tiempo.

A continuación se procede a diferenciar y describir las 3 claras etapas en el funcionamiento del circuito.

Etapas 1: Carga.

En esta primera etapa del circuito, como muestra la Figura 2.4 se observa el primer alto del pulso de voltaje, lo que hace que la corriente de entrada y por ende la de control aumente, este aumento es tan rápido que el voltaje que debiera generar el plasma comienza inmediatamente en los 350[V], esto es debido a que la corriente apenas se enciende el pulso es de el orden de $5 \times 10^{-4}[A]$ lo que quiere decir que nos encontramos en el inicio de la zona de Descarga Luminosa Normal.

Esas mediciones significan que, debido a la velocidad de crecimiento de la corriente, el generador se salta las zonas de Townsend y Descarga Luminosa Subnormal. Por otro lado el inicio de la zona de trabajo del plasma es lo esperado considerando la cantidad de corriente entregada, lo que quiere decir que la tabla comienza con un funcionamiento correcto.

La corriente posteriormente continua creciendo en magnitud lo que correctamente genera primero

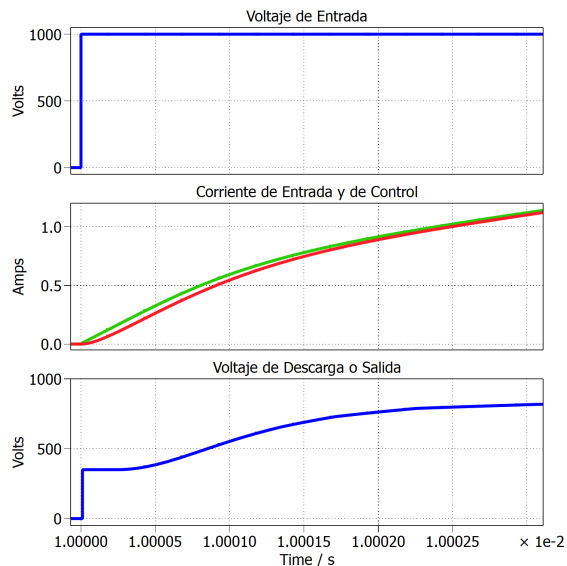


Figura 2.4: Etapa 1.

una estadía en la zona de Descarga Luminosa Normal y posteriormente una transición a la zona de Descarga Luminosa Anormal que ocurre, de forma esperada, en los ordenes de corriente de 1×10^{-1} [A].

Etapa 2: Trabajo

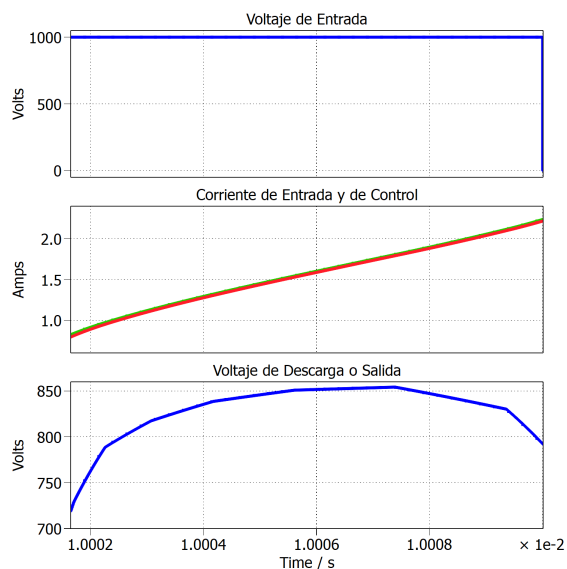


Figura 2.5: Etapa 2.

En esta segunda etapa del circuito, como muestra la Figura 2.5, la corriente de control alcanza el orden de 1[A], por lo que el plasma entrega el voltaje correspondiente a los de la zona de Arco, esto se mantiene durante el pulso de voltaje de entrada se encuentra encendido, tiempo en el cual la corriente alcanza el valor cercano a 2.21[A], debido a esto el voltaje de salida pasa de 750[V] a

su valor más alto de 850[V] para luego comenzar a decrecer, de la misma forma que en la zona de Arco descrita en la literatura o en modelos experimentales, es en este momento que el circuito pasa a su tercera etapa.

Etapa 3: Descarga

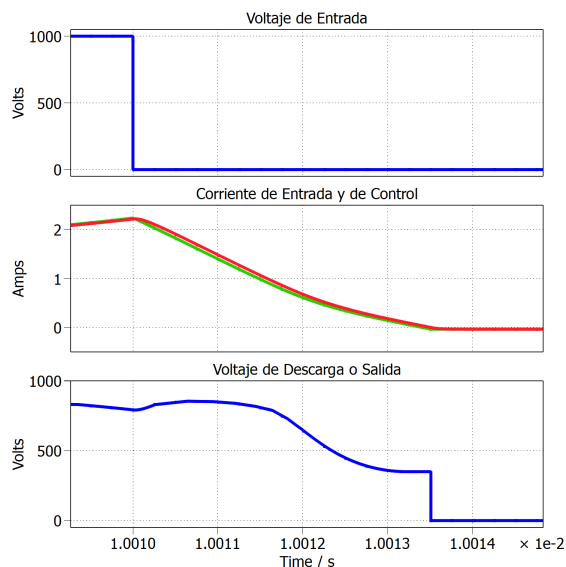


Figura 2.6: Etapa 3.

En esta última etapa del circuito, como muestra la Figura 2.6, es en la cuál el pulso de voltaje DC de entrada pasa a su estado bajo. En ese momento la corriente de control comienza a disminuir de acuerdo permite el inductor. Debido a que el circuito está controlado por tablas a diferencia de ser un generador de plasma real, el voltaje de salida comienza a trazar la misma curva que en las etapas anteriores, pero esta vez invertida.

En concordancia con cada nivel de corriente previamente mencionado, el voltaje de salida vuelve a pasar por el peak en 850[V] y continua decreciendo, esta vez de manera más rápida, hasta volver a la zona de Descarga Luminosa Normal en la que luego se apaga debido a que el cambio por los otros niveles de corriente es muy rápido.

2.1.3. Gráfico XY de Voltaje vs Corriente

PLECS tiene la capacidad de crear gráficos XY, por lo que en la Figura 2.7 a) se aprecia el gráfico de Voltaje vs Corriente generado por la simulación, los datos son posteriormente exportados en formato CSV y graficados por Matlab en escala semilogarítmica, obteniendo la Figura 2.7 b), este último es muy similar a el gráfico original, con la diferencia de que, como se explica en la etapa 1, no se trabaja en las primeras dos zonas de descarga, además el sistema con los parámetros descritos en esta sección se empieza a descargar antes de recorrer la zona de arco completa. Lo anterior debido a que PLECS genera sólo gráficas en escalas lineales.

Se agrega la Figura 2.8 en la cuál se tiene un ancho de pulso de 500[μ s] y una inductancia de 2[mH] puesto que con estos valores se puede observar que el comportamiento de la curva I/V en la zona de arco es la correcta.

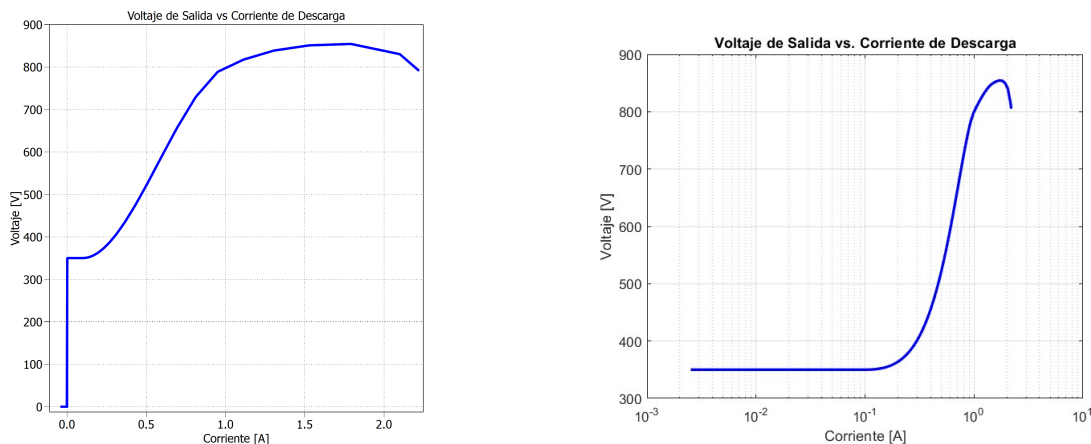


Figura 2.7: Gráfico de la Simulación de Voltaje vs Corriente: a) obtenido de PLECS b) Obtenido de Matlab

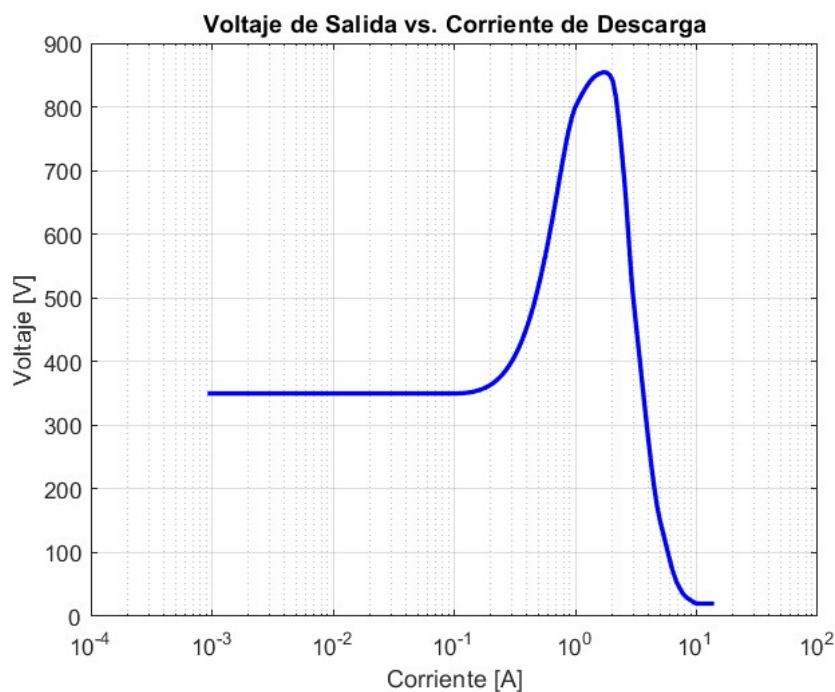


Figura 2.8: Gráfico de la Simulación de Voltaje vs Corriente

2.2. Análisis de Sensibilidad

2.2.1. Efecto del Cambio de Ciclo de Trabajo del Pulso

En esta sección se realiza una comparación entre pulsos de $100[\mu s]$, $500[\mu s]$ y $1000[\mu s]$ aplicados a una inductancia de $1[mH]$ de las señales de voltaje de entrada, corriente de entrada (de descarga) en la carga, voltaje de salida generado y la variación de corriente en cada paso de simulación.

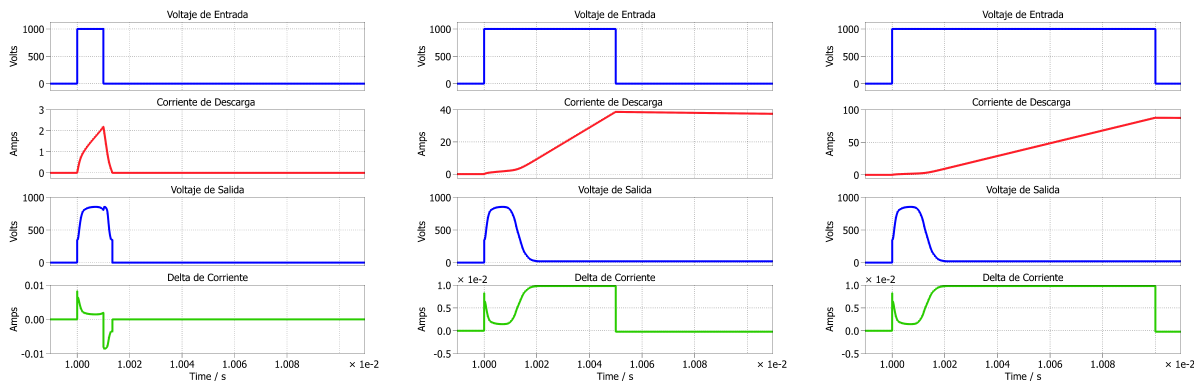


Figura 2.9: Resultados para Anchos de Pulsos de: a) 100[μs] b) 500[μs] c) 1000[μs]

Notar que la Figura 2.9 muestra que al aumentar el ancho de pulso, la corriente de descarga tiene más tiempo para aumentar lo que hace que cada vez alcance valores más altos. De la misma forma esto hace que el voltaje de salida pase por todos los valores indicados por la tabla y descritos en el análisis por etapas, luego de esto el valor del voltaje de salida se mantiene en 20 [V] hasta que la corriente se descargue al punto en el que su valor se encuentre en la tabla de control, permitiendo que pase por los valores en sentido contrario.

En la Figura 2.9, además, se observa el delta de variación de corriente entre el valor actual y el valor del paso de simulación anterior, correspondiente a $1 \cdot 10^{-8}s$, este valor representa la velocidad de cambio de la corriente para cada uno de los anchos de pulso. Notar que el delta de corriente cambia de la misma forma en todos los casos, sin embargo los cambios en el ancho de pulso limitan la corriente máxima alcanzada y por ende limitan cuánto de la variación de corriente se puede graficar, por ejemplo, en la figura a) no se alcanza a experimentar el aumento del delta que ocurre entre 0.010002 y 0.01001 segundos, el cuál si ocurre en las figuras b) y c).

2.2.2. Efectos de Cambios en la Inductancia de Salida

En esta sección se analiza como afectan los valores de inductancia a cada ciclo de trabajo, graficando el pulso de voltaje, la corriente de descarga correspondiente a la señal de control y el voltaje de salida.

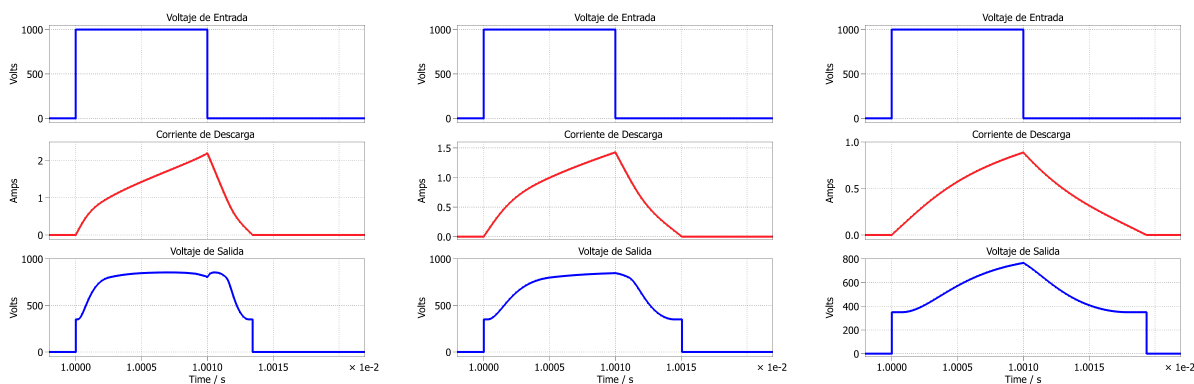


Figura 2.10: Ciclo de trabajo de 100[μs] con inductancias de: a) 1[mH]. b) 2[mH]. c) 5[mH].

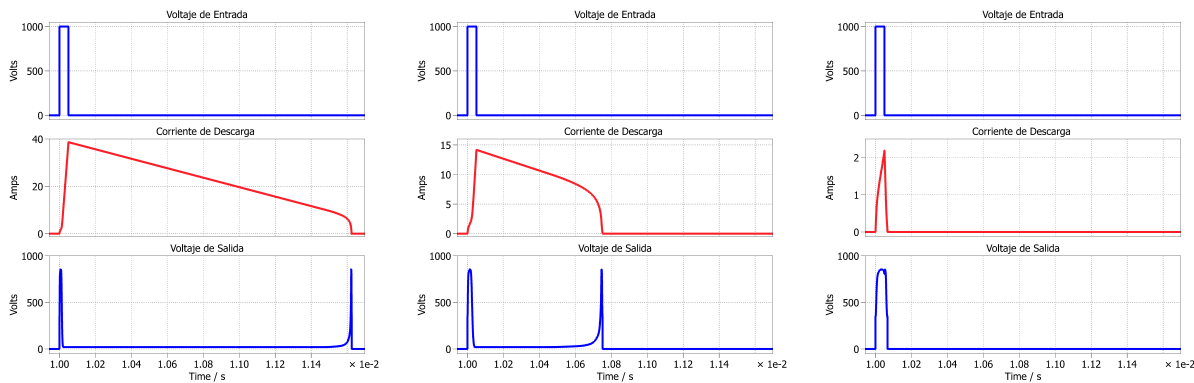


Figura 2.11: Ciclo de trabajo de 500[μ s] con inductancias de: a) 1[mH]. b) 2[mH]. c) 5[mH].

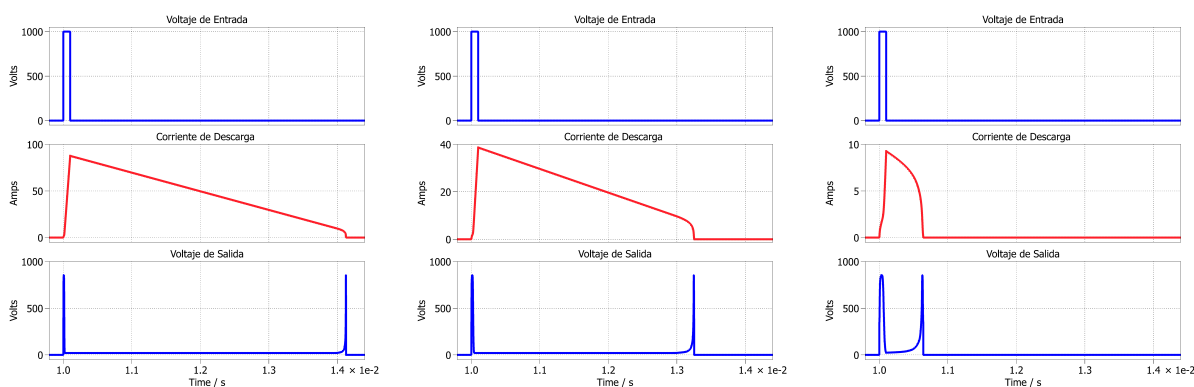


Figura 2.12: Ciclo de trabajo de 1000[μ s] con inductancias de: a) 1[mH]. b) 2[mH]. c) 5[mH].

En las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12 se observan los cambios en las señales previamente indicadas al aumentar, tanto el tiempo en el que el pulso se mantiene en alto, como la inductancia. Todas estas mediciones confirman que el aumento del ancho de pulso implica más tiempo para que la corriente aumente y por lo tanto valores máximos de corriente más altos para cada caso, pero lo importante para este análisis es notar como el valor de la inductancia limita tanto las corrientes máximas como el tiempo que la corriente de descarga se demora en alcanzar sus valores máximos y de la misma forma volver a su mínimo. Al tiempo que la corriente de descarga demora de pasar de su valor máximo a mínimo le denominaremos tiempo de descarga, este tiempo es importante puesto que limitará la frecuencia de los pulsos de voltaje de entrada.

Notar que el menor tiempo de descarga para ancho de pulso de 100[μ s] se obtiene con 1[mH], a diferencia de los casos de anchos de 500[μ s] y 1000[μ s], en los cuales el menor tiempo de descarga se obtiene con una inductancia de 5[mH].

Finalmente, y como es de esperarse, el valor de corriente de descarga máxima siempre es más bajo para inductancias mayores, este valor es importante puesto que debe ser capaz de adaptarse para los límites operacionales de los circuitos en los que la carga modelada se conecte.

2.2.3. Análisis Paramétrico de Sensibilidad

Debido a la importancia de los valores de corriente máxima y tiempo de descarga descritos anteriormente y a la necesidad de mayor análisis de este último se procede a realizar mediciones para más anchos de pulso, específicamente 50, 100, 200, 250, 350, 500, 750 y 1000 [μ s], los resultados

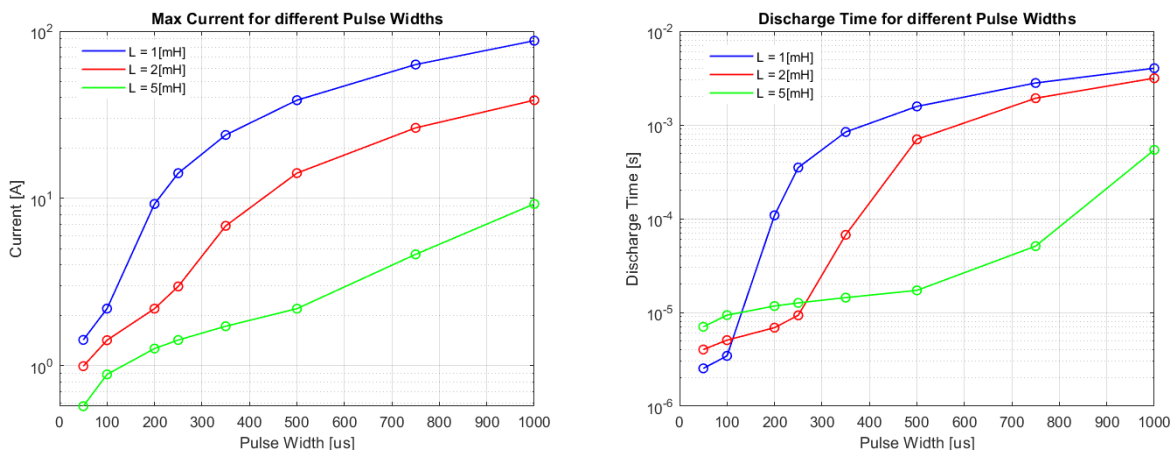


Figura 2.13: a) Corriente Máxima para distintos anchos de pulso. b) Tiempo de Descarga para distintos anchos de pulso.

correspondientes se encuentran graficados en Matlab en la Figura 2.13.

Para el caso de la figura a) se confirma lo previamente descrito al afirmar que para todos los casos, mientras mayor sea la inductancia, menor será la corriente máxima. Notar que esta diferencia se acentúa a medida que se tienen anchos de pulsos más grandes.

Para el caso de la figura b), gracias a la mayor cantidad de anchos de pulso medidos se observa que a medida que estos aumentan, la variación en el tiempo de descarga tiene la misma tendencia para cada inductancia, con la diferencia de que mientras más grande la inductancia, más lenta es la variación, lo que implica que si se miden anchos de pulso mayores, para la inductancia de 5[mH], se podría apreciar el mismo aumento rápido en el tiempo de descarga y posterior desaceleración que se observa para 1[mH] y 2[mH].

En la Figura 2.14 se observa como la corriente de descarga actúa en el tiempo para los anchos de pulso que están entre cada cambio de orden observados en la Figura 2.13 b), notando como a medida que el ancho de pulso aumenta, el orden de el tiempo de descarga más rápido se invierte a causa de la tendencia previamente descrita.

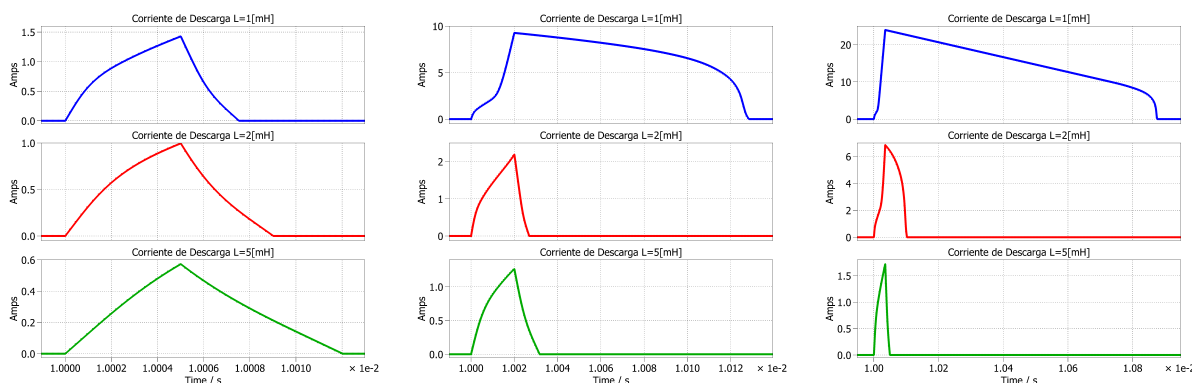


Figura 2.14: Corriente de Descarga para Ciclos de Trabajo de: a) 50[us]. b) 200[us]. c) 350[us].

2.3. Resumen de Resultados

A partir de la simulación del circuito de generación de plasma mediante tablas, se logró modelar adecuadamente el comportamiento no lineal de la relación Voltaje-Corriente observada en la Figura 1.2, utilizando una tabla construida a partir de una interpolación *makima* en Matlab. Esta tabla permitió replicar las distintas zonas de descarga del plasma (luminosa normal, anormal y de arco) según el nivel de corriente entregado al sistema.

Durante el análisis por etapas, se identificaron claramente tres fases de funcionamiento:

- Etapa de carga: el sistema comienza directamente en la zona de descarga luminosa normal debido al rápido aumento de corriente, omitiendo las zonas de Townsend y luminosa subnormal.
- Etapa de trabajo: el plasma opera en la zona de arco, alcanzando un voltaje máximo de 850[V], consistente con modelos experimentales.
- Etapa de descarga: al apagarse el pulso de entrada, la corriente disminuye gradualmente, replicando la curva Voltaje-Corriente en dirección inversa hasta apagarse el sistema.

El gráfico XY generado por PLECS en la Figura 2.7 y en la Figura 2.8, evidencia una alta fidelidad con respecto al modelo de Matlab y la curva de referencia, aunque no abarca las regiones de baja corriente. Además, el sistema demostró un comportamiento coherente al aplicar distintos anchos de pulso y valores de inductancia, mostrando variaciones esperadas en la corriente peak y su delta, lo que valida la efectividad del método de generación por tablas para controlar el plasma en distintas condiciones operativas. De igual forma se nota que la variación del tiempo de descarga es consistente entre distintos valores de inductancia, puesto que mantienen la misma tendencia a medida que aumenta el ancho de pulso y por ende la corriente máxima.

En conclusión, los resultados muestran que el método de modelación de la carga no lineal por tablas permite replicar con precisión el comportamiento no lineal del sistema de descarga de plasma. La precisión del modelo es especialmente destacable en las regiones de corriente media y alta, aunque presenta limitaciones en las zonas de baja corriente, donde la activación es muy rápida y no se representan con claridad las primeras fases de la descarga (Townsend y Descarga Subnormal).

Capítulo 3

Modelación de carga no lineal utilizando Funciones

Cuándo se utilizan métodos de modelación por funciones, se busca una ecuación capaz de replicar la curva o relación entre las variables a modelar, se busca que dicha ecuación sea continua y que no sea definida por partes, de otra manera se vuelve muy similar a un método de modelación por tabla. Este método si bien no es simple, debido a que requiere mayor análisis matemático, tiene la ventaja de su precisión punto a punto y de no depender de herramientas de interpolación externas al modelo que puedan introducir diferencias en relación a la curva original.

3.1. Generación de Curva I/V por Funciones

Inicialmente se busca aplicar el comando polyfit de matlab, tanto a la serie de puntos con los que inicialmente se arma la tabla en el capítulo anterior, como a la serie de puntos obtenidos de la tabla, esto no obtiene buenos resultados debido a que la relación a modelar se mantiene constante entre distintos valores de corriente y en la función obtenida de polyfit esto no se ve representado. Es debido a esto que se procede a implementar un diagrama de bode, cuyos polos y ceros generan una curva de magnitud similar a la cuál queremos modelar, el diagrama luego se convierte a números reales y se escala para que alcance los valores de voltaje que necesitamos, resultando así en la función a usar para el modelo. Este proceso se explicará en más detalle a continuación.

3.1.1. Definición de Función

Para generar el Diagrama de Bode, inicialmente se identifica la cantidad de polos y ceros que se necesitarán, además de sus respectivas frecuencias. Primero se identifica un cero en 10^{-12} , el orden de este cero deberá ser capaz de hacer que la curva llegue a valores de voltaje de 600[V] una vez que el diagrama sea escalado a valores reales a diferencia de decibles, luego un polo en 10^{-11} el cuál debe hacer que la función se mantenga constante hasta llegar a la frecuencia 10^{-6} en la cuál se coloca un polo que debe hacer que la función caiga a los valores de voltaje entregados en las Zonas Lumínicas, posteriormente un cero en 10^{-5} es el que debe hacer que el voltaje se mantenga constante hasta llegar a 10^{-1} , dónde un cero debe ser capaz de lograr que el voltaje aumente hasta llegar a la zona de voltaje máximo en la frecuencia de 10^0 donde se colocan suficientes polos para que el voltaje caiga según lo correspondiente a la Zona de Arco, finalmente un cero en 10^1 hará que la función se mantenga constante desde esa frecuencia en adelante.

Los ordenes de cada cero y polo al igual que la frecuencia en la que se ubican son posteriormente modificados de forma iterativa hasta que se alcanza una forma de onda como la que se busca representar en el modelo, dichos valores se describen a continuación:

■ Ceros:

- $z_1 = 10^{-13,1}$
- $z_2 = 10^{-4,2914}$
- $z_3 = 10^0$
- $z_4 = 10^{0,5}$

■ Polos:

- $p_1 = 10^{-12,1}$
- $p_2 = 10^{-4,43}$
- $p_3 = 10^{0,195}$

■ Ordenes:

- $a_1 = 0,2$
- $a_2 = 0,6$
- $a_3 = 3,86$
- $a_4 = 2,84$
- $b_1 = 0,2$
- $b_2 = 0,6$
- $b_3 = 6,7$

Donde a_1, a_2, a_3 y a_4 corresponden al orden de los ceros z_1, z_2, z_3 y z_4 respectivamente, de la misma forma b_1, b_2 y b_3 corresponden al orden de los polos p_1, p_2 y p_3 respectivamente.

Notar que los ordenes de los ceros y polos corresponden a números decimales, esto es debido a que el cambio generado por números enteros se vuelve muy brusco, lo que terminaría en un orden total muy alto. Al optar por números decimales, el orden alcanzado es de 7.5 para la función del modelo.

El valor de la magnitud será:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \left(\left| \frac{(s - z_1)^{a_1} (s - z_2)^{a_2} (s - z_3)^{a_3} (s - z_4)^{a_4}}{(s - p_1)^{b_1} (s - p_2)^{b_2} (s - p_3)^{b_3}} \right| k \right)$$

Donde k corresponde a la constante calculada por la división entre la productoria de polos y la productoria de ceros.

$$k = \frac{(p_1)^{b_1} (p_2)^{b_2} (p_3)^{b_3}}{(z_1)^{a_1} (z_2)^{a_2} (z_3)^{a_3} (z_4)^{a_4}}$$

Posteriormente se utiliza el orden del primer cero para escalar la función a los valores correspondientes de magnitud, esto se logra con una simple regla de tres. Además se transforma la variable de frecuencia s correspondiente al diagrama de bode como jI , introduciendo de esta manera las corrientes correspondientes en escala logarítmica. Con esto la función se vuelve lo siguiente:

$$V(I) = \left(\frac{600}{a_1 \cdot 20} \right) \cdot 20 \cdot \log_{10} \left(\left| \frac{(jI - z_1)^{a_1} (jI - z_2)^{a_2} (jI - z_3)^{a_3} (jI - z_4)^{a_4}}{(jI - p_1)^{b_1} (jI - p_2)^{b_2} (jI - p_3)^{b_3}} \right| k \right)$$

$$V(I) = \left(\frac{600}{a_1 \cdot 20} \right) \cdot 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{(I^2 + z_1^2)^{a_1/2} (I^2 + z_2^2)^{a_2/2} (I^2 + z_3^2)^{a_3/2} (I^2 + z_4^2)^{a_4/2}}{(I^2 + p_1^2)^{b_1/2} (I^2 + p_2^2)^{b_2/2} (I^2 + p_3^2)^{b_3/2}} k \right)$$

Al reemplazar la función $V(I)$ con los datos previamente descritos y evaluarla en I , se obtiene el gráfico de la Figura 3.1

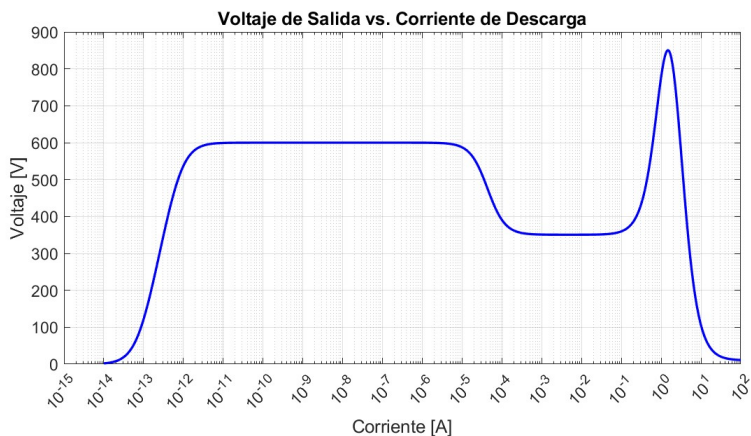


Figura 3.1: Curva generada por la función V(I)

3.1.2. Análisis de Funcionamiento

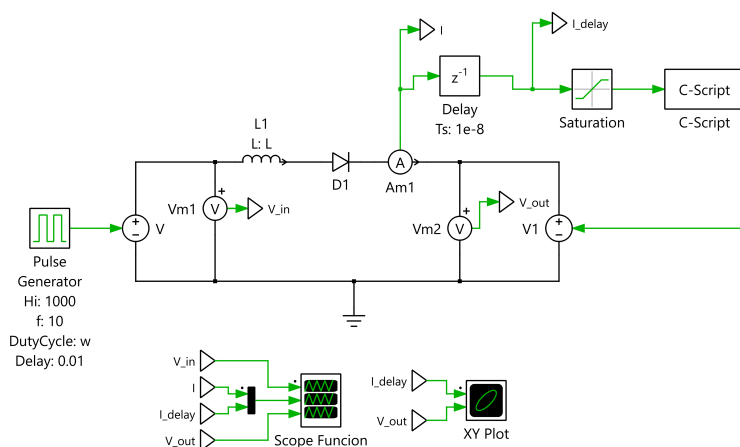


Figura 3.2: Topología de Sistema de Generación de Plasma por Función V(I)

Para ejecutar el modelo, se escribe la función $V(I)$ definida anteriormente en código C, el cuál se inserta en un bloque C-Script el cuál recibe la corriente que pasa por el inductor luego de el retraso de un paso de simulación de PLECS y de ser saturada entre 0 e infinito, el bloque luego entrega la señal de control para la fuente de voltaje controlada correspondiente al voltaje de salida del generador de plasma modelado tal como se muestra en la Figura 3.2 . En resumen, se reemplaza el bloque de tabla del modelo del capítulo anterior por un bloque de C-Script.

Las señales de interés para el estudio del funcionamiento del modelo, al igual que en el capítulo anterior, son el voltaje de entrada, la corriente de descarga y el voltaje de salida del sistema, las cuales se pueden observar en la Figura 3.3 para una inductancia de 1[mH] y un ancho de pulso de 100[μ s].

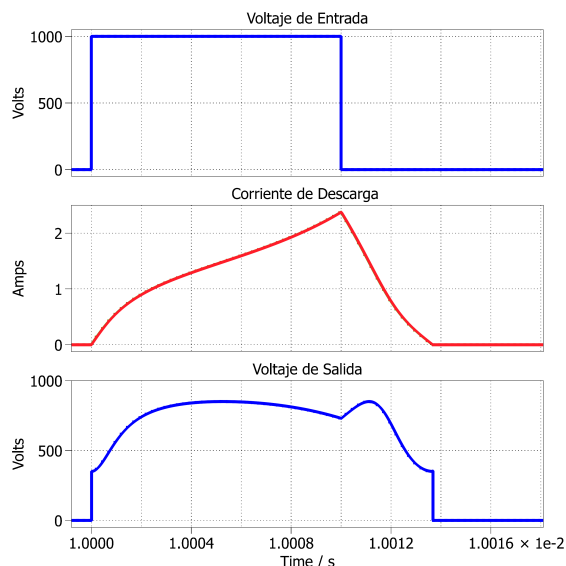


Figura 3.3: Voltaje de entrada, corriente de entrada y voltaje de salida vs tiempo.

Etapa 1: Carga.

La Figura 3.4 muestra la primera etapa del circuito, en la cual en el momento en que el voltaje de entrada se enciende, la corriente de descarga comienza a aumentar, en particular pasa de estar de los cero amperes a el orden de los miliamperes en el siguiente paso de simulación, es por esto que el voltaje de salida, al igual que en el capítulo anterior comienza desde los 350[V] lo que quiere decir que nos encontramos en el inicio de la zona de Descarga Luminosa Normal.

Esas mediciones significan que, debido a la velocidad de crecimiento de la corriente, el generador se salta las zonas de Townsend y Descarga Luminosa Subnormal. Esto es lo que se espera que suceda considerando que la simulación pasa inmediatamente de los 0[A] a los 10^{-3} [A] de un paso de simulación a otro, demostrando un funcionamiento inicial correcto en los resultados entregados por la función $V(I)$.

La corriente posteriormente continua creciendo en magnitud lo que correctamente genera una estadía en la zona de Descarga Luminosa Normal y posteriormente una transición a la zona de Descarga Luminosa Anormal que ocurre, según la relación en utilizada como base para la definición de la función, en los ordenes de corriente de 1×10^{-1} [A].

Etapa 2: Trabajo

En esta segunda etapa del circuito, como muestra la Figura 3.5, la corriente de control alcanza el orden de 1[A], por lo que el plasma entrega el voltaje correspondiente a los de la zona de Arco, esto se mantiene durante el pulso de voltaje de entrada se encuentra encendido, tiempo en el cual la corriente alcanza el valor cercano a 2.5[A], debido a esto el voltaje de salida pasa de 750[V] a su valor más alto de 850[V] para luego comenzar a decrecer, de la forma esperada correspondiente a la zona de Arco, es en este momento que el circuito pasa a su tercera etapa.

Etapa 3: Descarga

En esta etapa final del circuito, como muestra la Figura 3.6, es en la cuál el pulso de voltaje DC de entrada se apaga. En ese momento la corriente de control comienza a disminuir de acuerdo

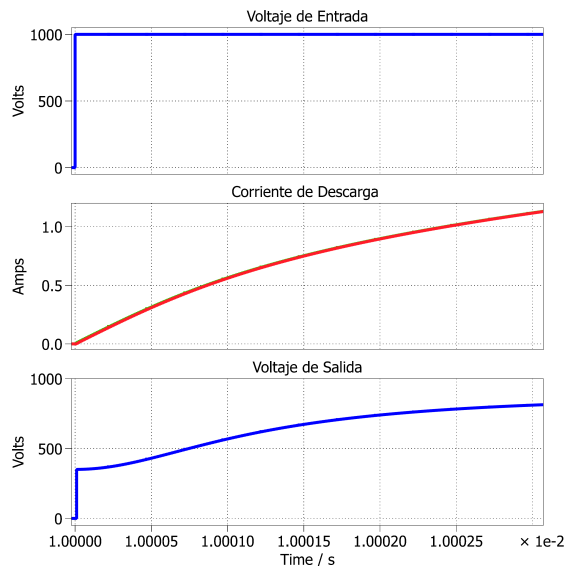


Figura 3.4: Etapa 1.

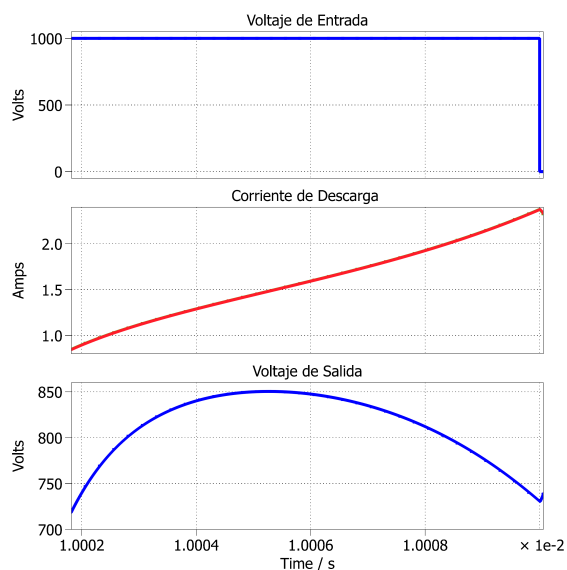


Figura 3.5: Etapa 2.

permite el inductor. Lo anterior causa que a medida que la corriente de descarga decrece y es evaluada en $V(I)$ en cada paso de simulación, el valor del voltaje de salida comienza a trazar la misma curva que en las etapas anteriores, pero esta vez invertida.

El voltaje de salida vuelve a pasar por su valor máximo en 850[V] y continua decreciendo, esta vez de manera más rápida, todo según los correctos valores de corriente en los que nos basamos para definir la función $V(I)$, hasta volver a la zona de Descarga Luminosa Normal en la que luego se apaga debido a que de un paso de simulación al otro, la corriente de descarga pasa del orden de los 10^{-3} [A] a 0[A].

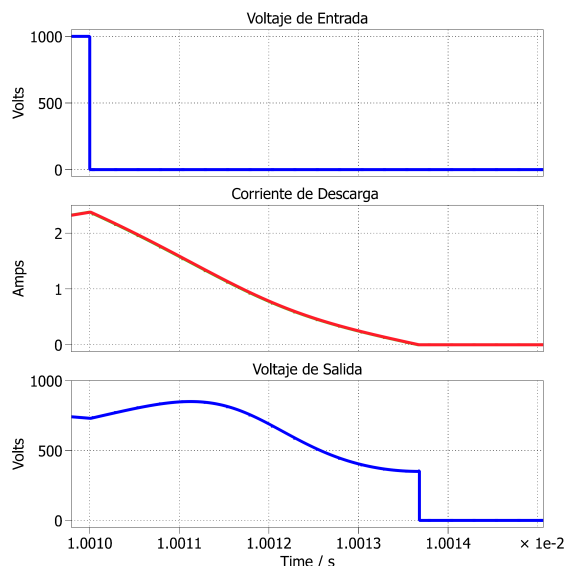


Figura 3.6: Etapa 3.

3.1.3. Gráfico XY de Voltaje vs Corriente

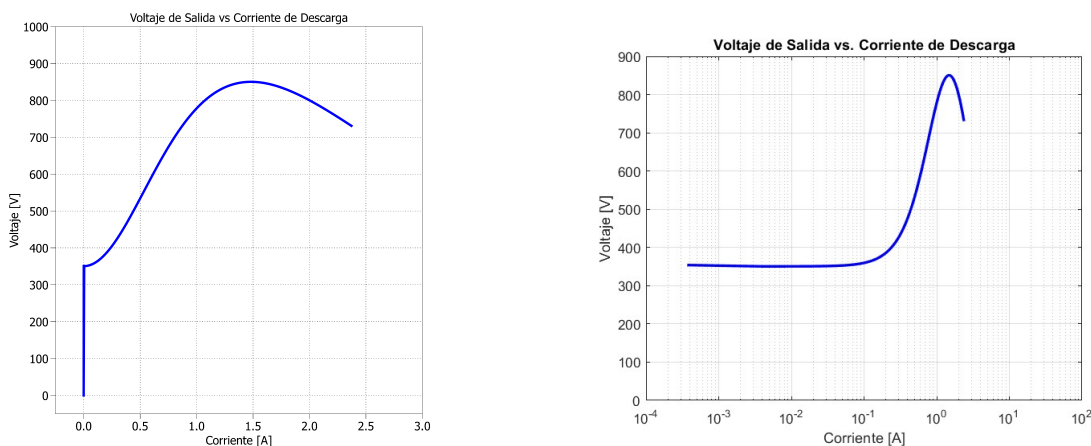


Figura 3.7: Gráfico de la Simulación de Voltaje vs Corriente: a) obtenido de PLECS b) Obtenido de Matlab

La Figura 3.7 a) muestra el gráfico XY simulado en PLECS, donde la corriente de descarga en el eje X y el voltaje de salida en el eje Y son representados en escalas lineales, estos datos fueron exportados a MatLab y escalados de forma semilogarítmica, como lo muestra la Figura 3.7 b), con el objetivo de facilitar su análisis. El gráfico resultante demuestra que la función $V(I)$ representa de forma satisfactoria la relación que se busca modelar, con la consideración de que durante la simulación no se observan las zonas de Townsend o de descarga luminosa subnormal.

Se agrega la Figura 3.8, la cuál es el resultado de la simulación considerando un ancho de pulso de $500[\mu s]$ y una inductancia de $2[mH]$, permitiendo observar que el comportamiento de la curva I/V en la zona de arco es cercana a la curva original. Notar que las diferencias entre las curvas XY de ambos modelos se estudiarán en el capítulo siguiente.

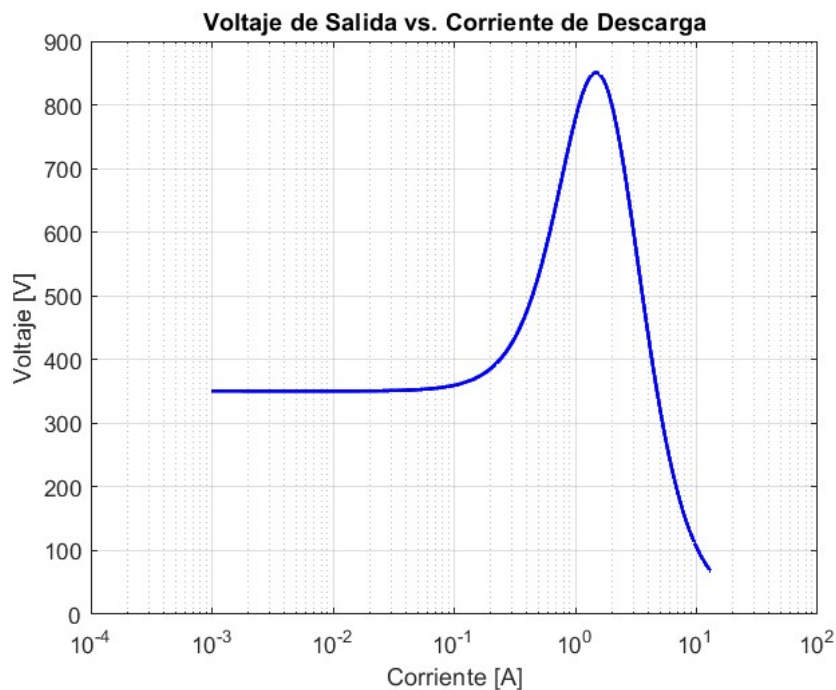


Figura 3.8: Gráfico de la Simulación de Voltaje vs Corriente

3.2. Análisis de Sensibilidad

3.2.1. Efecto del Cambio de Ciclo de Trabajo del Pulso

En esta sección se realiza una comparación entre el efecto de un voltaje de entrada con ciclos de trabajo de $100[\mu s]$, $500[\mu s]$ y $1000[\mu s]$ aplicados a una inductancia de $1[mH]$ para las señales de corriente de descarga, voltaje de salida generado y el delta de corriente en cada paso de simulación.

La Figura 3.9 muestra que al aumentar el ancho de pulso, la corriente de descarga tiene más

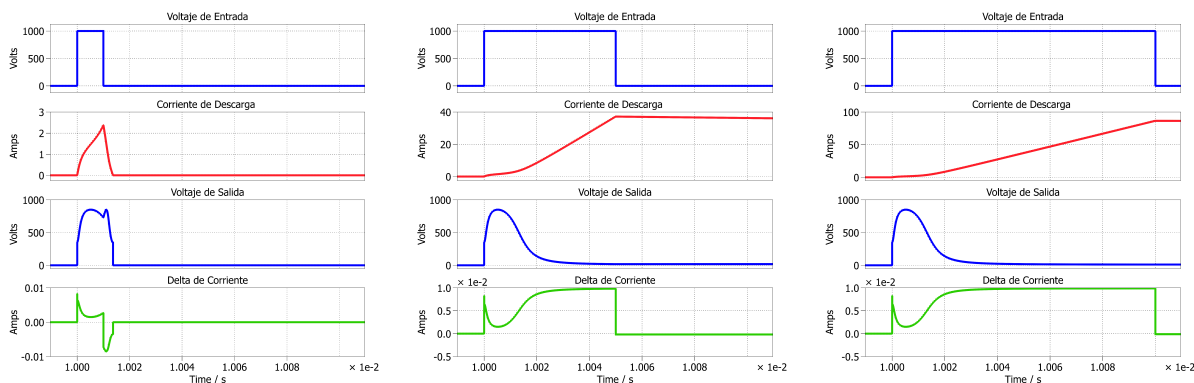


Figura 3.9: Resultados para Anchos de Pulsos de: a) $100[\mu s]$ b) $500[\mu s]$ c) $1000[\mu s]$

tiempo para aumentar lo que hace que cada vez alcance valores más altos. De la misma forma esto hace que el voltaje de salida pase por todas las zonas de descarga descritas previamente en

el análisis por etapas, una vez alcanzado cerca de los 30[A] el valor del voltaje de salida cae por debajo de los 20[V] y se mantiene entre ese valor y los 11[V] hasta que la corriente se descargue al punto de regresar a los 30[A] y comience a recorrer la curva de $V(I)$ en el sentido contrario.

Notar que el delta de corriente cambia de la misma forma en todos los casos, sin embargo los cambios en el ancho de pulso limitan la corriente máxima alcanzada y por ende limitan cuánto de la variación de corriente se puede graficar, por ejemplo, en la figura a) no se alcanza a experimentar el aumento del delta que ocurre entre 0.010002 y 0.01001 segundos, el cuál si ocurre en las figuras b) y c).

3.2.2. Efectos del Cambio en la Inductancia de Salida

Para estudiar como afectan los valores de inductancia a cada ciclo de trabajo revisado previamente, se procede a graficar el pulso de voltaje, la corriente de descarga y el voltaje de salida para los valores de inductancia de 1[mH], 2[mH] y 5[mH].

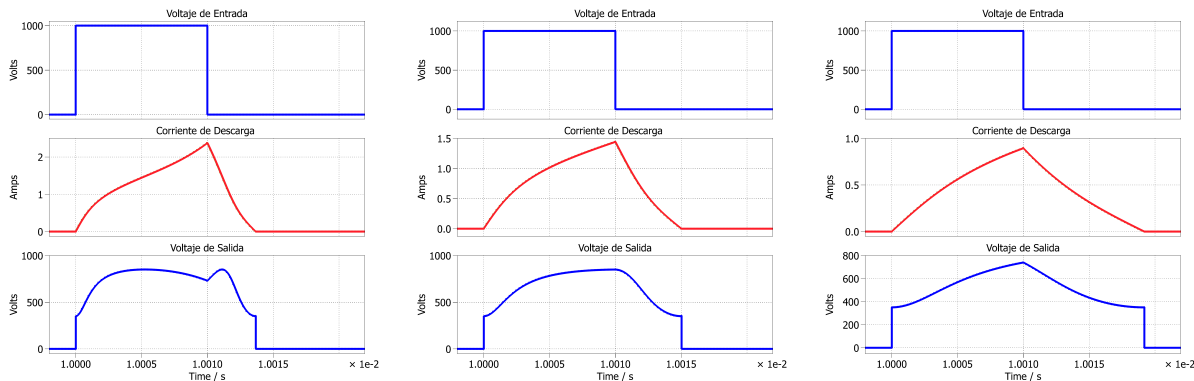


Figura 3.10: Ciclo de trabajo de 100[μ s] con inductancias de: a) 1[mH]. b) 2[mH]. c) 5[mH].

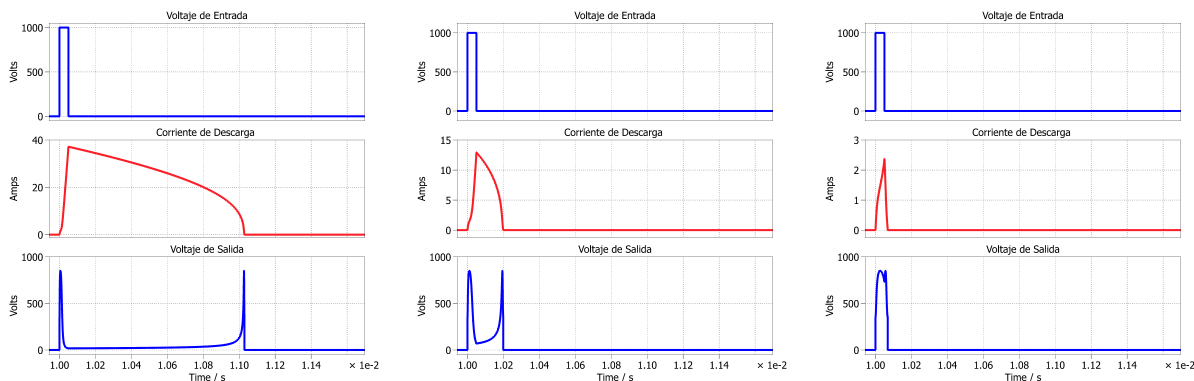


Figura 3.11: Ciclo de trabajo de 500[μ s] con inductancias de: a) 1[mH]. b) 2[mH]. c) 5[mH].

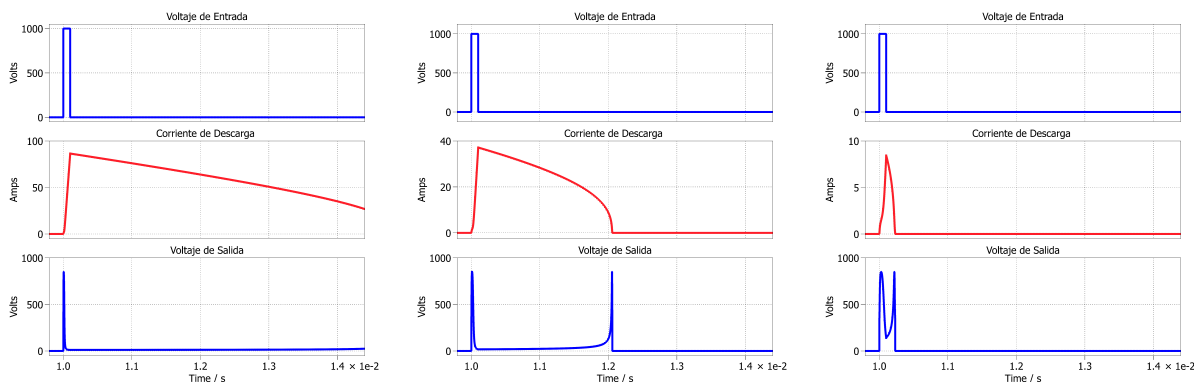


Figura 3.12: Ciclo de trabajo de 1000[μ s] con inductancias de: a) 1[mH]. b) 2[mH]. c) 5[mH].

En las Figuras 2.10, 2.11 y 2.12 se observan los cambios en las señales previamente indicadas al aumentar, tanto el tiempo en el que el pulso se mantiene en alto, como la inductancia. Todas

estas mediciones confirman que el aumento del ancho de pulso implica más tiempo para que la corriente aumente y por lo tanto se alcanzan valores máximos de corriente más altos en cada caso. Más interesante para este análisis es notar como el valor de la inductancia limita tanto las corrientes máximas como el tiempo que la corriente de descarga se demora en alcanzar sus valores máximos y de la misma forma el tiempo que le toma en volver a su mínimo. Se recuerda que el tiempo que la corriente de descarga demora en pasar de su valor máximo a mínimo lo denominaremos tiempo de descarga, el cuál es importante puesto que limitará la frecuencia de los pulsos de voltaje de entrada.

Se observa que el menor tiempo de descarga para el ancho de pulso de $100[\mu\text{s}]$ se obtiene con $1[\text{mH}]$, a diferencia de los casos de anchos de $500[\mu\text{s}]$ y $1000[\mu\text{s}]$, en los cuales el menor tiempo de descarga se obtiene con una inductancia de $5[\text{mH}]$, lo que implica que el menor tiempo de descarga va cambiando entre distintas inductancias a medida que aumenta el ancho del pulso de entrada. Se realizará un mayor análisis de los tiempos de descarga en la siguiente sección.

Por último, como es esperado, el valor de corriente de descarga máxima siempre es más bajo para inductancias mayores, este valor es importante puesto que debe ser capaz de adaptarse para los límites operacionales de los circuitos en los que se conecte la carga modelada.

3.2.3. Análisis Paramétrico de Sensibilidad

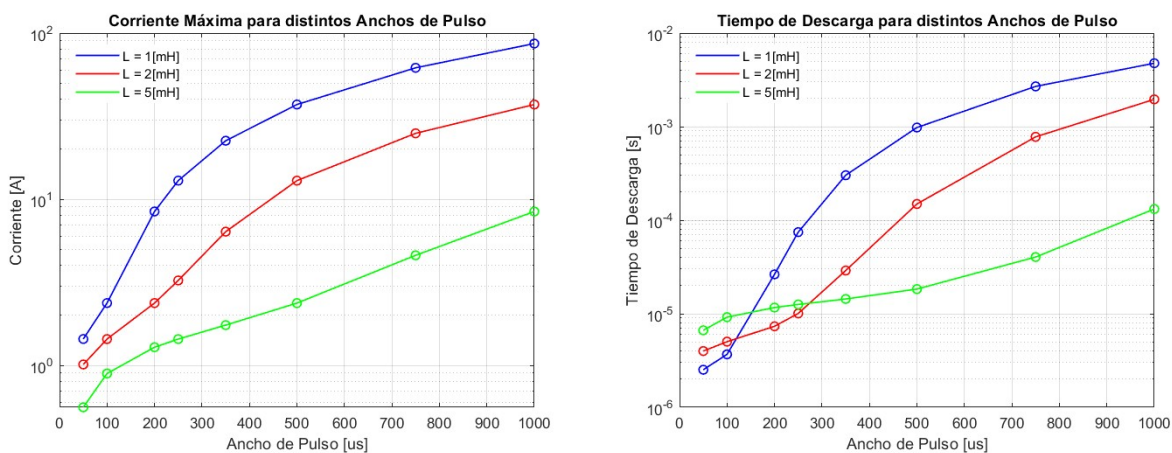


Figura 3.13: a) Corriente Máxima para distintos anchos de pulso. b) Tiempo de Descarga para distintos anchos de pulso.

Debido a la importancia de los valores de corriente máxima y tiempo de descarga descritos anteriormente y a la necesidad de mayor análisis de este último se proceden a realizar mediciones para más anchos de pulso, específicamente $50, 100, 200, 250, 350, 500, 750$ y $1000[\mu\text{s}]$, los resultados correspondientes se encuentran graficados en Matlab en la Figura 3.13.

Para el caso de la figura a) se confirma la tendencia previamente descrita al afirmar que para todos los casos, mientras mayor sea la inductancia, menor será la corriente máxima. Notar que esta diferencia se acentúa a medida que se tienen anchos de pulsos más grandes.

Para el caso de la figura b), gracias a la mayor cantidad de anchos de pulso medidos se observa que a medida que estos aumentan, la variación en el tiempo de descarga tiene la misma tendencia para cada inductancia, con la diferencia de que mientras más grande la inductancia, más lenta es la variación de dicha tendencia, lo que implica que si se miden anchos de pulso mayores, para la inductancia de $5[\text{mH}]$, se podría apreciar el mismo aumento rápido en el tiempo de descarga y

posterior desaceleración que se observa para 1[mH] y 2[mH].

3.3. Resumen de Resultados

A partir de la simulación del circuito de generación de plasma mediante tablas, se logró modelar adecuadamente el comportamiento no lineal de la relación Voltaje-Corriente observada en la Figura 1.2, utilizando la función $V(I)$ construida desde la aplicación de los datos originales como frecuencias y magnitudes a un Diagrama de Bode. Esta función permitió replicar todas las distintas zonas de descarga del plasma, aunque en el caso particular de la simulación de PLECS, se observan solo las correspondientes a luminosa normal, anormal y de arco, según el nivel de corriente entregado al sistema.

Se debe notar que a diferencia de la curva de la Figura 1.2, la curva de la función $V(I)$ no termina su zona de arco una vez alcanzados los 10[A] o más, sino que cuándo se alcanzan valores sobre los 30[A]. Esto se debe a que durante la modelación se tomó la decisión de priorizar el máximo de voltaje en 850[V], valor que no se podría haber alcanzado si la zona de arco terminara en los 10[A].

Durante el análisis por etapas, se identificaron claramente tres fases de funcionamiento:

- Etapa de carga: el sistema comienza directamente en la zona de descarga luminosa normal debido al rápido aumento de corriente, omitiendo las zonas de Townsend y luminosa subnormal.
- Etapa de trabajo: el plasma opera en la zona de arco, alcanzando un voltaje máximo de 850[V], luego disminuye gradualmente hasta llegar por debajo de los 20[V] una vez alcanzada la corriente de 30[A].
- Etapa de descarga: al apagarse el pulso de entrada, la corriente disminuye gradualmente, replicando la curva Voltaje-Corriente en dirección inversa hasta apagarse el sistema.

El gráfico XY generado por PLECS en la Figura 3.7 y en la Figura 3.8, evidencia una alta fidelidad con respecto al modelo de Matlab y la curva de referencia, aunque no abarca las regiones de baja corriente y el voltaje en la zona de arco disminuye de manera menos pronunciada. Además, el sistema demostró un comportamiento coherente al aplicar distintos anchos de pulso y valores de inductancia, mostrando tendencias esperadas en la corriente peak y sus delta, lo que valida la efectividad del método de modelación por funciones para controlar el plasma en distintas condiciones operativas. Además entre distintos valores de inductancia, se mantiene la misma tendencia en la que el tiempo de descarga aumenta a medida que aumenta el ancho de pulso y por ende la corriente máxima.

En conclusión, los resultados muestran que el método de modelación de la carga no lineal por funciones permite replicar el comportamiento no lineal del sistema de descarga de plasma. La precisión del modelo es especialmente destacable en las regiones de corriente media y alta, hasta alcanzar el peak de voltaje al rededor de 1[A], posterior a eso presenta una diferencia en la velocidad en la que disminuye el voltaje a medida que la corriente continúa aumentando. Las limitaciones en las zonas de baja corriente presentes en el modelo del capítulo anterior se mantienen presentes y se deben a la falta de representación de las primeras fases de la descarga

(Townsend y Descarga Subnormal) al iniciar la simulación inmediatamente en el orden de los miliamperes.

Capítulo 4

Discusión y Conclusiones

4.1. Comparación de Modelos

Una vez terminado el análisis del modelo de la carga no lineal generado a partir de tablas y de funciones, se procede a comparar los resultados de ambos modelos con el objetivo de decidir cuál de los dos es el modelo que más se apega a la realidad y por lo tanto aquel que se recomienda a utilizar en las investigaciones a futuro.

Es fundamental comparar el apego de la curva voltaje-corriente generada por cada modelo a aquella estudiada originalmente (Figura 1.2), con un especial interés en las zonas de alta corriente, en particular en la zona de arco. Además, nos interesa analizar la reacción de la carga no lineal, correspondiente a cada modelo, a los cambios de los parámetros del sistema empleado, es decir el ancho de pulso utilizado para el voltaje de entrada y el valor de la inductancia que provee la corriente de descarga en conjunto con las corrientes máximas y los tiempos de descarga que implicarán. Finalmente se debe revisar el análisis matemático que requieren ambos modelos a la hora de implementar las cargas no lineales.

Se debe notar que ambas cargas modeladas fueron sometidas al mismo sistema y posteriormente a las mismas mediciones de sensibilidad, facilitando de esta manera la comparación de los datos obtenidos .

4.1.1. Comparación de Curvas Voltaje-Corriente

En la Figura 4.1, obtenida al simular ambos modelos en Matlab, se observan las curvas de Voltaje-Corriente generadas por cada modelo descrito en capítulos anteriores, en rojo se encuentra aquella generada por la carga no lineal en el modelo de tablas y en azul se encuentra aquella generada en el modelo de la función $V(I)$.

Al realizar el análisis, se nota un aumento inicial suave de 0 a 600[V] para el caso de la función, el cuál se asemeja más a la curva en la que nos basamos originalmente. Las diferencias vuelven a ser evidentes cuándo se entra en la zona de descarga luminosa subnormal en la que la curva de función demora más que aquella de la tabla en disminuir de 600[V] a 350[V], en este caso la curva correspondiente a la tabla es la que se encuentra más cercana al comportamiento que se buscaba modelar.

En la zona de descarga luminosa anormal, es decir aquella en la que el voltaje aumenta de 350[V]

a 850[V] se encuentra una diferencia mínima entre ambas curvas, sin embargo la mayor diferencia se encuentra en la zona de arco, dónde la curva de tabla pasa de 850[V] a 20[V] cuándo la corriente aumenta de 1[A] a 10[A] y la curva de función pasa entre los mismos voltajes pero cuándo la corriente aumenta de 1[A] a 30[A], en este caso la tabla es aquella que mantiene menor desviación de la curva original.

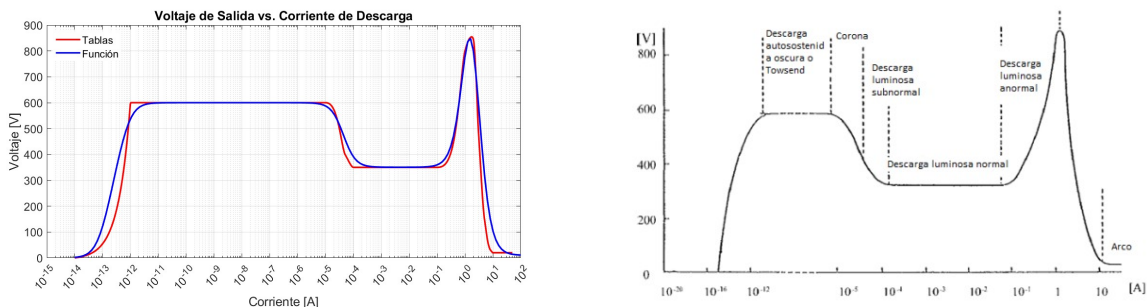


Figura 4.1: a) Comparación Curvas Voltaje-Corriente de modelos b) Curva de Referencia

4.2. Comparación de la Sensibilidad de la Carga

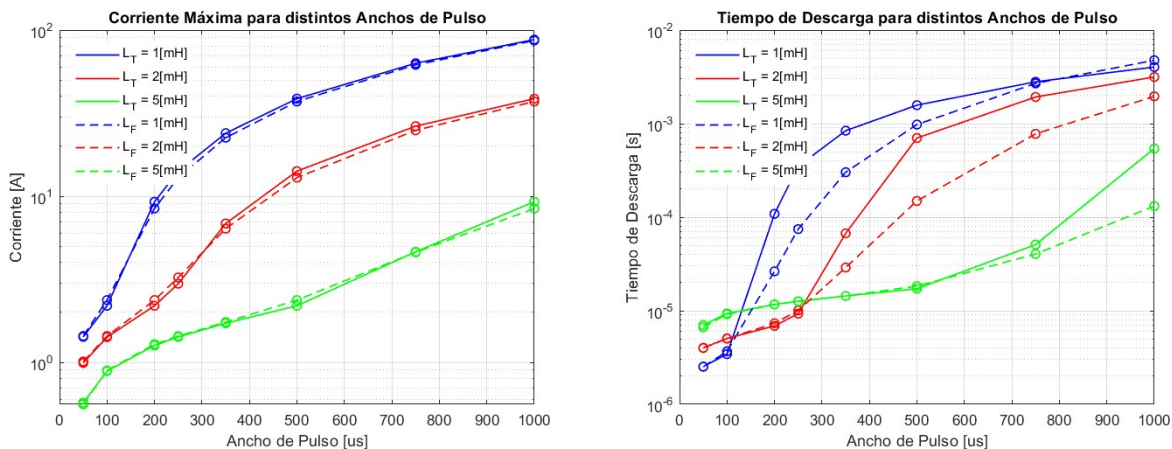


Figura 4.2: Comparación paramétrica de distintos anchos de pulso para: a) Corriente Máxima b) Tiempo de Descarga

Con las mediciones realizadas en los análisis de sensibilidad de los capítulos 2 y 3 se generaron los gráficos de la Figura 4.2, dónde los datos representados por las líneas punteadas corresponden a aquellos obtenidos con la carga no lineal modelada a través de la función V(I) y aquellos representados por las líneas continuas corresponden a los obtenidos con la carga modelada a través de la tabla. Además la Tabla ?? presenta los valores de corriente máxima y tiempo de descarga exactos, de cada inductancia utilizada, para cada ancho de pulso medido.

En la figura a) se observa que la corriente máxima para los distintos anchos de pulso es sumamente similar entre ambos modelos. Por otro lado en la figura b) se nota inmediatamente la diferencia en los valores de los tiempos de descarga siendo, en casi todos los casos, menores

aquellos correspondientes a la carga modelada por la función, el caso en el que no se cumple lo anterior corresponde al representado en la Figura 4.3 usando una inductancia de 1[mH] y un ciclo de trabajo de 1000[μ s].

Esto se debe a la diferencia entre las curvas voltaje-corriente descritas anteriormente, por ejemplo, en el caso de la inductancia de 1[mH] y ciclo de trabajo de 1000[μ s], ambos modelos alcanzan valores de corriente máxima de al rededor de los 86.5[A], por lo que circulan por todas las zonas de descarga, pero la carga correspondiente a la modelada por la función, una vez apagada la fuente de voltaje de entrada, pasa por las zonas de descarga de forma significativamente más lenta, es decir, se demora más en pasar desde el voltaje mínimo de la zona de arco al máximo que le corresponde, debido a que comienza a cambiar su valor de voltaje de salida cuándo aún la carga modelada por la tabla no lo ha hecho.

Lo mismo ocurre para los casos en los que el modelo de la función tiene un tiempo de descarga menor que el modelo de la tabla. Puesto que una vez apagado el voltaje de entrada, la corriente de descarga comienza a disminuir según lo modelado por la curva voltaje corriente, lo que hace que la carga correspondiente a la función V(I) pase por menos cambios de voltaje que la carga modelada por la tabla, resultando en que esta última, al pasar por más valores de voltaje, toma más tiempo en descargarse.

Vale la pena notar que, como lo muestra la Tabla 4.1, las diferencias de tiempo de descarga son sumamente pequeñas, donde el error para cada parámetro se calcula como el valor obtenido del modelo de tabla menos el valor obtenido del modelo de función, se usa el modelo de tabla como base para calcular el error puesto que es aquel que más se asemeja a la curva de referencia en las zonas de corriente que fueron simuladas.

En resumen el tiempo que le toma a ambas cargas en llegar a la corriente máxima es siempre el mismo y es controlado por el ancho de pulso del voltaje de entrada, por lo que tanto la pequeña diferencia entre corrientes máximas como la diferencia más significativa en tiempos de descarga existente entre ambos modelos se debe a que las curvas de voltaje-corriente no son iguales. Esta curva dicta el cambio del voltaje de salida de la carga según la corriente de descarga que esta recibe y, al no verse controlada por el voltaje de entrada, se ve libre para variar su valor a la velocidad que dicta la relación modelada en la curva.

Ancho de Pulso [us]	L1 = 1[mH]		L2 = 2[mH]		L5 = 5[mH]	
	Diferencia de Corriente	Diferencia de T. de Descarga	Diferencia de Corriente	Diferencia de T. de Descarga	Diferencia de Corriente	Diferencia de T. de Descarga
50	-0.0166	1e-08	-0.02029	3e-08	0.012612	3.8e-07
100	-0.18043	-2.4e-07	-0.02157	3e-08	-0.007297	1.7e-07
200	0.82556	8.225e-05	-0.18041	-4.6e-07	-0.02126	5e-08
250	1.2052	0.00027634	-0.26996	-7.7e-07	-0.01681	8e-08
350	1.4598	0.00053849	0.47146	3.825e-05	-0.02788	1e-08
500	1.4932	0.00059699	1.2174	0.00055262	-0.18038	-1.16e-06
750	1.3555	0.00010761	1.4825	0.0011489	0.02982	1.057e-05
1000	1.1541	-0.00073759	1.4955	0.001194	0.82964	0.00040995

Tabla 4.1: Errores de corriente máxima y tiempo de descarga para cada inductancia según el ancho de pulso de entrada.

4.2.1. Comparación de Análisis Matemático

Al momento de implementar la carga no lineal proveniente de este proyecto, es posible que debido a las diferencias existentes entre diversos generadores de plasma tales como el gas a utilizar o la presión en la que se trabajará, es posible que la curva de relación existente entre la corriente de descarga y el voltaje de salida de la generación de plasma sea distinta a la utilizada en el desarrollo del presente estudio, por lo cuál puede ser necesario ajustar el modelo. Es por esto que es importante comparar el análisis matemático necesario para el ajuste y la correcta

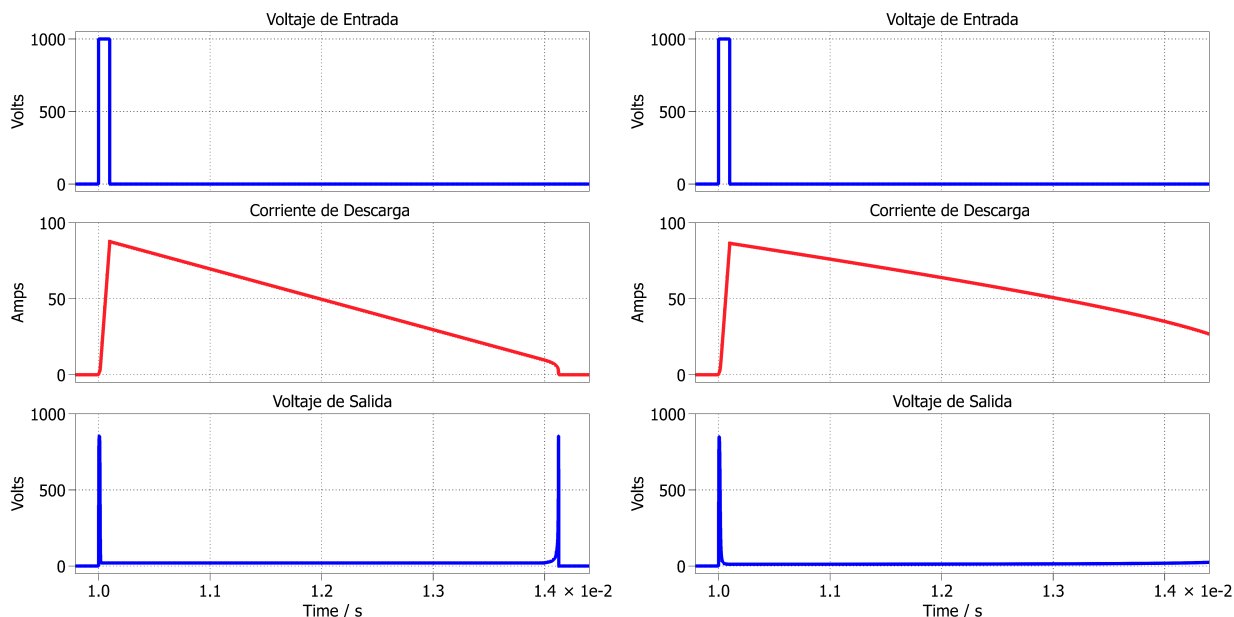


Figura 4.3: Gráficos para ancho de pulso de 1000[us] y inductancia de 1[mH] para modelos generados por a) Tabla b) Función

implementación de la carga.

Si se debiera ajustar la carga modelada por la tabla, lo necesario a ocurrir es re ingresar los valores de interés para la corriente de descarga y el voltaje de salida en los cuáles la tendencia de la curva se ve alterada al código de Matlab utilizado para la generación de la tabla, una vez ingresados esos datos, se debe correr el código y este entregará los vectores a ingresar al bloque de Lookup Table de una dimensión del archivo de PLECS, siendo este un proceso simple y rápido de realizar.

Si se debiera ajustar la carga modelada por la función $V(I)$, lo necesario a ocurrir es ajustar todos los valores para los ceros, polos y sus respectivos ordenes de forma iterativa hasta que la curva obtenida sea satisfactoria. Esto lo hace un proceso largo y tedioso que no necesariamente asegura un funcionamiento correcto del modelo final.

4.3. Conclusiones

Durante el transcurso de este proyecto, se procede a estudiar tanto el fenómeno físico como el funcionamiento de la generación de plasma, con el motivo de modelar una carga no lineal capaz de ser implementada en el entorno de simulación de PLECS y que represente correctamente la relación no lineal ocurrente entre la corriente de descarga y el voltaje de salida que ocurre durante el transcurso del fenómeno. Se pretende que futuras investigaciones sean capaces de usar dicha carga en sus propios estudios con el fin de facilitar el estudio y uso de un generador de plasma en otros sistemas. La carga es luego modelada de dos formas distintas. La primera a partir de una tabla generada de la recreación de la relación corriente-voltaje utilizando técnicas de interpolación en Matlab. La segunda a partir de la recreación de una fórmula matemática $V(I)$ capaz de entregar

el voltaje de salida en base a la corriente de entrada.

Se estudió la generación de ambos modelos, su funcionamiento y su reacción o sensibilidad a los cambios de ancho de pulso del voltaje de entrada y de la inductancia a la que se vieron sometidos. Finalmente ambas cargas fueron comparadas en base a las diferencias entre sus curvas voltaje-corriente, sus sensibilidades a los cambios y al análisis matemático requerido para su implementación.

Al analizar las diferencias entre las curvas de relación de corriente-voltaje de ambos modelos, se observa que no poseen tantas diferencias, sus valores son similares entre sí para las distintas zonas de descarga, sobretodo si se considera el valor inicial y final de cada zona. A pesar de esto, al estudiar la sensibilidad de la carga a los cambios en el ciclo de trabajo del voltaje de entrada y de la inductancia a la que se conecta, se nota que cada modelo reacciona de forma distinta, si bien ambos tienen las mismas tendencias de cambio, poseen valores de salida distintos en cada medición, en general mientras el ancho de pulso no supere los $700[\mu s]$, el tiempo de descarga para el modelo de la función $V(I)$ será menor a aquel del modelo proveniente de la tabla. Se debe recordar que el tiempo de descarga limitará la frecuencia de los pulsos de corriente del voltaje de entrada, por lo que puede ser deseable un menor tiempo de descarga. Sin embargo, cuando se considera el trabajo requerido para la implementación del modelo y su ajuste en caso de ser necesario, se nota la facilidad de implementación del modelo de tablas por sobre la del modelo de funciones.

Por lo que, considerando que las diferencias en tiempos de descarga, notables en la Tabla 4.1, no son de grandes ordenes de magnitud sino que son diferencias de tiempo de baja magnitud y, además, teniendo en cuenta que la finalidad de la modelación de esta carga no lineal es su implementación en otros estudios, se concluye que el modelo de carga no lineal que se recomienda utilizar a futuro es el modelo de carga no lineal utilizando la tabla propuesta en el capítulo 2.

Apéndice A

Código Suplementario

A.1. Código Suplementario para Modelación de carga no lineal Utilizando Tablas

A.1.1. Código de Generación de Tabla y Extracción de Vectores

```
% Datos de curva de referencia
I = [1e-14, 1e-12, 1e-6, 1e-5, 0.5e-4, 1e-4, 1e-3, 1e-2, 1e-1, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 8, 9, 10];
V = [0, 600, 600, 600, 400, 350, 350, 350, 350, 800, 850, 845, 700, 500, 150, 50, 32, 25, 20, 15];

% Vector de Corriente
I_fine = logspace(log10(min(I)), log10(max(I)), 1000);
V_fine = zeros(size(I_fine));

% Segmento 1:
idx_seg1 = I_fine <= 1e-12;
V_fine(idx_seg1) = interp1(I(1:2), V(1:2), I_fine(idx_seg1), 'pchip');

% Segmento 2:
idx_seg2 = I_fine > 1e-12;
V_fine(idx_seg2) = makima(I, V, I_fine(idx_seg2));

% Seleccionar Output
num_points = 1000;
I_selected = logspace(log10(min(I)), log10(max(I)), num_points);
V_selected = zeros(size(I_selected));

idx_seg1_sel = I_selected <= 1e-12;
V_selected(idx_seg1_sel) = interp1(I(1:2), V(1:2), I_selected(idx_seg1_sel), 'linear');

idx_seg2_sel = I_selected > 1e-12;
V_selected(idx_seg2_sel) = makima(I, V, I_selected(idx_seg2_sel));

% Imprimir I_selected
fprintf('I_selected = [');
```

```
fprintf('%g ', I_selected);
fprintf(']\n');

% Imprimir V_selected
fprintf('V_selected = ');
fprintf('%g ', V_selected);
fprintf(']\n');

% Plot
figure;
semilogx(I_fine, V_fine, 'b-', 'LineWidth', 2);
xlim([1e-15 1e2]); % Limita el eje x
yscale("linear");
grid on;
xlabel('Current [A]');
ylabel('Voltage [V]');
title('Voltage vs. Current');

% Modificaciones para facilidad de lectura eje x
xtick_vals = 10.^(-16:2);
xticks(xtick_vals);
set(gca, 'FontSize', 14); % Aumenta tamaño de la fuente
set(gcf, 'Position', [100 100 1000 500]); % Aumenta ancho de la figura
```

A.2. Código Suplementario para Modelación de carga no lineal Utilizando Funciones

A.2.1. Código de Generación de Función

```
% Ceros
z1 = 10^(-13.1);
z2 = 10^(-4.2914);
z3 = 10^(0);
z4 = 10^(0.5);

% Polos
p1 = 10^(-12.1);
p2 = 10^(-4.43);
p3 = 10^(0.195);

% Orden de Ceros
a1 = 0.2;
a2 = a1*3;
a3 = 3.86;
a4 = 2.84;

% Orden de Polos
```

```

b1 = a1;
b2 = a2;
b3 = a3+a4;

% Ganancia
k = 1/((z1^(a1))*(z2^(a2))*(z3^(a3))*(z4^(a4))/((p1^(b1))*(p2^(b2))*(p3^(b3))));

% Dominio de t
t = logspace(-14, 2, 1000);
% Numerador y Denominador
num = (t.^2 + z1^2).^^(a1/2).* (t.^2+z2^2).^^(a2/2).* (t.^2+z3^2).^^(a3/2).* (t.^2+z4^2).^^(a4/2);
den = (t.^2 + p1^2).^^(b1/2).* (t.^2+p2^2).^^(b2/2).* (t.^2+p3^2).^^(b3/2);

% Función
ft = (600/(a1*20))*20*log10(k*num./den);

```

A.2.2. PLECS C-Script Code Declarations

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>

#define I Input(0)
#define V Output(0)

// Logaritmo Base 10
static inline double log10_safe(double x) {
    return log(x) / log(10.0);
}

```

A.2.3. PLECS C-Script Output Function Code

```

// Ceros
double z1 = pow(10.0, -13.1);
double z2 = pow(10.0, -4.2914);
double z3 = pow(10.0, 0);
double z4 = pow(10.0, 0.5);

// Polos
double p1 = pow(10.0, -12.1);
double p2 = pow(10.0, -4.43);
double p3 = pow(10.0, 0.195);

//Ordenes
double a1 = 0.2;
double a2 = a1*3;
double a3 = 3.86;
double a4 = 2.84;

```

```
double b1 = a1;
double b2 = a2;
double b3 = a3+a4;

// Constante k
double k = (pow(p1,b1) * pow(p2,b2) * pow(p3,b3)) /
           (pow(z1,a1) * pow(z2,a2) * pow(z3,a3) * pow(z4,a4));

if (I < 1e-14) {
    V = 0.0; // Evitar división por 0
} else {

    double num = pow(I*I + z1*z1, (a1/2))
                * pow(I*I + z2*z2, (a2/2))
                * pow(I*I + z3*z3, (a3/2))
                * pow(I*I + z4*z4, (a4/2));

    double den = pow(I*I + p1*p1, (b1/2))
                * pow(I*I + p2*p2, (b2/2))
                * pow(I*I + p3*p3, (b3/2));

    double ratio = k * (num / den);

    V = (600/(a1*20)) * 20 * log10_safe(ratio);
}
```

Apéndice B

Tablas e Imágenes Suplementarias

B.1. Ejemplo de Aplicaciones de Plasma

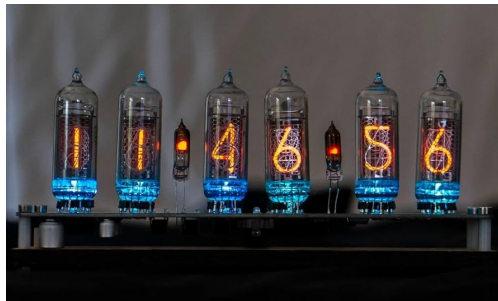


Figura B.1: Tubos Nixie

B.2. Ejemplo de configuraciones para modelar en Matlab/Simulink

The left screenshot shows the 'Block Parameters: Lookup with Linear Point-slope Interpolation' dialog box. It includes the following fields:

- Lookup Table (n-D): Perform n-dimensional interpolated table lookup including index searches. The table is a sampled representation of a function in N variables. Breakpoint sets relate the input values to positions in the table. The first dimension corresponds to the top (or left) input port.
- Table and Breakpoints: Algorithm (dropdown), Data Types (dropdown).
- Number of table dimensions: 1 (dropdown).
- Data specification: Table and breakpoints (dropdown).
- Breakpoints specification: Explicit values (dropdown).
- Table data: Source (Dialog), Value (tanh([-5:5]) <1x11 double>).
- Breakpoints 1: Dialog, [-5:5] <1x11 double>.
- Edit table and breakpoints... (button).
- Buttons: OK, Cancel, Help, Apply.

The right screenshot shows a spreadsheet view of a 1D lookup table. The table has 11 rows and 3 columns. The first column is labeled 'Table' and the second column is labeled 'MATLAB expression and press Enter'. The data is as follows:

Table	MATLAB expression and press Enter	
		1
1	-5	-1.00
2	-4	-1.00
3	-3	-1.00
4	-2	-0.96
5	-1	-0.78
6	0	0
7	1	0.76
8	2	0.96
9	3	1.00
10	4	1.00
11	5	1.00

Figura B.2: Ejemplo de configuración de Lookup Table en Simulink: a) Parametros b) Ejemplo de tabla de 1D.

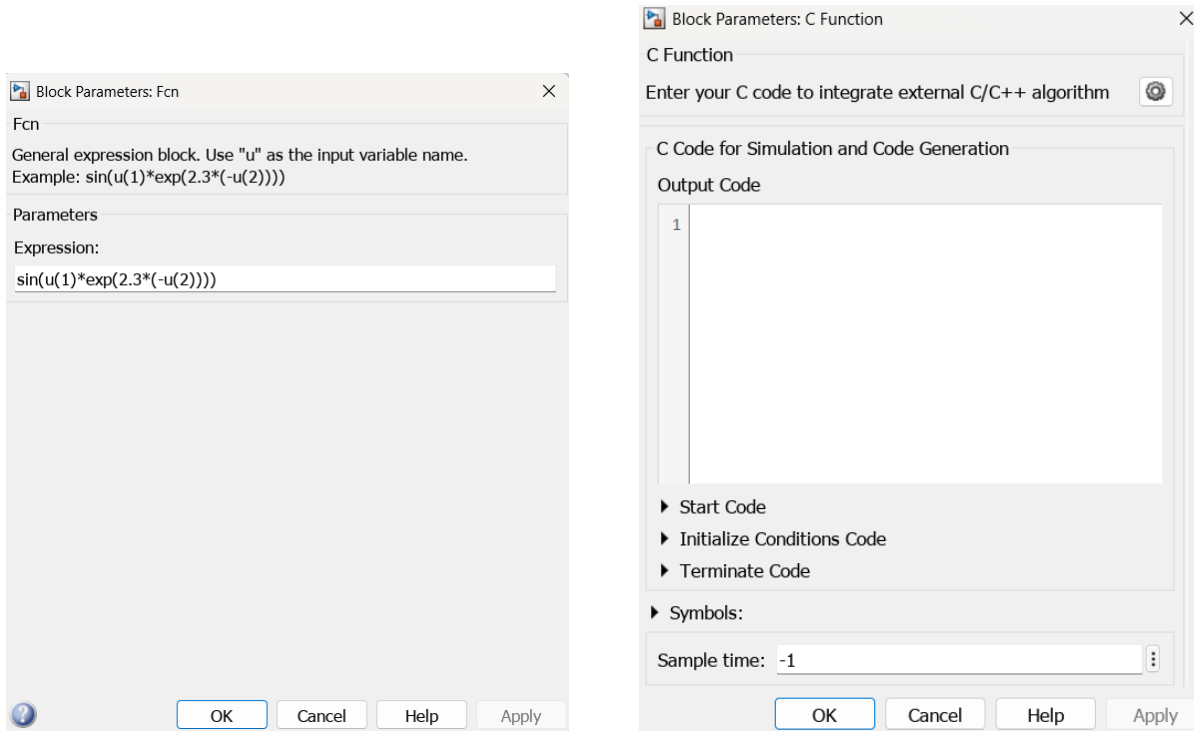


Figura B.3: Ejemplo parámetros de bloques de funciones en Simulink: a) Bloque de Función b) Bloque de Función C.

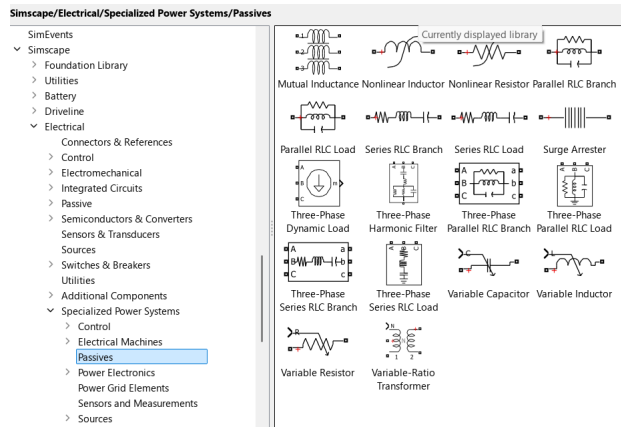


Figura B.4: Componentes de Electrónica de Potencia Especializados de Simulink.

B.3. Ejemplo de configuraciones para modelar en PLECS

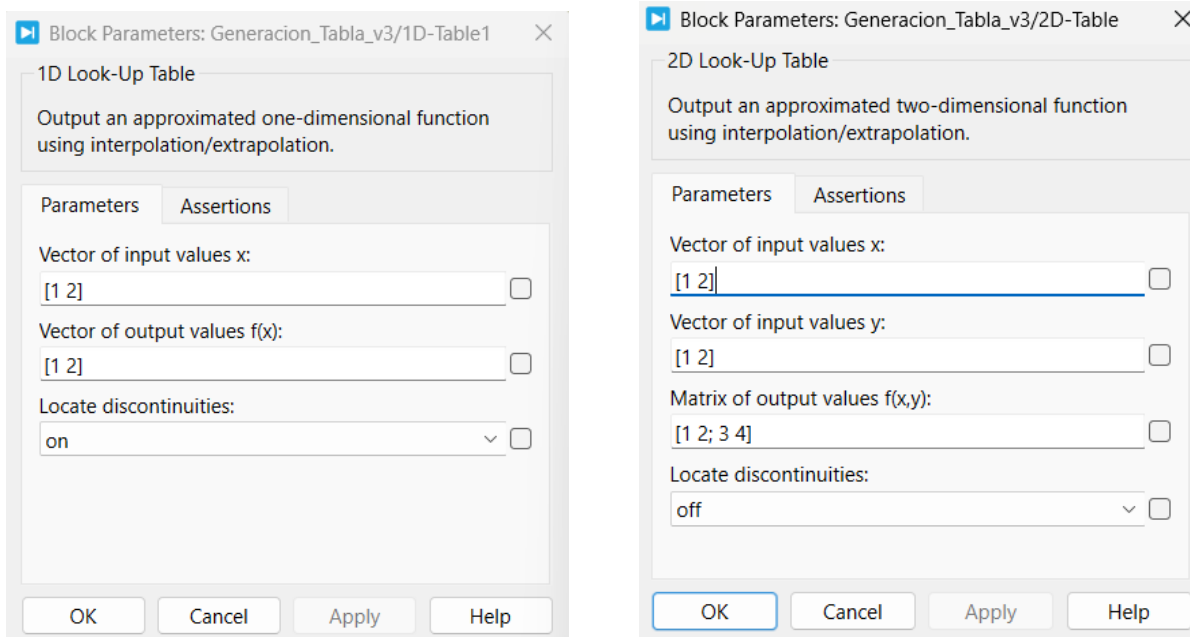


Figura B.5: Ejemplos de parámetros de tablas de: a) 1 Dimensión. b) 2 Dimensiones.

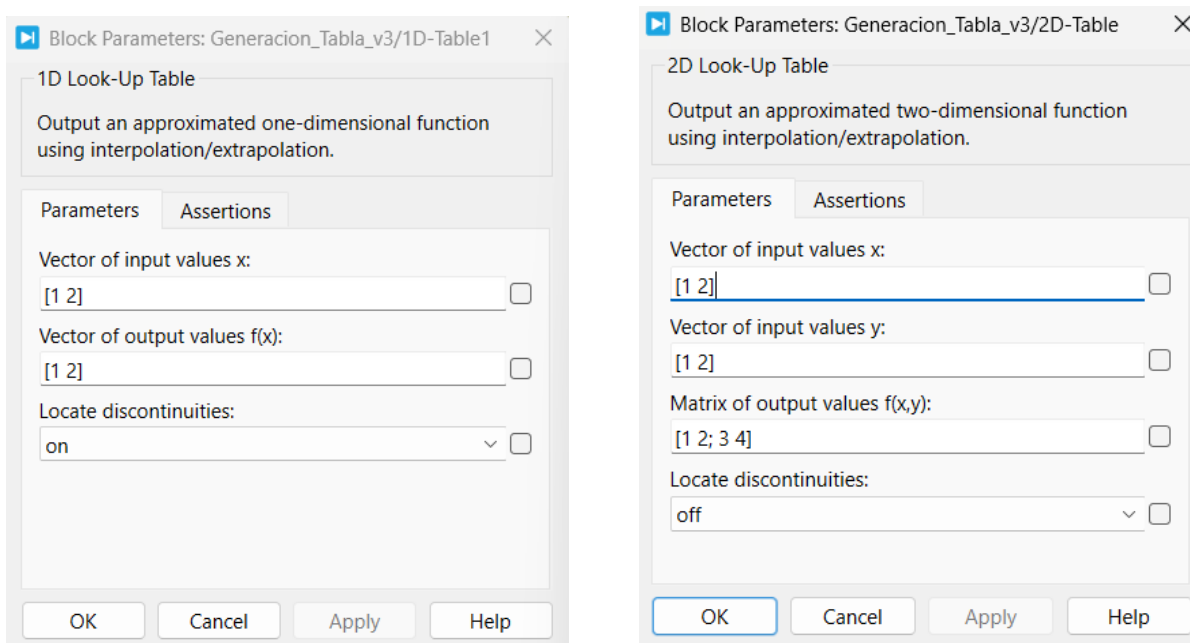


Figura B.6: Ejemplos de parámetros de bloques de funciones: a) Bloque Fcn. b) Bloque C-Script.

- > Control
- ▼ Electrical
 - > Connectivity
 - > Sources
 - > Meters
 - > Passive Components
 - > Power Semiconductors
 - > Power Modules
 - > Switches
 - > Transformers
 - > Machines
 - > Converters
 - > Nanostep
 - > Electronics
 - > Model Settings

Figura B.7: Listado de opciones de componentes eléctricos de PLECS.

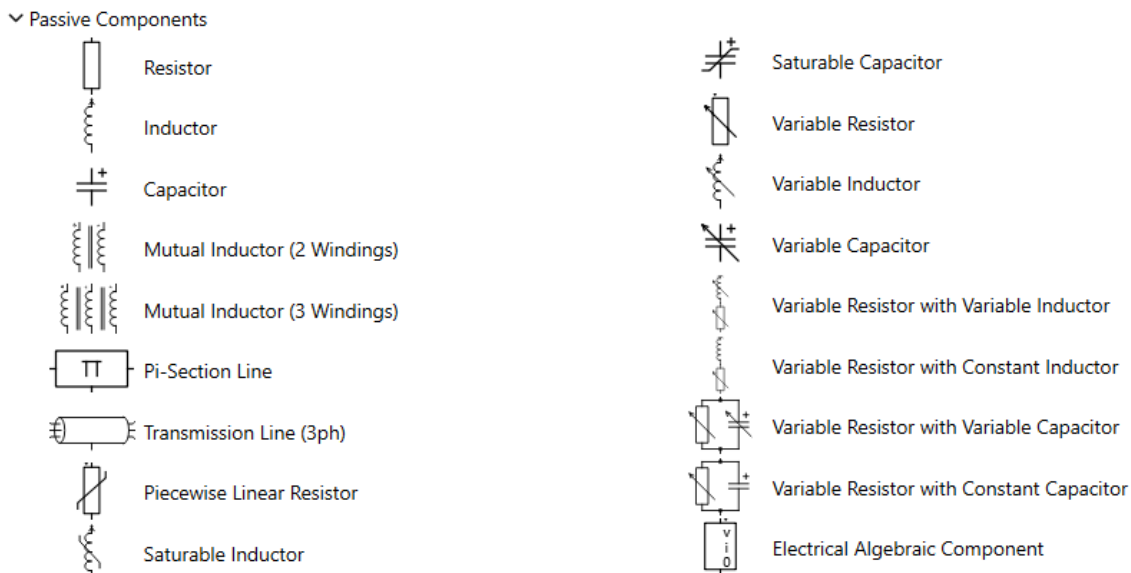


Figura B.8: Ejemplos de bloques de componentes pasivas de PLECS.

Bibliografía

- [1] F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and controlled fusion*. Springer International Publishing, 1984.
- [2] A. Kumar, D. Grant, S. Alancherry, A. Al-jumaili, K. Bazaka, and M. Jacob, *Plasma Polymerization: Electronics and Biomedical Application*, 10 2017, pp. 593–657.
- [3] I. Htita, “Nonlinear loads modelling and harmonics analysis: A review,” *Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 17, no. 5, pp. 429–443, 2024. [Online]. Available: <https://www.eurekaselect.com/article/133896>
- [4] A. Piel, *Plasma Physics. An introduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas*. Springer International, 2017.
- [5] V. H. Verónica, “Análisis espectroscópico y caracterización de un plasma de resplandor,” Ph.D. dissertation, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008. [Online]. Available: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/428737>
- [6] P. Singh, A. Majumder, A. K. Pulhani, G. Sridhar, and N. Maiti, “Methods of high-density plasma generation,” in *2020 International Conference on Convergence to Digital World - Quo Vadis (ICCDW)*, 2020.
- [7] S. Diaz, J. Guzman, C. Tenreiro, R. Ramirez, and O. Hernandez, “A low-cost cold plasma generator circuits designed for laboratory applications,” in *2022 IEEE 13th Latin America Symposium on Circuits and System (LASCAS)*, 2022, pp. 01–04.
- [8] C. Bendali, A. Halis, and K. E. Hemsas, “Study of a low power arc plasma generator,” in *2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC)*, 2024, pp. 1–6.
- [9] C. Kuldip and N. Lakshminarasamma, “An energy-based analysis of high voltage resonant-based pulsed low power converter for water treatment application,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 49 429–49 448, 2024.
- [10] S. Rustemli, M. A. Satici, G. Şahin, and W. van Sark, “Investigation of harmonics analysis power system due to non-linear loads on the electrical energy quality results,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4704–4732, 2023. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723015585>
- [11] The MathWorks, Inc., *Simulink® Getting Started Guide*, The MathWorks, Inc., 1 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098, 2025, accessed: 2025-05-30. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com>

-
- [12] Plexim GmbH, *PLECS User Manual*, Plexim GmbH, Technoparkstrasse 1, 8005 Zurich, Switzerland, 2024, accessed: 2025-05-30. [Online]. Available: <http://www.plexim.com>