



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS DE TRANSPORTE
ELECTRÓNICO DE GASES ALTERNOS AL SF₆ PARA
SU APLICACIÓN COMO AISLAMIENTO EN EQUIPO
ELÉCTRICO DE ALTA TENSIÓN.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

NOÉ RAFAEL COLORADO SÓSOL

DIRECTORES DE TESIS: DR. JAIME DE URQUIJO CARMONA

DR. J JESÚS ESCOBEDO ALATORRE

SINODALES:

DR. CARLOS G. AZCÁRRAGA RAMOS

DR. PEDRO A. MARQUEZ AGUILAR

DR. JOSÉ A. MARBÁN SALGADO

CUERNAVACA, MORELOS

MAYO, 2018

Cuernavaca, Morelos, a 19 de abril de 2018.

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
COORDINADOR DE POSGRADO
EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada “Estudio de los fenómenos de transporte electrónico de gases alternos al SF₆ para su aplicación como aislamiento en equipo eléctrico de alta tensión” que presenta el alumno **NOÉ RAFAEL COLORADO SÓSOL**, para obtener el título de **MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

| NOMBRE | DICTAMEN | FIRMA |
|------------------------------------|----------|---|
| Dr. Pedro Antonio Márquez Aguilar | Aprobado |  |
| Dr. José Antonio Marban Salgado | Aprobado | Jose Antonio MS. |
| Dr. Carlos Gustavo Azcárraga Ramos | Aprobado |  |
| Dr. Jaime de Urquijo Carmona | Aprobado |  |
| Dr. J Jesús Escobedo Alatorre | Aprobado |  |

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTION DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Instituto de
Investigación en
Ciencias
Básicas y
Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



ASUNTO: APROBACIÓN DE TESIS

Cuernavaca, Morelos, 19 de abril de 2018

**NOÉ RAFAEL COLORADO SÓSOL
PRESENTE**

Por este conducto le notifico que su tesis de Maestría titulada, “Estudio de los fenómenos de transporte electrónico de gases alternos al SF6 para su aplicación como aislamiento en equipo eléctrico de alta tensión”

Fue aprobada en su totalidad por el jurado revisor y examinador integrado por los ciudadanos:

| NOMBRE | FIRMA |
|------------------------------------|-------------------|
| Dr. Pedro Antonio Márquez Aguilar | |
| Dr. José Antonio Marban Salgado | Jose Antonio M.S. |
| Dr. Carlos Gustavo Azcárraga Ramos | |
| Dr. Jaime de Urquijo Carmona | |
| Dr. J Jesús Escobedo Alatorre | |

Por consiguiente, se autoriza a editar la presentación definitiva de su trabajo de investigación para culminar en la defensa oral del mismo.

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
POR UNA HUMANIDAD CULTA
Una universidad de excelencia

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
COORDINADOR DE POSGRADO EN INGENIERÍA
Y CIENCIAS APLICADAS

JAHP*RSU/nmc

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa. Cuernavaca Morelos, México, 62209
Tel. (777) 329 70 00, ext. 6208 / raquel.sotelo@uaem.mx

**UA
EM**

RECTORÍA
2017-2023

Una universidad de excelencia

RESUMEN

El hexafluoruro de azufre (SF_6) es el dieléctrico gaseoso preferido por la industria eléctrica, utilizado como aislamiento y medio de extinción de arco, debido a su electronegatividad, estabilidad térmica y química y capacidad de regeneración molecular. Sin embargo, el hexafluoruro es un gas de efecto invernadero, identificado como el de mayor potencial de calentamiento global (aproximadamente 24,000 veces el potencial del CO_2), de alto impacto para la atmósfera debido a su alta absorción de radiación infrarroja y un tiempo de vida en la atmósfera de hasta 3,200 años.

Además, cuando el SF_6 es disociado, los productos de descomposición son altamente tóxicos y corrosivos, representando un alto riesgo para la salud de las personas en contacto con este gas. La acumulación de dichos subproductos, modifican las propiedades dieléctricas del gas, afectando la operación y eficiencia de los equipos eléctricos de alta tensión.

El incremento en la demanda del SF_6 y la necesidad de contar con equipos más eficientes, hacen del hexafluoruro de azufre un gas potencialmente dañino para el medio ambiente y la humanidad. Por lo que, en las últimas décadas, diversos grupos de investigación en el mundo han estudiado nuevos gases con la finalidad de encontrar un sustituto del hexafluoruro de azufre como medio aislante y de bajo impacto ambiental.

La medición de los parámetros de transporte eléctrico e iónico de gases en el régimen de Townsend, es una de las técnicas utilizadas para la obtención de la ionización efectiva nula a un determinado valor de campo eléctrico, que permita prever su comportamiento como medio aislante.

En este trabajo de tesis se presentan los trabajos experimentales y los resultados de la medición de la evolución temporal de la corriente electrónica e iónica en dos mezclas ternarias propuestas para su análisis como posibles sustitutos del hexafluoruro de azufre.

La medición de la corriente de descarga, es acondicionada para su análisis y para facilitar la identificación de las etapas de su evolución temporal, que permitan identificar las componentes electrónicas e iónicas.

Se presentan los resultados obtenidos con la técnica pulsada de Townsend en el análisis de las mezclas $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$ y $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ a diferentes concentraciones de los gases, en un intervalo de 250-500 Td del campo eléctrico normalizado a la densidad de la mezcla (E/N) y presiones de 0.5 a 5 Torr, mostrando la posibilidad para ambas mezclas de sustituir al hexafluoruro de azufre en su aplicación como medio aislante en equipo eléctrico de alta tensión, con base en el valor de campo eléctrico crítico medido.

ABSTRACT

Sulfur hexafluoride (SF_6) is the preferred dielectric gas for the electric industry, used as an electrical insulator and as arc-quenching, due to its electronegativity, thermal stability and chemistry and ability of molecular regeneration. Nevertheless, the hexafluoride is a greenhouse gas, identified with the biggest potential for global warming (approximately 24,000 times than the CO_2), of high impact on the atmosphere due to its high infrared radiation absorption and with a time of life in the atmosphere up to 3,200 years.

Also, when the SF_6 is dissociated, the decomposition products are highly toxic and corrosive, being a high health risk for the people in contact with this gas. The accumulation of such byproducts, modify the dielectric properties of the gas, affecting the operation and efficiency of HV electrical equipment.

The demand of SF_6 and the need for more efficient equipment, make of the sulfur hexafluoride a potentially harmful gas to the environment and humanity. As of the last decades, several research groups around the globe have studied new gases in order to find a substitute for sulfur hexafluoride as an electrical insulator and with low environmental impact.

The measurement of electrical and ionic gas transportation parameters in the Townsend regime is one of the techniques used to obtain the effective ionization null at a certain value of an electric field, which allows foreseeing its behavior as an insulating medium.

In this thesis is presented the theory, the experimental development and the results of the measurement of the time evolution of the electronic current and ionic current of two ternary mixtures proposed for analysis as possible substitutes for sulfur hexafluoride.

The measurement of the discharge current is fitting for its analysis and to facilitate the identification of the stages of its temporal evolution, which allows identifying the electric and ionic components.

Results obtained with the pulsed technique of Townsend in the analysis of the mixes of $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$ y $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ are presented at different concentrations of the gases, in an interval of 250-500 Td of the electric field normalized to the density of the mixture (E/N) and pressures of 0.5 to 5 Torr, showing the possibility for both mixtures to replace sulfur hexafluoride in its application as an insulator in high voltage electrical equipment, based on the critical electric field value measured.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente al Dr. Jaime De Urquijo Carmona su apoyo en la definición del trabajo de investigación, su supervisión, soporte técnico y sus amables consejos que me brindó durante la realización de este trabajo de tesis.

Quiero agradecer al Dr. Carlos Azcárraga Ramos por la amistad que me brinda, su asesoría técnica y consejos durante la realización de este trabajo de tesis y para mi superación profesional.

Agradezco al Dr. J Jesús Escobedo Alatorre su apoyo y consejos durante mis estudios de maestría y durante la realización de este trabajo de tesis.

Extiendo mi agradecimiento al comité revisor de este trabajo de tesis, por sus observaciones y recomendaciones realizadas, que evidentemente contribuyeron a mejorar la calidad de este trabajo.

Agradezco al Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, al M.C. Alberth Pascacio De Los Santos, al Dr. Rolando Nieva Gómez y a la Lic. Leonor Ávila, por el apoyo y el tiempo proporcionado para la realización de mis estudios de maestría.

Agradezco al Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma de Morelos, por haberme proporcionado un espacio de estudio y formación profesional.

Quiero agradecer al Instituto de Ciencias Físicas de la Universidad Autónoma de México por abrir sus puertas y permitirme realizar las actividades de investigación de este trabajo de tesis. Hago patente mi profundo agradecimiento al grupo de trabajo del Laboratorio de Plasma de Baja temperatura, al Dr. Olmo González Magaña por su asesoría, consejos y el tiempo invertido en el desarrollo de este trabajo, a los Ingenieros Guillermo Gerardo Bustos Maya, Armando Bustos Gómez y Héctor Hugo Hinojosa Galván por su apoyo y asistencia técnica.

Agradezco especialmente a mis compañeros y amigos, el Dr. David Ponce Noyola y el M.C. Pedro Alejandro Domínguez Rivera quienes me han apoyado y animado durante mis estudios de maestría.

Este trabajo fue posible gracias al soporte técnico, logístico y económico del Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias, CONACyT, los proyectos CONACyT Ciencia Básica 2400073 y UNAM-PAPIIT IN108417, Instituciones con las que estaré siempre agradecido.

a mi princesa Andrea

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| RESUMEN | i |
| ABSTRACT | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| CONTENIDO | v |
| LISTA DE TABLAS | viii |
| LISTA DE FIGURAS | ix |
| | |
| <i>CAPÍTULO 1 Introducción</i> | |
| 1.1 Aislamientos eléctricos | 1 |
| 1.2 El SF ₆ como aislante eléctrico | 3 |
| 1.3 Propiedades físicas | 4 |
| 1.4 Aplicación | 6 |
| 1.5 Problemática | 6 |
| 1.6 Alcance de la tesis | 10 |
| 1.7 Contribución de la tesis | 10 |
| | |
| <i>CAPÍTULO 2 Revisión del SF₆ y sus alternativas</i> | |
| 2.1 Recientes investigaciones de gases alternos al SF ₆ | 11 |
| 2.2 Sustitutos potenciales al SF ₆ | 16 |
| 2.2.1 Requerimientos | 16 |
| 2.2.2 Comparación de las propiedades del SF ₆ y el CF ₃ I | 17 |
| | |
| <i>CAPÍTULO 3 Fundamentos y conceptos generales</i> | |
| 3.1. Teoría de gases | 25 |
| 3.1.1 Ley de Boyle | 25 |
| 3.1.2 Ley de Gay-Lussac | 26 |
| 3.1.3 Ley de las presiones parciales | 26 |
| 3.1.4 Teoría cinética de los gases | 27 |
| 3.2 Teoría del rompimiento eléctrico en gases | 29 |
| 3.2.1 Ionización | 29 |

CAPÍTULO 3 (Continuación)

| | | |
|-------|--|----|
| 3.2.2 | Procesos de ionización | 30 |
| 3.2.3 | Camino libre medio | 31 |
| 3.2.4 | Sección eficaz | 32 |
| 3.3 | Ruptura eléctrica en gases | 33 |
| 3.3.1 | Rompimiento de Townsend | 33 |
| 3.3.2 | Ruptura en gases electronegativos | 35 |
| 3.3.3 | Ley de Paschen | 36 |
| 3.4 | Parámetros de transporte electrónico | 37 |
| 3.4.1 | Velocidad de deriva (v_e) | 37 |
| 3.4.2 | Movilidad electrónica (μ) | 39 |
| 3.4.3 | Captura electrónica | 39 |
| 3.4.4 | Parámetro E/N | 40 |
| 3.4.5 | Coefficiente de difusión longitudinal (DL) | 40 |
| 3.4.6 | Coefficiente de ionización efectiva (α_e) | 42 |

CAPÍTULO 4 Desarrollo experimental

| | | |
|-------|---|----|
| 4.1 | Técnica Pulsada de Townsend | 43 |
| 4.1.1 | Arreglo experimental | 45 |
| 4.1.2 | Validación del campo eléctrico homogéneo en la cámara TPT | 47 |
| 4.1.3 | Movilidad electrónica normalizada | 49 |
| 4.1.4 | Precisión o error | 50 |
| 4.2 | Adquisición y acondicionamiento de resultados | 51 |
| 4.2.1 | Adquisición de pulsos transitorios | 51 |
| 4.2.2 | Acondicionamiento de los pulsos medidos | 54 |
| 4.2.3 | Análisis de las formas de onda | 57 |

CAPÍTULO 5 Mediciones y análisis de resultados

| | | |
|-----|--------------------------|----|
| 5.1 | Mezclas ternarias | 67 |
| 5.2 | Validación de resultados | 68 |
| 5.3 | Mezcla $CF_3I-SF_6-CO_2$ | 73 |
| 5.4 | Mezcla $CF_3I-SF_6-N_2$ | 77 |
| 5.5 | Campo eléctrico crítico. | 79 |

CAPÍTULO 6 Conclusiones

| | | |
|-----|--------------|----|
| 6.1 | Conclusiones | 82 |
|-----|--------------|----|

CAPÍTULO 7 Trabajos futuros

| | | |
|-----|---------------|----|
| 7.1 | Otras mezclas | 84 |
|-----|---------------|----|

| | | |
|-----|--------------------------------------|----|
| 7.2 | Otras pruebas a las mezclas actuales | 84 |
|-----|--------------------------------------|----|

| | | |
|--|---------------------------|----|
| | <i>Referencias</i> | 85 |
|--|---------------------------|----|

Apéndice

| | | |
|-------------|---|-----|
| Apéndice A. | Modelado del arreglo de electrodos del set experimental | A-1 |
| | Caso 1. Electrodo plano con aristas | A-2 |
| | Caso 2. Electrodo plano con bordes redondeados | A-2 |
| | Caso 3. Electrodo con bordes redondeados y ánodo con barreno central | A-4 |
| | Caso 4. Electrodo con bordes redondeados, ánodo con malla en barreno central | A-6 |
| | Conclusiones | A-8 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabla 1.1 | Propiedades físicas del SF ₆ en fase gaseosa | 4 |
| Tabla 1.2 | Gases de efecto invernadero | 7 |
| Tabla 2.1 | Propiedades de gases potenciales como sustitutos del SF ₆ | 15 |
| Tabla 2.2 | Comparación de las propiedades del SF ₆ y CF ₃ I | 18 |
| Tabla 2.3 | Productos de descomposición del CF ₃ I | 19 |
| Tabla 4.1 | Precisión de los equipos del arreglo experimental | 50 |
| Tabla 4.2 | Concentración de los gases bajo estudio | 51 |
| Tabla 5.1 | Error en la medición del coeficiente de velocidad electrónica | 68 |
| Tabla 5.2 | Error en la medición del coeficiente de ionización efectiva en SF ₆ y CF ₃ I | 70 |
| Tabla 5.3 | Error en la medición del coeficiente de ionización efectiva en CO ₂ | 73 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|---|----|
| Figura 1.1 | Rigidez dieléctrica del aire medida en función de la distancia entre placas paralelas | 2 |
| Figura 1.2 | Curvas de Paschen usadas para descargas en gases | 3 |
| Figura 1.3 | Molécula del hexafluoruro de azufre (SF_6) | 4 |
| Figura 1.4 | Presiones de vapor y sublimación del SF_6 | 5 |
| Figura 1.5 | Emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2013, por sector productivo | 8 |
| Figura 1.6 | Emisiones de SF_6 en México de 1990 - 2010 | 9 |
| Figura 2.1 | Estructura molecular del CF_3I | 17 |
| Figura 2.2 | Temperatura de ebullición en función del contenido de CF_3I | 18 |
| Figura 2.3 | Coeficiente efectivo de ionización del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF_3I | 20 |
| Figura 2.4 | Velocidad de deriva del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF_3I | 21 |
| Figura 2.5 | Coeficiente de difusión del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF_3I | 21 |
| Figura 2.6 | Campo crítico del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF_3I | 22 |
| Figura 2.7 | Coeficiente de ionización efectiva del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ con 30%, 50% y 70% de concentración del CF_3I | 23 |
| Figura 2.8 | Campo eléctrico crítico del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{O}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{CF}_4$ y $\text{CF}_3\text{I}/\text{aire}$ | 24 |
| Figura 3.1 | Recipiente contenido en un gas | 27 |
| Figura 3.2 | Niveles de energía de un átomo | 30 |
| Figura 3.3 | Sección eficaz del O_2 , N_2 y H_2 | 33 |
| Figura 3.4 | Variación de la corriente en el seno del gas debida a la aplicación de una diferencia de potencial entre electrodos | 34 |
| Figura 3.5 | Representación esquemática de la avalancha electrónica | 35 |
| Figura 3.6 | Curva de Paschen | 37 |
| Figura 4.1 | Arreglo experimental utilizado en el presente trabajo | 44 |

LISTA DE FIGURAS (continuación)

| | | |
|-------------|--|----|
| Figura 4.2 | Arreglo de electrodos utilizados en la experimentación | 45 |
| Figura 4.3 | Malla de cobre electroformado para homogeneizar el campo eléctrico entre los electrodos | 46 |
| Figura 4.4 | Gradiente eléctrico y distribución de líneas de campo eléctrico entre electrodos | 48 |
| Figura 4.5 | Amplificación y visualización de transitorios medidos | 52 |
| Figura 4.6 | Archivo de texto de un transitorio | 53 |
| Figura 4.7 | Archivo de texto “bitácora” de medición | 54 |
| Figura 4.8 | Pulso transitorio electrónico experimental | 55 |
| Figura 4.9 | Ejecución del programa para reducir el ruido generado por el propio arreglo experimental | 56 |
| Figura 4.10 | Acondicionamiento de pulsos transitorios | 56 |
| Figura 4.11 | Pulsos transitorios de la corriente electrónica | 57 |
| Figura 4.12 | Determinación del tiempo de tránsito electrónico | 59 |
| Figura 4.13 | Cálculo del transitorio sin difusión | 61 |
| Figura 4.14 | Ajuste de los transitorios medidos | 62 |
| Figura 4.15 | Archivos de salida con los parámetros de transporte electrónico | 63 |
| Figura 4.16 | Transitorio con una ionización efectiva | 64 |
| Figura 4.17 | Transitorio con una ionización efectiva nula | 65 |
| Figura 4.18 | Transitorio con una captura electrónica predominante | 65 |
| Figura 4.19 | Evolución temporal de la corriente en función de E/N | 66 |
| Figura 5.1 | Variación de la velocidad de deriva del SF_6 y CF_3I en función de E/N . | 69 |
| Figura 5.2 | Coefficiente de ionización efectiva del SF_6 y CF_3I en función de E/N . | 70 |
| Figura 5.3 | Variación de la velocidad de deriva del CO_2 en función de E/N . | 71 |
| Figura 5.4 | Coefficiente de ionización efectiva del CO_2 en función de E/N . | 72 |

LISTA DE FIGURAS (continuación)

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 5.5 | Velocidad de deriva de las mezclas $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$ en función de E/N | 73 |
| Figura 5.6 | Ionización efectiva de las mezclas $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$ en función de E/N | 74 |
| Figura 5.7 | Coeficientes de difusión longitudinal normalizados a la densidad de las mezclas $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$ en función de E/N | 75 |
| Figura 5.8 | Velocidad de deriva de las mezclas de $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ en función de E/N | 76 |
| Figura 5.9 | Ionización efectiva de las mezclas de $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ en función de E/N | 78 |
| Figura 5.10 | Difusión longitudinal de las mezclas de $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ en función de E/N | 79 |
| Figura 5.11 | Campo eléctrico crítico de las mezclas: ● $\text{CF}_3\text{I-N}_2$, ★ $\text{CF}_3\text{I-SF}_6$, ■ $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ y + $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$, en función de la concentración del gas | 80 |
| Figura A.1 | Campo y gradiente eléctrico de electrodos con aristas | A-3 |
| Figura A.2 | Campo y gradiente eléctrico de electrodos con bordes de $r=0.6$ mm | A-4 |
| Figura A.3 | Campo y gradiente eléctrico de electrodos con bordes de $r=0.6$ mm y ánodo con barreno central | A-5 |
| Figura A.4 | Campo y gradiente eléctrico de electrodos con bordes de $r=0.6$ mm y malla de cobre en el ánodo. | A-7 |

1. Introducción

1.1 Aislamientos eléctricos

La función más importante de un material aislante es la de impedir la conducción eléctrica entre un conductor sometido a una diferencia de potencial alta respecto de otros materiales conductores sujetos a otros potenciales y del potencial de tierra. Además, con frecuencia, aislantes y conductores están expuestos a esfuerzos mecánicos, térmicos y fenómenos químicos, los cuales, a menudo, se presentan simultáneamente.

Así, los materiales aislantes deben satisfacer un gran número de requerimientos técnicos, que en ocasiones llegan a ser contradictorios al considerar el aspecto económico, durante la selección de un aislante en alguna actividad específica.

Una clasificación de los materiales aislantes utilizados puede ser la siguiente [1]:

- Aislamientos inorgánicos naturales. Son materiales inorgánicos que no se preparan químicamente, tales como los gases naturales y algunos materiales sólidos de origen mineral, como la mica y el cuarzo.
- Aislamientos inorgánicos sintéticos. Son materiales de origen inorgánico, producidos químicamente por el hombre. Dentro de los materiales aislantes más utilizados de este grupo se encuentran el hexafluoruro de azufre (SF_6) y la porcelana.
- Aislamientos orgánicos naturales. Son materiales caracterizados por la presencia de Carbono (C), el cual tiene la propiedad de poder formar grandes cadenas o estructuras atómicas tipo anular. Los materiales más destacados en esta clasificación son los aceites vegetales y minerales y el papel.
- Aislamientos orgánicos sintéticos. Son materiales comúnmente conocidos como plásticos. Estos materiales están formados por macromoléculas

debido a la propiedad del carbón para formar grandes cadenas de polímeros con base en la combinación de monómeros. Algunos de los materiales dentro de esta clasificación son el Polietileno (PE), el Policloruro de Vinilo (PVC), el Poliuretano y el Silicón, entre otros.

De los materiales mencionados anteriormente, los gases son el medio aislante más utilizado en los equipos eléctricos, siendo el aire el gas natural con mayor aplicación. Otros gases utilizados como aislamiento son el nitrógeno (N_2), el dióxido de azufre (CO_2) y gases electronegativos como el hexafluoruro de azufre.

La rigidez dieléctrica del aire para un campo uniforme formado por electrodos separados 1 cm, a una temperatura ambiente y a presión atmosférica es de $3.13 \times 10^6 \text{ Vm}^{-1}$ [2]. La Figura 1.1 muestra cómo disminuye la rigidez dieléctrica del aire de acuerdo con la separación entre los electrodos.

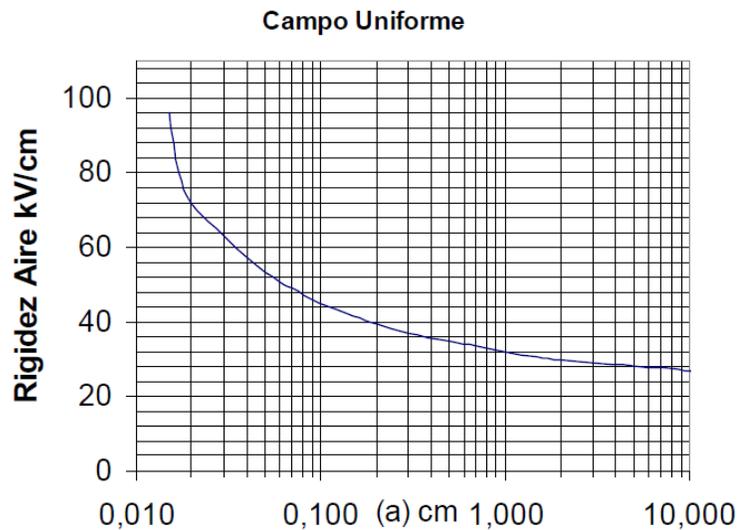


Figura 1.1 Rigidez dieléctrica del aire medida en función de la distancia entre placas paralelas

Los gases más utilizados en aplicaciones de alto voltaje son aire, nitrógeno, hidrógeno y hexafluoruro de azufre.

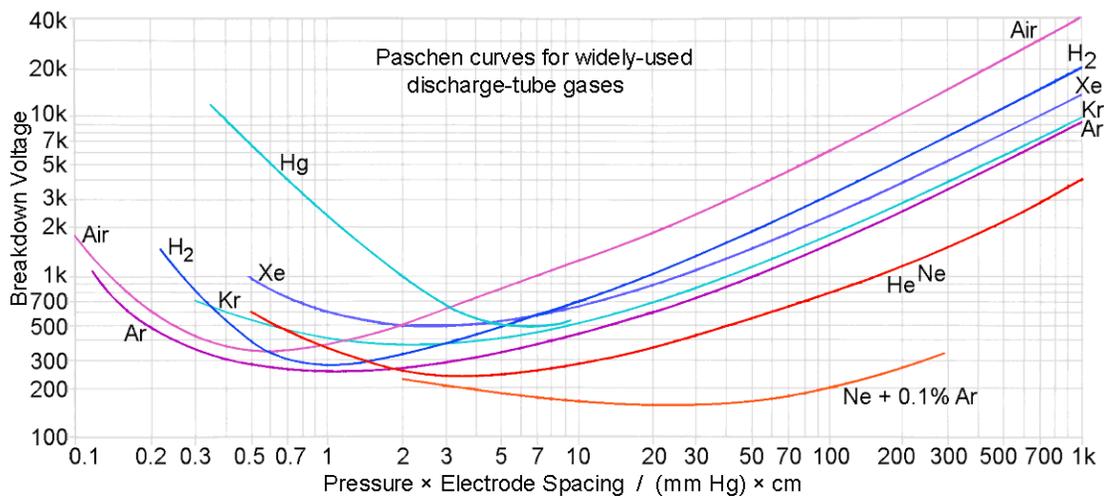


Figura 1.2 Curvas de Paschen usadas para descargas en gases

En la Figura 1.2, se puede observar la rigidez dieléctrica de diferentes gases en función del producto de la presión y la separación entre electrodos. A estas curvas suele denominárseles “Curvas de Paschen”

1.2 El SF₆ como aislante eléctrico

El hexafluoruro de azufre (SF₆) es un gas sintetizado por primera vez en 1900 en París, Francia por los científicos Moissan y Lebeau. Sus primeras aplicaciones eléctricas se realizaron alrededor de 1930, y a partir de 1947 el hexafluoruro de azufre se produce comercialmente.

El SF₆ está formado por seis átomos de flúor (F) con un átomo de azufre (S). Su peso molecular es 146.05 g/mol. El enlace entre el azufre y el flúor es uno de aquellos con mayor estabilidad química y térmica, lo que contribuye significativamente a sus características aislantes y de extinción de arco.

En la Figura 1.3 se puede observar que la molécula del SF₆ tiene una geometría simétrica, con el centro del octaedro ocupado por el azufre y en los vértices se encuentran los seis átomos de flúor.

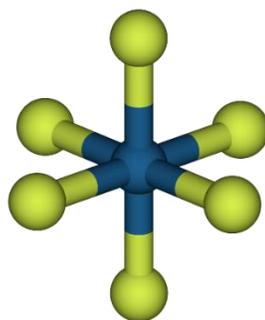


Figura 1.3 Molécula del hexafluoruro de azufre (SF_6)

1.3 Propiedades físicas

El SF_6 puro es inodoro, insípido, no tóxico, no corrosivo, no inflamable, químicamente inerte y estable a temperaturas de hasta 500°C .

Respecto a sus características eléctricas, el SF_6 tiene una rigidez dieléctrica aproximada de tres a diez veces la rigidez dieléctrica del aire a presión atmosférica y a una presión de operación (4 - 6 Bar), respectivamente [3,5].

La Tabla 1.1, muestra algunas de las principales características de importancia en su aplicación como medio aislante y de extinción de arco eléctrico.

Tabla 1.1 Propiedades físicas del SF_6 en fase gaseosa [5,6].

| Parámetro | Unidad |
|-------------------------|-----------------------|
| Densidad | 6.164 kg/m^3 |
| Masa molar | 146 g/mol |
| Punto de descomposición | 500°C |
| Punto de ebullición | -64°C |
| Temperatura crítica | 45°C |
| Presión crítica | 37.59 Bar |

La Figura 1.4 muestra la relación de presión/ temperatura cuando el SF_6 se encuentra en equilibrio entre la fase líquida y sólida.

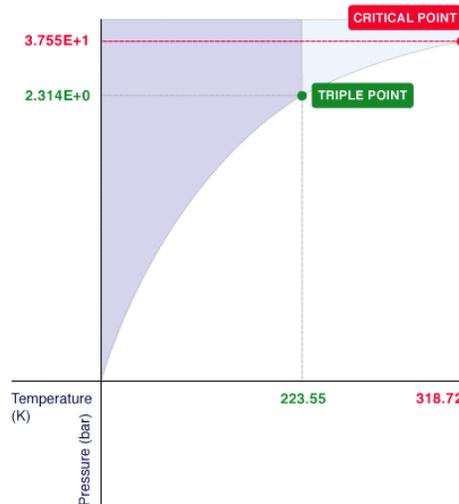


Figura 1.4 Presiones de vapor y sublimación del SF₆

El SF₆ es un gas denso, con una densidad de 6.164 kg/m³ a una temperatura de 20° C y presión de una atmósfera; equivalente a aproximadamente 5 veces la densidad del aire en condiciones similares [7-9].

El SF₆ posee una excelente capacidad de extinción de arco por sus características electronegativas, una capacidad térmica diez veces mayor que la del aire, y una transferencia de calor que duplica la del aire.

El SF₆ es un compuesto muy estable, por lo que se requieren condiciones severas para modificar su estructura molecular. La molécula del SF₆ tiene la capacidad de recombinarse fácilmente después de ser dissociada, y es químicamente compatible con la mayoría de los materiales utilizados en la industria eléctrica [8,9].

El número de subproductos generados cuando el SF₆ gaseoso experimenta un arco eléctrico dependerá de la energía y duración del propio arco, contenido de humedad, ácidos y materiales orgánicos presentes. A diferencia del gas SF₆ puro, sus subproductos de descomposición son altamente tóxicos y corrosivos, representando un alto riesgo para la salud de las personas en contacto con este gas.

Además, la presencia y acumulación de subproductos en los equipos eléctricos, modifica las propiedades dieléctricas del gas, afectando la operación y eficiencia de los mismos.

1.4 Aplicación

Desde la década de los 60's el SF₆ ha sido utilizado como aislamiento y medio de extinción de arco en los procesos de transmisión y distribución de energía eléctrica, principalmente en subestaciones aisladas en gas (GIS) e interruptores.

Otras aplicaciones del gas incluyen la industria metalúrgica, electrónica, equipo de investigación y aplicaciones militares.

Actualmente, la infraestructura de las grandes redes eléctricas presenta un incremento considerable en el uso y aplicación del hexafluoruro de azufre como medio aislante y de extinción del arco eléctrico de: subestaciones encapsuladas, interruptores, transformadores y cables de potencia debido a requerimientos de espacio y operación confiable en zonas contaminadas. Debido a esto, la industria eléctrica utiliza aproximadamente el 80% del SF₆ que se produce en el mundo.

De la producción total, el 53% corresponde a fabricantes (gas nuevo) y el 27% restante corresponde al gas utilizado para relleno de equipo eléctrico.

1.5 Problemática

El hexafluoruro de azufre es el dieléctrico gaseoso preferido en la actualidad por la industria eléctrica, debido a sus propiedades térmicas y dieléctricas. Sin embargo, el SF₆ es un gas de efecto invernadero (GEI), identificado como aquel de mayor potencial de calentamiento global ((GWP, por sus siglas en inglés) aproximadamente 24,000 veces mayor que el del CO₂), de alto impacto para la atmósfera debido a su alta absorción de radiación infrarroja y con una tasa de descomposición muy lenta (hasta 3,200 años) [2,4].

El efecto invernadero evita que una parte del calor recibido desde el sol deje la atmósfera y vuelva al espacio exterior, incrementando así la temperatura de la superficie terrestre. Existen varios gases naturales de efecto de invernadero en la atmósfera, y que son absolutamente necesarios para calentar la Tierra, tales como el bióxido de carbono y el agua, pero en la debida proporción.

El efecto invernadero provocado por la quema excesiva de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) ha elevado sustancialmente la temperatura media de la atmósfera terrestre, produciendo el calentamiento global.

Para atender esta problemática, en el año 2005 se creó el Protocolo de Kioto con la finalidad de vigilar y reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero [10,11].

Los principales gases de efecto invernadero considerados en el protocolo de Kioto y su potencial de calentamiento, se describen en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2 Gases de efecto invernadero

| Gases | Potencial de calentamiento |
|---|----------------------------|
| Bióxido de carbono (CO ₂) | 1 |
| Metano (CH ₄) | 21 |
| Óxido nitroso (N ₂ O) | 310 |
| Hidrofluorocarbonos (HFCs) | 140-11,700 |
| Perfluorocarbonos (PFCs) | 6,500-9,200 |
| Hexafluoruro de azufre (SF ₆) | 23,900 |

Dentro del panorama mundial, México vierte el 15% del CO₂ del planeta a la atmósfera ocupando el lugar 9 y el 2° en Latinoamérica [16].

La emisión al medio ambiente del SF₆ utilizado en el sector eléctrico tiene como fuentes principales las siguientes [12, 13]:

1) Manejo del gas

Defectos de manufactura, mantenimiento, instalación de equipo, recarga, falta de capacitación del personal técnico.

2) Fugas

Pérdida de hermeticidad de empaques, válvulas y herrajes.

3) Fallas en equipo eléctrico

Fallas propias del equipo o por causas externas.

Las emisiones mundiales de SF₆ representan un porcentaje menor al 0.5% de las emisiones totales y un 19% de las emisiones del sector industrial. La Figura 1.5 muestra las emisiones de gases efecto invernadero por sector productivo, correspondientes al año 2013.

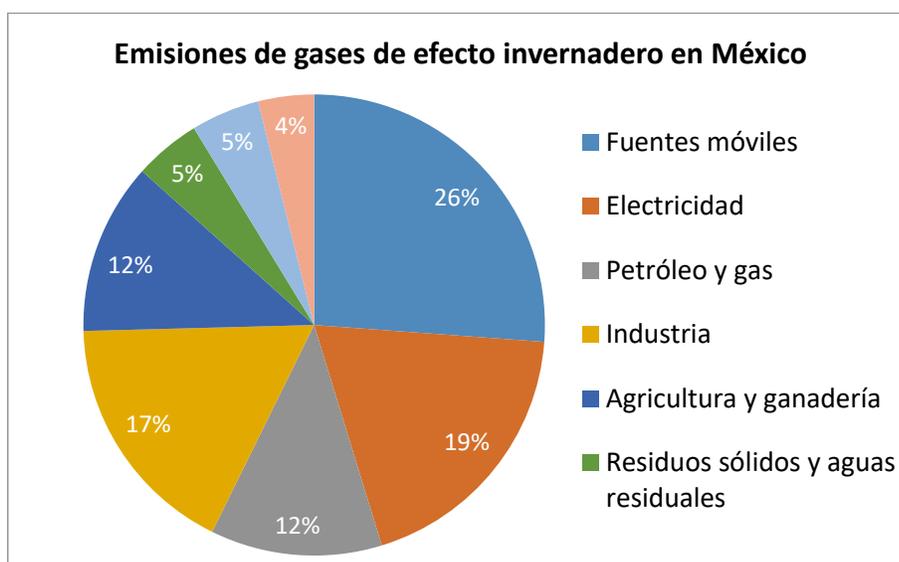


Figura 1.5 Emisiones de gases de efecto invernadero en el año 2013, por sector productivo

En México, durante los años 1990 y 2010, las emisiones de SF₆ representaron un porcentaje menor al 0.1% del total. Sin embargo, en el año 2013 las emisiones de SF₆ aportaron el 5% del total de emisiones nacionales,

incrementando cuatro veces las emisiones en un periodo de 21 años (1990-2010) [17]. En la Figura 1.6 se muestran las emisiones del gas SF₆ en México en el periodo 1990-2010.

La industria eléctrica mexicana cuenta con una amplia y compleja red de transmisión y distribución de energía eléctrica. La red eléctrica nacional cuenta con equipos que utilizan el SF₆ como medio aislante y de interrupción de arco. En niveles de transmisión, el 73% de los interruptores utilizan SF₆ y, existen aproximadamente 60 subestaciones eléctricas encapsuladas en gas (GIS) [17]. Por ello se estima que la red nacional cuenta con aproximadamente 310 toneladas de gas instalado en interruptores de potencia y GIS.

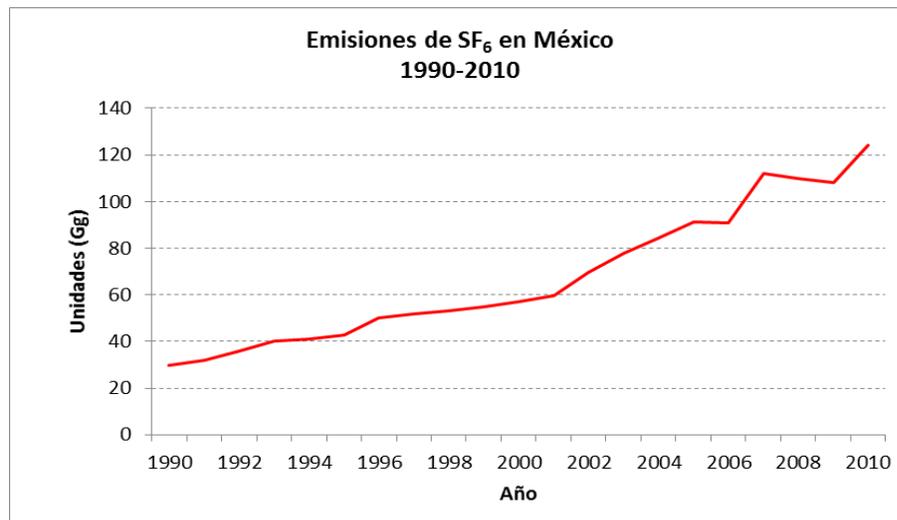


Figura 1.6 Emisiones de SF₆ en México de 1990 - 2010

Lo descrito anteriormente, sumado al incremento del volumen del gas, debido a la demanda de equipos eléctricos cada vez más eficientes, la falta de implantación de procedimientos regulados para su manejo, regeneración y almacenamiento, la liberación voluntaria o involuntaria del gas y fugas en equipos, hacen del hexafluoruro de azufre un gas potencialmente dañino para el medio ambiente y la humanidad.

1.6 Alcance de la tesis

El alcance del presente trabajo de investigación considera las siguientes actividades:

- Obtención y análisis de los parámetros de transporte electrónico en dos mezclas ternarias con gases a diferentes concentraciones.
- Mediciones experimentales a tensiones de 5 kV y una presión máxima de 5 Torr.
- Comparación de resultados obtenidos con el gas SF₆ puro.
- Selección de una mezcla ternaria como posible sustituto del gas SF₆ en su aplicación como medio aislante en un equipo eléctrico de potencia.
- Identificación de trabajos futuros en la búsqueda de aislamientos en gas amigables con el medio ambiente

1.7 Contribución de la tesis

Los beneficios al término de este trabajo de investigación son:

- Proporcionar información útil que coadyuve al estudio de la física de las descargas eléctricas en gases y su aplicación en la industria.
- Conocer la factibilidad de sustitución del gas SF₆ como medio aislante y de extinción de arco.
- Contribuir a la sustentabilidad energética al proporcionar información relevante de aislamientos amigables con el medio ambiente.
- Reducción del impacto ambiental, utilizando tecnologías amigables con el medio ambiente.

2. Revisión del SF₆ y sus alternativas

El hexafluoruro de azufre es en la actualidad el gas aislante por excelencia, preferido en muchas aplicaciones industriales y científicas, con las mejores propiedades dieléctricas, térmicas y químicas.

Sin embargo, debido a que se trata de un gas de efecto invernadero con el mayor potencial de calentamiento global, en las últimas décadas se han llevado a cabo estudios con la finalidad de encontrar y desarrollar un nuevo gas con pequeñas concentraciones de SF₆ u otro que reemplace completamente al hexafluoruro de azufre y que sea amigable al medio ambiente.

2.1 Recientes investigaciones de gases alternos al SF₆

El SF₆ fue reconocido como un gas de efecto invernadero en la tercera sesión de la Conferencia de las Partes (COP3) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, por sus siglas en inglés) en el año 1997, cuando se adoptó el Protocolo de Kioto, y a partir de dicho año se inició la investigación de gases alternos al hexafluoruro de azufre. Inicialmente, las investigaciones [8, 18-23] se enfocaron al estudio de mezclas de gases como el aire, nitrógeno e incluso el dióxido de carbono y bajas concentraciones de SF₆. Estos trabajos caracterizaron y compararon los parámetros dieléctricos del SF₆ y sus mezclas como medio de interrupción de arco eléctrico bajo campos eléctricos homogéneos y no homogéneos. La mezcla SF₆/N₂ fue la de mayores ventajas y con mayor proyección para su aplicación en equipos de alta tensión [8]. Posteriormente, las investigaciones se orientaron a mezclas binarias con pequeñas concentraciones de SF₆ y productos halogenados, hidrofluorolefinos, perfluorocarbonos y fluoronitrilos, con bajo potencial de calentamiento global.

Otro grupo de investigadores [24-30] evaluó los parámetros de transporte electrónico mediante la Técnica Pulsada de Townsend de las mezclas de SF₆ y sus mezclas con CO₂, N₂, N₂O, He, Ar, Xe y CF₄ entre otros, en concentraciones de 2%-90% del SF₆ en un intervalo del campo eléctrico normalizado a la densidad de 100-700 Td (1 Townsend = $10^{-17} V/cm^2$). Con base en los resultados se determinaron las mezclas y concentraciones respectivas que presentaran un comportamiento similar al SF₆, así como el campo eléctrico crítico de cada una de las mezclas.

A continuación, se realiza una breve descripción de la familia de gases y sus mezclas estudiadas para emplearse como sustitutos del SF₆ en aplicaciones en redes eléctricas de alta tensión [31,32].

Perfluorocarbonos (PFCs)

La alta rigidez dieléctrica de los perfluorocarbonos se debe a la presencia del flúor (F). Estos gases electronegativos están formados por cadenas de flúor y carbón. De estos gases, el perfluorociclobutano (C₄F₈) es el de mayor rigidez dieléctrica, de 1.25 a 1.31 veces la rigidez del aire, pero un potencial de calentamiento de 8700 [8].

Además, los PFCs generan productos de descomposición tóxicos y tienen un potencial de calentamiento de 5,700 a 11,900.

Para evitar los problemas de la temperatura de licuefacción y el alto potencial de calentamiento, estos gases deben mezclarse con otros como el N₂ y el CO₂ para mejorar las temperaturas de licuefacción.

Gases naturales

Estos gases se encuentran libres en la atmósfera y se utilizan como medio aislante y extinción de arco a altas presiones en interruptores eléctricos.

De este grupo de gases, el CO₂ y el N₂, son los candidatos con mayores ventajas, debido a su muy bajo o nulo potencial de calentamiento y bajo daño a la capa de ozono.

El N_2 es un gas inerte y no es electronegativo, es decir, no captura electrones lentos, pero sí, al interactuar con ellos, absorbe cantidades sustanciales de su energía cinética.

Por lo antes mencionado, el CO_2 puro y sus mezclas podrían ser buenos candidatos para sustituir al SF_6 . Una forma de mejorar su rigidez dieléctrica sería operarlo al triple de la presión de operación del SF_6 y así alcanzar una rigidez similar a la de este último.

Fluorocetonas (FK)

Estos gases están formados por un átomo de oxígeno y cadenas de carbón y flúor; se consideran no tóxicos en estado estable, con una alta rigidez dieléctrica de 9 a 11 veces la rigidez del SF_6 y un bajo potencial de calentamiento global (GWP=1).

La evaporación de estos gases se alcanza a temperaturas del orden de $24^\circ C$, debido a lo cual este gas es mantenido a presiones menores de una atmósfera. Las mezclas con bajas concentraciones de fluorocetonas y gases naturales, mejoran la temperatura de licuefacción y la rigidez dieléctrica de la mezcla. El valor de la rigidez dieléctrica varía linealmente con la concentración de la fluorocetona en la mezcla.

Otra de las desventajas de las fluorocetonas es la no regeneración del propio gas después de una disociación por la ocurrencia de una descarga eléctrica.

Hidrofluorolefinas (HFOs)

Las hidrofluorolefinas son gases sintéticos con potenciales de calentamiento menores a 9 y una rigidez dieléctrica entre 0.8 y 0.95 la del SF_6 .

El desempeño de los HFOs está dictado por el tamaño de su molécula. Es decir, depende del número de átomos ramificados de carbón y flúor.

Los HFOs se licuan alrededor de una presión de 4.2 Bar a temperatura ambiente. Otra desventaja, es que su molécula se descompone en forma de ácido trifluoracético (TFA) que es muy tóxico, con una larga vida en la

naturaleza y forma depósitos conductivos de carbón en el interior de los equipos eléctricos [33].

Fluoronitrilos y sus mezclas

El fluido dieléctrico fluoronitrilo fue sintetizado, patentado y comercializado por la 3M™ Company bajo el nombre de NOVEC™. Este compuesto tiene una alta temperatura de licuefacción (3.1 Bar) a una temperatura de -30°C. Por lo anterior, los fluoronitrilos deben mezclarse con gases reguladores como el CO₂, N₂ y aire. De esta manera, se mejora la rigidez dieléctrica del fluoronitrilo y se reduce el impacto ambiental.

Las mezclas de fluoronitrilos y CO₂ aprovechan las ventajas de cada uno de los compuestos, la rigidez dieléctrica del NOVEC™ y el bajo punto de ebullición del CO₂.

El fluoronitrilo es un gas polar, altamente electronegativo y químicamente estable hasta una temperatura de aproximadamente 700°C, con una rigidez dieléctrica de 2.7 veces la rigidez dieléctrica del aire.

Los fluoronitrilos, poseen un potencial de calentamiento global menor de 2400 y un potencial de reducción de la capa de ozono nulo.

Las mezclas de fluoronitrilos con CO₂ están clasificadas en la categoría de menor riesgo y resultados de recientes estudios indican que no se clasifican como una sustancia CMR (carcinógenas, mutagénicas y tóxicas reproductivas, por sus siglas en inglés).

Un resumen de las características expuestas anteriormente, considera los siguientes puntos:

- Una mezcla adecuada de SF₆ con N₂ es un buen reemplazo para el SF₆. Esta mezcla encuentra buena aceptación para proporcionar aislamiento en aplicaciones alta tensión, además de ser técnica y económicamente rentable.
- Una de las principales desventajas de los gases polifluorinados es su alto punto de ebullición, el cual limita su uso en aplicaciones de equipo eléctrico

que opera en baja temperatura. Por tanto, se requiere mezclarlos con gases como el N₂ o CO₂, mejorando así la relación de su comportamiento dieléctrico, la temperatura de operación mínima y reduciendo el impacto ambiental.

- El uso de gases naturales como medio aislante y de extinción de arco requiere un incremento de la presión de operación y la evaluación del redimensionamiento del equipo eléctrico.

La Tabla 2.1 presenta con la comparación de las características de los gases mencionados anteriormente.

Tabla 2.1 Propiedades de gases potenciales como sustitutos del SF₆ [31,32]

| Gas/mezcla | CO ₂ | N ₂ | Perfluoro-carbonos | Fluoronitrilos | SF ₆ |
|--|-----------------|----------------|---------------------------------|----------------|-----------------|
| | | | c-C ₄ F ₈ | NOVEC | |
| Potencial de calentamiento | 1 | 0 | 8,700 | < 2400 | 23,900 |
| Daño a la capa de ozono | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Vida en la atmósfera (años) | < 15 | ∞ | 3,200 | | 3200 |
| Rigidez dieléctrica relativa con respecto al SF ₆ | 0.30 a 0.35 | 0.34 a 0.43 | 1.28 | 2.7 | 1 |
| Valor crítico E/N (Td) | 86 | | 440 | | 361 |
| Temperatura de ebullición (°C @ 1 Bar) | - 78.5 | -196 | -6 | -30 | -64 |
| Temperatura crítica (°C) | 30.98 | -147 | 115 | | 45.6 |
| Presión crítica (MPa) | 7.38 | 3.39 | 2.79 | | 3.78 |
| Presión de licuefacción (bar) a -30° C | 14.3 | -6 | | 0.31 | 5.2 |
| Gas/mezcla | CO ₂ | N ₂ | Perfluoro-carbonos | Fluoronitrilos | SF ₆ |
| | | | c-C ₄ F ₈ | NOVEC | |
| Toxicidad | No | No | No | Si | No |
| Densidad (kg/m ³) a 20° C | 1.84 | 1.25 | 6.62 | | 6.164 |
| Masa molecular (g/mol) | 44 | 28 | 200 | | 146 |
| Flamabilidad | No | No | No | No | No |
| Estabilidad térmica(°C) | 600 | -210 | | 700 | 500 |

Recientemente, se ha encontrado el gas trifluoriodometano (CF_3I) como un gas con alto potencial para su empleo como medio aislante y de extinción de arco eléctrico en su forma pura o mezclándolo con N_2 y CO_2

En el apartado 2.3.2 se presentan las características principales de este gas y su comparación con el SF_6 .

2.2 Sustitutos potenciales al SF_6

2.2.1. Requerimientos

Los gases deben cumplir con los siguientes requerimientos [2,8] para proveer aislamiento e interrupción de arco eléctrico:

- i.* Alta rigidez dieléctrica
- ii.* Electronegatividad media o alta
- iii.* Estabilidad térmica
- iv.* Inactividad química
- v.* No inflamable, no corrosivo, no tóxico, no inflamable, no explosivo
- vi.* Alta conductividad térmica
- vii.* Habilidad de extinción de arco
- viii.* Baja temperatura de condensación
- ix.* Autorrecuperable
- x.* Amigable con el medio ambiente
- xi.* Bajo potencial de calentamiento
- xii.* Bajo costo de producción

La alta conductividad térmica del gas contribuye al enfriamiento de los conductores que portan la corriente y en la extinción del arco. Por otro lado, la habilidad de extinción de arco eléctrico de un gas se refiere a la propiedad de poseer una baja temperatura de disociación y una constante de tiempo térmica de corta duración. Es decir, que sea capaz de disipar la misma cantidad de energía presente en un arco en un tiempo determinado.

2.2.2. Comparación de las propiedades del SF₆ y el CF₃I

El gas trifluoriodometano (CF₃I) es un gas formado por tres átomos de flúor y un átomo de yodo, con un átomo de carbono al centro de su molécula. La Figura 2.1 muestra la estructura molecular del CF₃I.

El CF₃I es un gas que se utiliza como agente extintor en la actualidad y recientemente se está considerando como un gas aislante para aplicaciones en alta tensión por poseer una rigidez dieléctrica superior a la rigidez del SF₆. En contraste con el SF₆, el CF₃I tiene un bajo potencial de calentamiento global, menor al del CO₂ (GWP<1), una vida en la atmósfera menor a dos días. [34-37]. Esto se debe a que la débil cadena C-I se descompone rápidamente en la atmosfera [38].

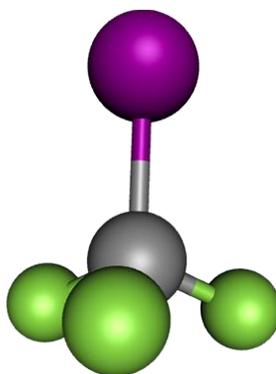


Figura 2.1 Estructura molecular del CF₃I [7]

El gas CF₃I es un gas incoloro, inodoro, no inflamable con un punto de ebullición de -22.5° C a una atmósfera. Por lo anterior, se mezcla con gases reguladores como el CO₂, N₂ con puntos de ebullición menores para reducir la presión de licuefacción. La Tabla 2.2 muestra las propiedades del CF₃I y el SF₆ para su comparación.

Con base en las ecuaciones de Van der Waals para presiones parciales [40-44], la Figura 2.2 muestra la gráfica de la temperatura de ebullición del CF₃I en función de la concentración del gas en una mezcla.

Tabla 2.2 Comparación de las propiedades del SF₆ y CF₃I [38-40]

| Gas/mezcla | CF ₃ I | SF ₆ |
|---|-------------------|-----------------|
| Potencial de calentamiento | 0.45 | 23,900 |
| Daño a la capa de ozono | << 1 | 0 |
| Vida en la atmósfera | < 2 días | 3200 años |
| Rigidez dieléctrica relativa al SF ₆ | 1.2 | 1 |
| Valor crítico E/N (Td) | 437 | 361 |
| Temperatura de ebullición (°C @ 1 Bar) | -22.5 | -64 |
| Presión de licuefacción (bar) a 20° C | 1.1 a -20°C | 2.1 @ 20° C |
| Toxicidad | No | No |
| Densidad (kg/m ³) | 9.016 | 6.164 |
| Flamabilidad | No | No |
| Estabilidad (°C) | | 500 |
| Temperatura crítica (°C) | 45.6 | 123 |
| Presión crítica (MPa) | 3.78 | 4.00 |

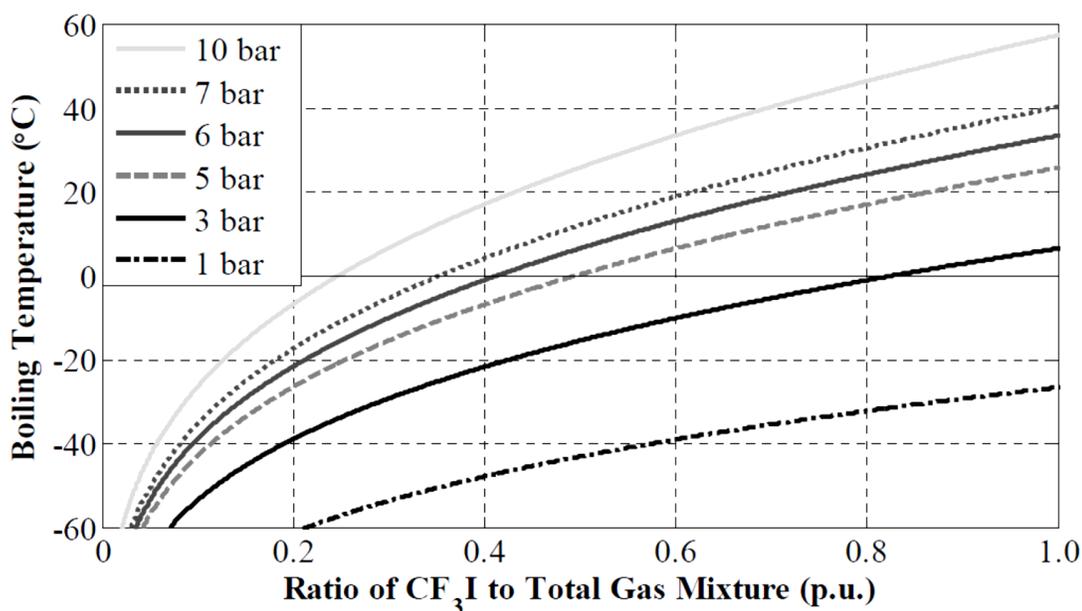


Figura 2.2 Temperatura de ebullición en función del contenido de CF₃I

Por otro lado, resultado de la experimentación en otros trabajos [40-44] los subproductos generados por la ocurrencia de una descarga eléctrica se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Productos de descomposición del CF₃I

| | Campo eléctrico uniforme | Campo eléctrico no-uniforme | Descarga superficial |
|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Voltaje aplicado (kV) | 135 | 43 | 83 |
| Energía de descarga (J) | 380 | 38 | 141 |
| C ₂ F ₆ (ppm) | 0.119 | 0.034 | 0.0317 |
| C ₂ F ₄ (ppm) | 0.00575 | 0.00348 | 0.00294 |
| CHF ₃ (ppm) | 0.0147 | | |
| C ₃ F ₈ (ppm) | 0.0112 | 0.00452 | 0.00718 |
| C ₃ F ₆ (ppm) | 0.00122 | 0.000501 | 0.000683 |
| C ₃ F ₅ I (ppm) | 0.00739 | 0.00335 | 0.00522 |

Cuando se estudian las mezclas de los gases sustitutos, la propiedad de mayor interés es la rigidez dieléctrica, la cual está definida por los parámetros de captura, ionización y dispersión electrónica. Investigaciones previas, indican que el campo eléctrico crítico (coeficiente efectivo de ionización nulo) del CF₃I es 437 Td, del orden de 1.2 veces el campo crítico del SF₆ (361 Td) [45].

El CF₃I y sus mezclas han sido estudiadas por diversos grupos, mediante la evaluación de sus parámetros de transporte electrónico y su caracterización como medio de interrupción de arco.

En las referencias [31,35-37,40-44] se presentan resultados de la evaluación dieléctrica del CF₃I y sus mezclas con CO₂ y N₂ mediante el análisis de la

tensión de ruptura en función de la presión y de la distancia entre electrodos, en campos eléctricos homogéneos y no homogéneos.

Por otra parte, en [45-49] se presentan los resultados de la evaluación del coeficiente efectivo de ionización, sección eficaz, movilidad, coeficiente de difusión longitudinal, velocidad electrónica y el campo eléctrico crítico ($\alpha_e = 0$) del CF_3I y sus mezclas para diferentes concentraciones del gas y diferentes distancias entre electrodos.

Los estudios mencionados anteriormente se realizaron para mezclas binarias del CF_3I , N_2 , CO_2 , SF_6 y otros gases de la familia de los fluorocarbonos.

Las Figuras 2.3, 2.4, 2.5 y 2.6 muestran los resultados obtenidos de la medición de los parámetros de transporte de la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ [37].

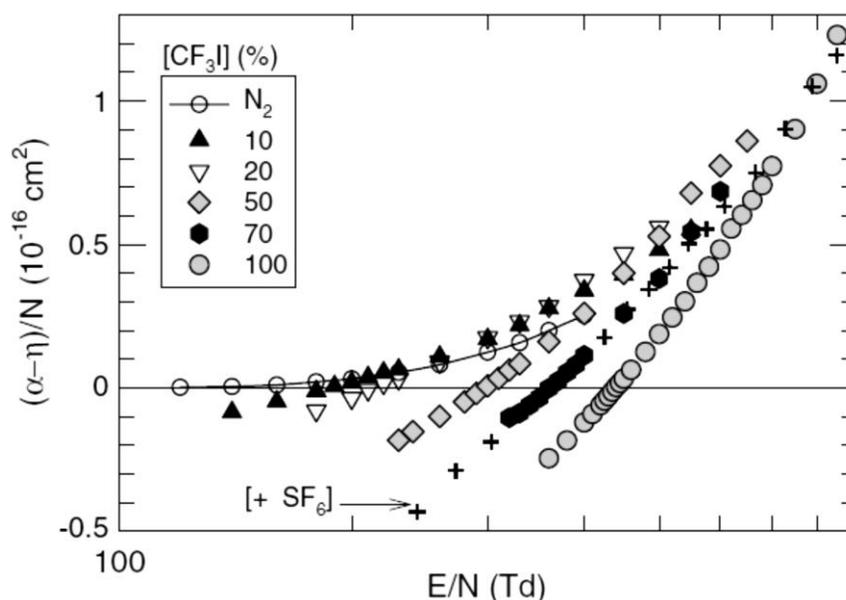


Figura 2.3 Coeficiente efectivo de ionización del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF_3I .

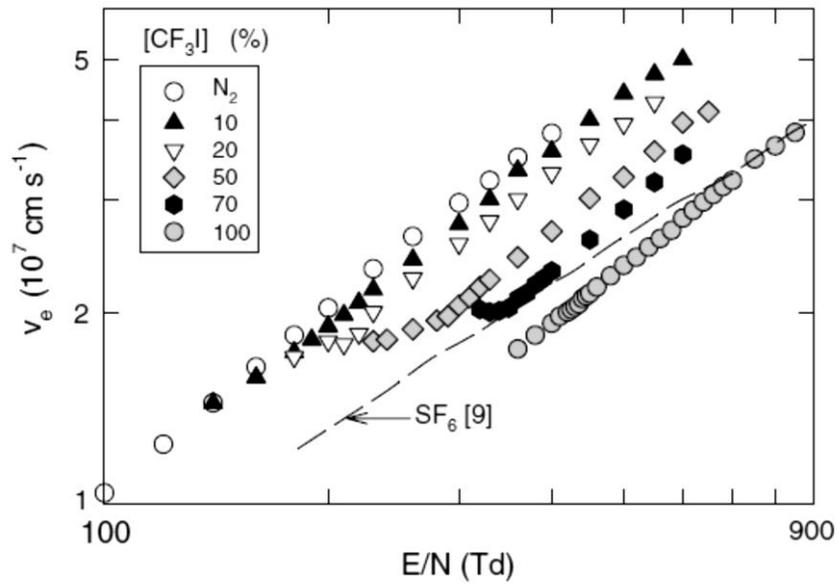


Figura 2.4 Velocidad de deriva del CF₃I y la mezcla CF₃I/N₂ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF₃I.

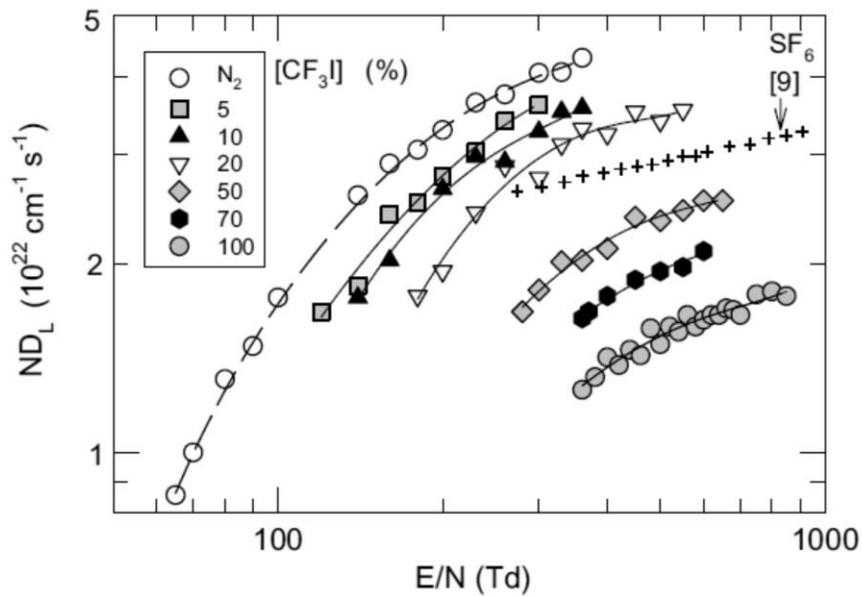


Figura 2.5 Coeficiente de difusión del CF₃I y la mezcla CF₃I/N₂ con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF₃I

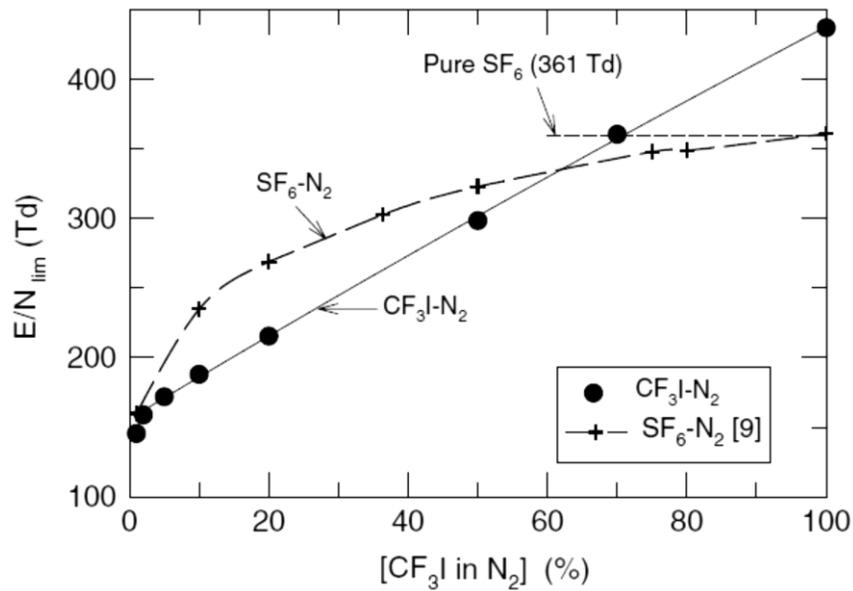


Figura 2.6 Campo crítico del CF_3I y la mezcla CF_3I/N_2 con 5%, 10%, 20%, 50% y 70% de concentración del CF_3I

Con base en los resultados mostrados anteriormente, se considera que la mezcla CF_3I/N_2 es viable para emplearse como medio aislante. Los autores determinaron que el campo eléctrico crítico del CF_3I ($E/N_{cri} = 437$ Td) es 1.2 veces mayor que el campo eléctrico crítico del SF_6 ($E/N_{cri} = 361$ Td), encontrando que la mezcla 70% CF_3I -30% N_2 muestra un comportamiento similar al SF_6 puro.

Otro grupo de investigadores [34,39-41, 45, 47] reportan los estudios realizados a las mezclas CF_3I/N_2 , CF_3I/O_2 , CF_3I/CO_2 , CF_3I/CF_4 y CF_3I /aire. Las Figuras 2.7 y 2.8 muestran los resultados obtenidos de la medición de los parámetros de transporte de las mezclas mencionadas anteriormente CF_3I/N_2 [48].

La Figura 2.8 muestra la comparación del campo eléctrico crítico del CF_3I y sus mezclas, en comparación con la mezcla SF_6/N_2 .

Con base en los trabajos desarrollados, los autores observaron que el coeficiente de ionización efectiva y por ende el campo eléctrico crítico de las mezclas, aumentan con la concentración del CF_3I y con el incremento del campo normalizado a la densidad del gas. Además, observaron que a altas concentraciones del CF_3I ($> 65\%$) el campo eléctrico crítico es superior a mezclas SF_6/N_2 y SF_6/CO_2 .

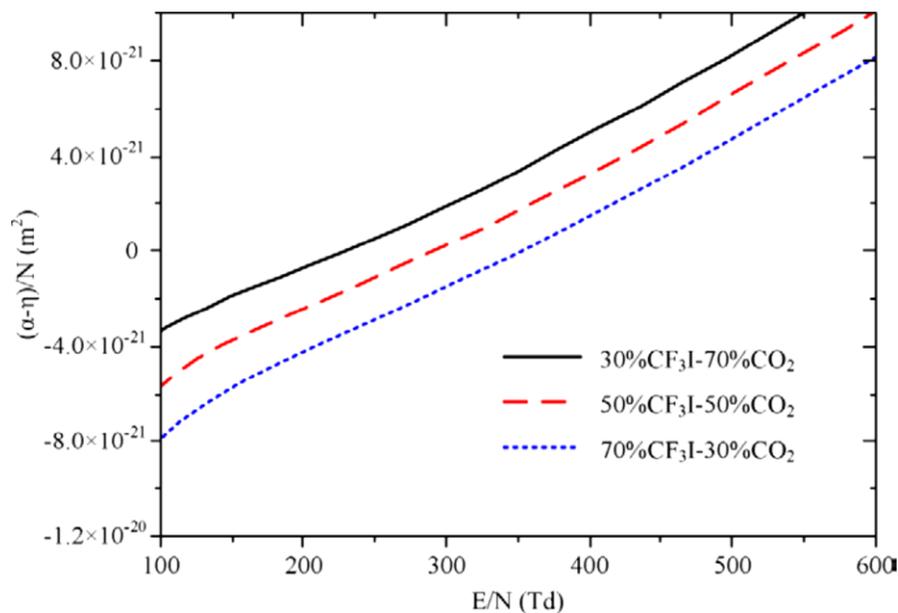


Figura 2.7 Coeficiente de ionización efectiva del CF_3I y la mezcla $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ con 30%, 50% y 70% de concentración del CF_3I

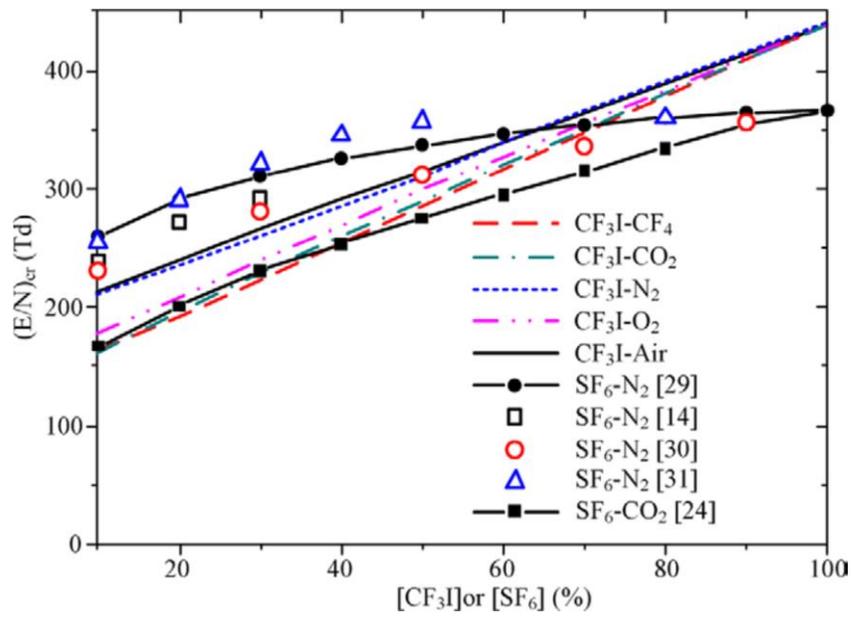


Figura 2.8 Campo eléctrico crítico del CF₃I y la mezcla CF₃I/N₂, CF₃I/O₂, CF₃I/CO₂, CF₃I/CF₄ y CF₃I/aire

3. Fundamentos y conceptos generales

En este trabajo se realiza el estudio de los fenómenos de transporte electrónico presentes en las descargas eléctricas en el régimen de Townsend. Por lo que en este capítulo se describen brevemente los conceptos básicos de los gases y los conceptos del fenómeno de transporte electrónico.

3.1. Teoría de gases

3.1.1 Ley de Boyle

Las moléculas de un gas tienen un comportamiento libre azaroso y continuo. La fuerza que ejerce el número total de partículas sobre las paredes del volumen que las contiene define su presión. En cambio, la temperatura del gas está definida por las colisiones entre moléculas y sus estados vibracionales.

Robert Boyle (1627-1691) encontró que el producto de la presión y el volumen, en el gas contenido en un recipiente cerrado, permanece constante si la temperatura no varía [50]. Esta ley es considerada como la “Ley del gas ideal” y se escribe como:

$$pV = C = \text{constante} \quad (3.1)$$

donde p es la presión, V es el volumen y C depende de la temperatura y la masa del gas.

Posteriormente, esta ley fue utilizada para estudiar a los gases bajo presión y volumen constante con base a la temperatura del gas. A presiones constantes, el volumen sigue la siguiente ecuación

$$V = V_0[1 + \alpha(\theta - \theta_0)] \quad (3.2)$$

donde θ es la nueva temperatura y V_0, θ_0 son el volumen y temperatura iniciales. α es el coeficiente de expansión de volumen y es la mismo para todos los gases.

3.1.2 Ley de Gay-Lussac

Si α se define como

$$\alpha = \frac{1}{273 + \theta_0} \quad (3.3)$$

Sustituyendo (3.3) en (3.2) se tiene

$$\frac{V}{V_0} = \frac{273 + \theta}{273 + \theta_0} \quad (3.4)$$

donde $\theta + \theta_0$ son temperaturas en °C. La ecuación (3.4) es conocida como la Ley de Gay-Lussac y permite conocer el volumen de un gas en función de la temperatura a una presión constante [50-51]. De (3.4) se entiende que el volumen de un gas puede ser obtenido a diferentes temperaturas si la presión se mantiene constante.

Combinando la ley de Gay-Lussac y la ley de Boyle, se obtiene

$$pV = RT \quad (3.5)$$

donde R es la constante universal de los gases, igual a 8314 J/°K.

En la ecuación (3.1) no se especifica la cantidad del gas. Si se considera que la masa del gas bajo estudio es 1 kilomole (es la cantidad de gas en la cual, a una temperatura de 0°C y 1 atmósfera, la masa en kilogramos es numéricamente igual al peso molecular del gas); entonces reescribiendo (3.1) se tiene

$$pV = nRT \quad (3.6)$$

donde n es el número de kilomoles de gas.

3.1.3 Ley de las presiones parciales

La mezcla de varios gases con volumen propio, a la misma temperatura y presión, el volumen final V será la suma del volumen de cada uno de los gases.

De forma general

$$V = V_1 + V_1 + \dots + V_n \quad (3.7)$$

La ley de presiones parciales establece que, en una mezcla de gases, cada gas se comporta como si no hubiese más gases. Por tanto, la presión final de la mezcla es la suma de presiones de cada gas [50-52].

$$p = \frac{n_1RT}{V} + \frac{n_2RT}{V} + \dots + \frac{n_nRT}{V}$$

que es lo mismo

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n \quad (3.8)$$

donde p_1, p_2, \dots, p_n son las presiones parciales de los gases 1, 2, ..., n . La ecuación (3.8) se conoce como la Ley de las presiones parciales.

3.1.4 Teoría cinética de los gases

La ecuación de estado de un gas indica que cualquier gas contenido en un recipiente cerrado a una temperatura constante, el producto de su presión y volumen también será constante. Esta ecuación puede validarse con base en la teoría cinética de los gases [50-52].

Se tiene entonces que la presión (p) del gas es proporcional al resultado de la fuerza que ejercen las moléculas (N_1) de masa (m) y velocidad eficaz (v) sobre las paredes del recipiente cúbico de lado l . La Figura 3.1 muestra el recipiente que contiene un gas con presión p .

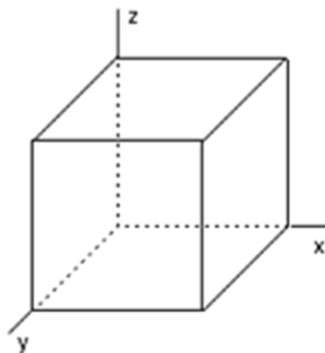


Figura 3.1 Recipiente conteniendo un gas

De acuerdo con el comportamiento azaroso de las moléculas, el impulso (I) que sufren las moléculas dentro del recipiente en cualquier dirección a una velocidad v , golpea la pared y rebota, se define por

$$\frac{2mv^2}{l} \quad (3.9)$$

Considerando una fuerza proporcional al producto de la presión por el área ($F = pA$), se calcula el número de impactos por el área total del cubo ($A = 6l^2$), obteniéndose

$$p = \frac{2mv^2}{l \cdot 6l^2} = \frac{2mv^2}{6l^3} \quad (3.10)$$

si $l^3 = V$

$$p = \frac{2mv^2}{6V} \quad (3.11)$$

ahora, la energía cinética ($E.C.$) de una molécula es

$$E.C. = \frac{1}{2} mv^2 \quad (3.12)$$

sustituyendo (3.12) en (3.11)

$$p = \frac{2}{3} \frac{E.C.}{V} \quad (3.13)$$

en un gas con N_1 partículas, la energía media para diferentes velocidades está dada por

$$p = \frac{2}{3} N_1 \frac{\overline{E.C.}}{V} \quad (3.14)$$

Con base en la ecuación de estado, donde indica que la densidad (N) del gas es igual al número de moléculas (N_1) en un volumen (V) y una temperatura constante

$$p = \frac{2}{3} N \overline{E.C.} \quad (3.15)$$

Igualando con $p = NkT$, se obtiene la energía cinética promedio por molécula

$$\overline{E.C.} = \frac{3}{2}kT \quad (3.16)$$

La validación de la ecuación de estado se consigue sustituyendo $E.C.$ por $\overline{E.C.}$ y considerando de la ley del gas ideal, con las siguientes igualdades:

$$N = \frac{N_1}{V} \quad (3.17)$$

El número de Avogadro, es el número de partículas en un mol

$$N_A = \frac{N_1}{n} \quad (3.18)$$

La constante de Boltzman, es la relación de la constante universal de los gases y el número de Avogadro

$$k = \frac{R}{N_A} \quad (3.19)$$

Sustituyendo (3.17), (3.18) y (3.19) en (3.16)

$$p = NkT = \frac{N_1}{V} \frac{R}{N_A} T = \frac{N_A n}{V} \frac{R}{N_A} T = \frac{n}{V} RT$$

por tanto

$$pV = nRT$$

3.2. Teoría del rompimiento eléctrico en gases

3.2.1 Ionización

Cuando un átomo tiene todos sus electrones en el nivel de energía más bajo, se dice que se encuentra en estado basal o estable. Caso contrario, cuando un electrón se encuentra en un nivel de mayor energía, se considera que el átomo o molécula esta excitada; por tanto, el electrón tenderá a regresar a su estado basal por medio de la liberación, regularmente un fotón, de igual energía a la perdida por la molécula.

Cuando un átomo o molécula absorbe energía suficiente para que un electrón alcance el nivel de energía continuo, el átomo pierde su electrón y por

consiguiente se forma un ión positivo. A este proceso se le conoce como ionización, y la energía de ionización es la diferencia entre la energía de los niveles de ionización y el nivel continuo.

La Figura 3.2 muestra los niveles de energía, el estado base y el estado excitado de un átomo.

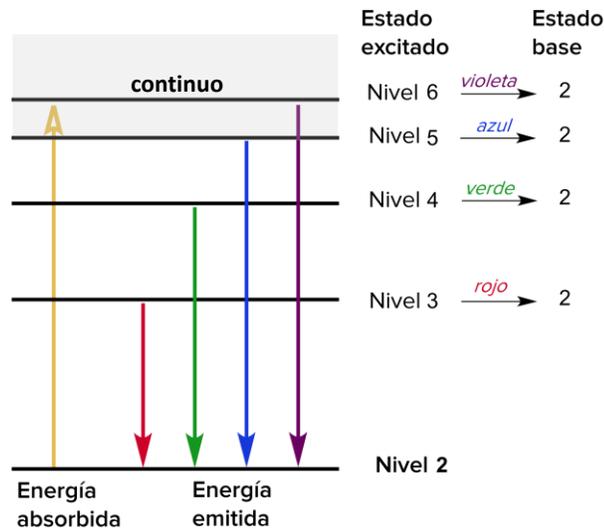


Figura 3.2 Niveles de energía de un átomo

En un gas ionizado libre de fuerzas externas, el transporte de electrones está regido por el movimiento térmico aleatorio y las colisiones que éstos puedan tener.

3.2.2 Procesos de ionización

Los principales procesos de ionización responsables de la descomposición de un gas son [53, 55]:

Ionización por colisión. En el proceso de ionización por colisión, un electrón libre impacta a una molécula de gas, dando lugar a un nuevo electrón y a un ión positivo.

Fotoionización. También conocida como ionización por radiación. La fotoionización se produce cuando la cantidad de energía de radiación absorbida por una molécula del gas excede su potencial de ionización.

Procesos de ionización secundarios. Los procesos de ionización secundarios son aquellos por los cuales se producen electrones secundarios. Es decir, son los electrones que sostienen una descarga eléctrica después de haberse generado la descarga debido a ionización por colisión o fotoionización.

En el proceso de ionización por colisión, la interacción de un electrón con los átomos o moléculas de un gas se clasifica de la siguiente manera:

Colisiones elásticas. Las colisiones elásticas son aquellas en las que el momento y energía cinética total de un sistema se conservan, permitiendo un intercambio de dichas propiedades. Es decir, existe una transferencia de momento entre los electrones libres y las moléculas del gas, dando como resultado un proceso de difusión de los electrones.

Teniendo en cuenta que las moléculas tienen una masa significativamente mayor a la del electrón, éstas tienen un efecto muy grande en los electrones y casi nulo para las moléculas.

Colisiones inelásticas: Las colisiones inelásticas son aquellas en las que, como resultado de la colisión, la molécula absorbe energía cinética, aumentando su energía potencial. Esta energía puede manifestarse como una excitación, ionización, disociación de la molécula o en la captura de un electrón. Es decir, este tipo de colisión es la responsable, entre otros fenómenos, de la aparición de nuevos portadores de carga mediante la ionización y la captura de electrones.

De esta manera, la ionización de un gas dependerá de las colisiones entre las moléculas del gas y los electrones libres, siendo directamente proporcional a la densidad del gas y al número de electrones.

3.2.3 Camino libre medio

La eficacia de la ionización por impacto electrónico depende de la energía que un electrón puede adquirir entre colisiones sucesivas, es decir, el camino libre medio en dirección del campo eléctrico [51, 55].

El camino libre medio del electrón es la distancia que recorre la partícula entre dos colisiones sucesivas. Por tanto, el camino libre medio es el promedio de las distancias recorridas por los portadores entre colisiones. Considerando que la fuerza ejercida sobre una partícula es eE a lo largo de una distancia $\bar{\lambda}$, la energía adquirida por la partícula es

$$W = eE\bar{\lambda} \quad 3.20$$

3.2.4 Sección eficaz

No todos los electrones que hayan adquirido una energía potencial mayor a la energía de ionización ($\Delta W \geq eV$) causarían ionización [51,55]. La ionización por colisión, como todos los demás procesos en las descargas de gas, es un fenómeno probabilístico que se expresa en términos de la sección eficaz para la ionización, definida como el producto

$$P_i\sigma = \sigma_i \quad 3.21$$

donde P_i es la probabilidad de ionización en el impacto y σ es el área transversal de la molécula de gas.

La sección eficaz de ionización por impacto electrónico hace referencia a la probabilidad de que ocurra una ionización por el impacto de un electrón con la superficie en torno a una molécula. En la Figura 3.3 se puede observar que la sección eficaz es dependiente de la energía del electrón.

Para el proceso de ruptura de un gas y, consecuentemente para el estudio del presente trabajo, la ionización predominante es la ocurrida por impacto electrónico (colisiones inelásticas).

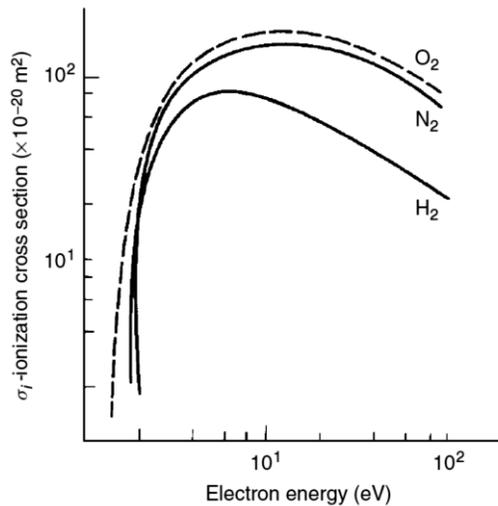


Figura 3.3 Sección eficaz del O_2 , N_2 y H_2

3.3. Ruptura eléctrica en gases

3.3.1. Rompimiento de Townsend

El cambio en el gas contenido en un capacitor de placas paralelas fue estudiado por primera vez por Townsend. Analizando la variación de la corriente a través del gas en función del voltaje aplicado entre placas.

Townsend encontró que, primeramente, la corriente incrementa proporcionalmente con la tensión aplicada y después permanece constante a un valor de I_0 , correspondiente a la corriente de saturación o a la corriente emitida debido a la incidencia de luz UV sobre el cátodo. Posteriormente, a una tensión mayor, la corriente crece exponencialmente por arriba del valor I_0 . La Figura 3.4 muestra esquemáticamente la relación corriente-tensión en la región previa a la descarga. Donde es posible observar el incremento de la corriente después de V_2 . Townsend atribuyó esta corriente a la ionización del gas por impacto electrónico. Para explicar el crecimiento exponencial de la corriente, Townsend introdujo el parámetro conocido como *Primer Coeficiente de Ionización (ahora de Townsend)*, que define el número de electrones

producidos por un electrón por unidad de longitud en la dirección del campo aplicado.

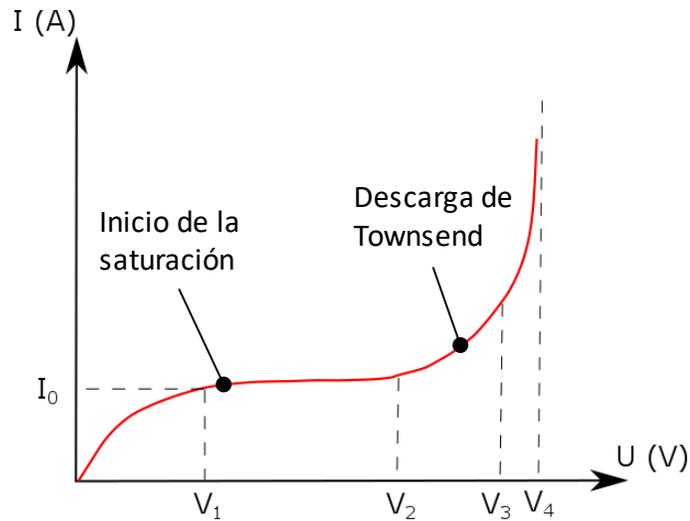


Figura 3.4 Variación de la corriente en el seno del gas debida a la aplicación de una diferencia de potencial entre electrodos

Townsend determinó que el número de electrones dependerá del número de electrones generados por impacto en una determinada distancia

$$n = n_0 e^{\alpha d} \quad 3.22$$

donde n_0 es el número de electrones primarios generados en el cátodo.

En términos de la corriente, con la corriente I_0 dejando el cátodo (3.32) es

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad 3.23$$

La Figura 3.5 muestra la multiplicación electrónica dentro de una avalancha.

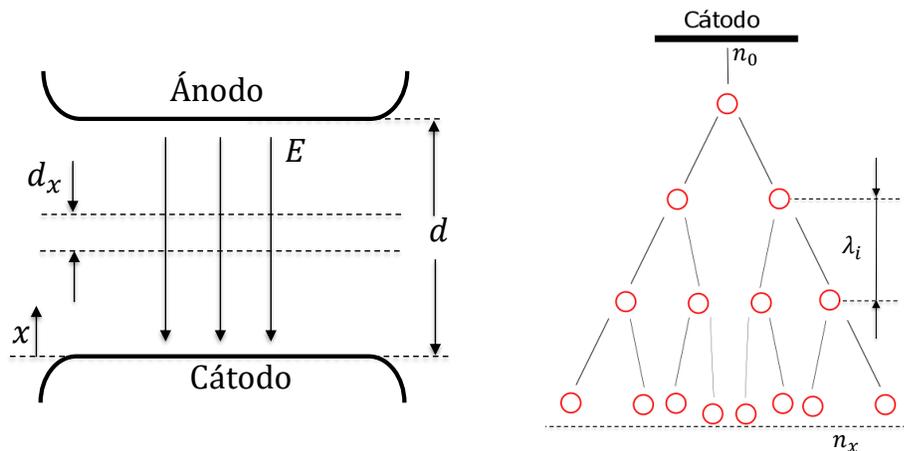


Figura 3.5 Representación esquemática de la avalancha electrónica

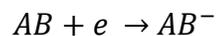
3.3.2. Ruptura en gases electronegativos

Un proceso que altera los mecanismos de ruptura de un gas es la captura de electrones. En la captura electrónica, los electrones son atrapados por átomos neutros para formar iones negativos.

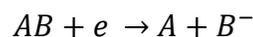
Los gases en los que la captura electrónica representa un papel importante, son llamados gases electronegativos.

Los procesos de captura electrónica más comunes en los gases son:

Captura directa: Ocurre cuando un electrón es capturado directamente por para formar un ión unión negativo. Simbólicamente, el fenómeno se representa de la siguiente manera:



Captura disociativa: Durante la colisión, parte de la energía del electrón se disipa en la ruptura de la molécula, seguida de la captura del electrón por uno de los fragmentos. Simbólicamente se representa de la siguiente manera:



3.3.3. Ley de Paschen

El gas contenido en un capacitor de placas paralelas, con una densidad n de partículas, comenzará a ionizarse cuando el voltaje aplicado entre los electrodos sea mayor al voltaje crítico (V) y los electrones adquieran energía cinética suficiente para producir colisiones ionizantes.

En consecuencia, existen dos variables vinculadas a este proceso:

- El campo eléctrico.
- La separación entre partículas; es decir, la presión del gas.

El voltaje de ruptura en campos homogéneos, en función de la distancia entre electrodos y la presión del gas, puede expresarse utilizando el coeficiente de ionización α/p en función del campo eléctrico E y la presión del gas p .

$$\frac{\alpha}{p} = f \frac{E}{p} \quad 3.24$$

Considerando el criterio de Townsend $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ y combinándolo con (3.24)

$$V_b = F(p \cdot d) \quad 3.25$$

Esto muestra que el voltaje de ruptura V_b depende únicamente del producto (pd). Esta relación es conocida como *Ley de Paschen*. La Figura 3.6 muestra la curva de Paschen para diferentes gases utilizados en la industria.

En la Figura 3.6 se puede observar un $V_{b_{min}}$, (el subíndice “b” por “breakdown”) este valor corresponde al voltaje mínimo de ruptura a un determinado valor del producto (pd). Este valor de voltaje corresponde al punto con mayor ionización y menor potencial de arco.

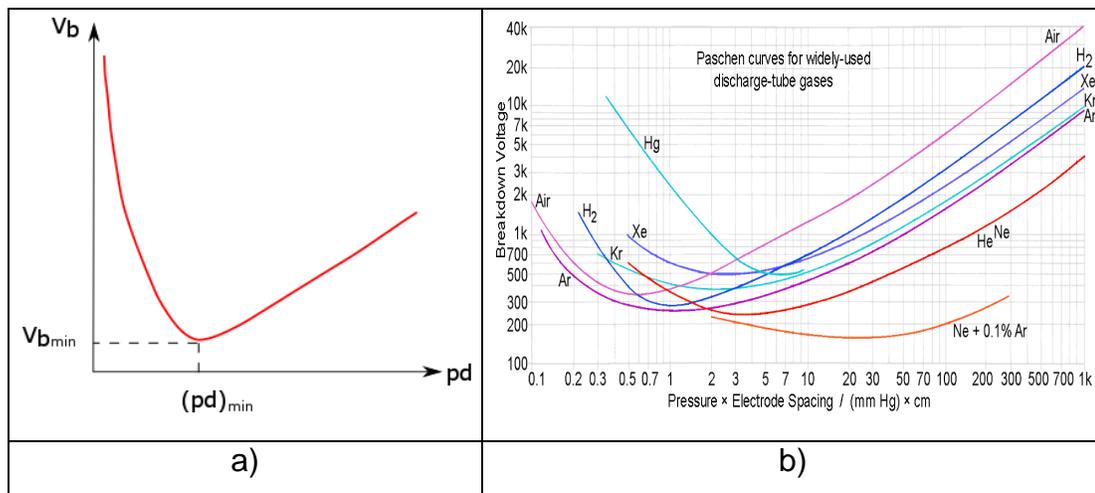


Figura 3.6 Curva de Paschen. a) modelo del voltaje de ruptura $V_b = F(p.d)$
 b) Curva de Paschen para gases utilizados en la industria.

3.4. Parámetros de transporte electrónico

El estudio de los gases ionizados en el régimen de Townsend se realiza mediante el análisis de las propiedades que describen su comportamiento, el transporte de carga y las interacciones entre electrones, iones y partículas neutras.

Para determinar estas propiedades existen diversos métodos teóricos y experimentales. La determinación de estos parámetros dependerá de la energía media de los electrones, que es directamente proporcional a la aceleración recibida por el campo eléctrico aplicado (E) e inversamente proporcional a la densidad del gas (N).

3.4.1. Velocidad de deriva (v_e)

En ausencia de un campo eléctrico externo, la velocidad promedio de los electrones en un gas es nula, debido a la naturaleza azarosa de sus movimientos térmicos.

Dentro de un capacitor de placas paralelas, las partículas cargadas se desplazan entre los electrodos. La acumulación de partículas cargadas en los

electrodos, en un tiempo determinado, genera un cambio en la densidad de carga superficial en el electrodo, teniendo que

$$q = q^+ + q^- = n^+ e dx^+ + n^- e dx^-$$

donde n^+ y n^- son las densidades de las partículas cargadas y e es la carga del electrón.

El desplazamiento de las partículas cargadas genera una corriente. La densidad de corriente es la razón de cambio de la carga q a una distancia x desde el cátodo para un tiempo t

$$j(x) = \frac{dq}{dt} = j^+ + j^- = n^+ e \frac{dx^+}{dt} + n^- e \frac{dx^-}{dt}$$

$$j = e(n^+ v^+ + n^- v^-) \quad 3.26$$

donde v^+ y v^- son las velocidades de deriva de las partículas cargadas. De esta manera (3.26) es utilizada en plasmas para identificar partículas cargadas, mediante la comparación de sus velocidades y densidades.

Por otro lado, cuando el gas recibe la influencia de un campo eléctrico externo E , una fuerza eE se ejerce sobre las partículas, adquiriendo energía cinética con una aceleración \dot{v}

$$\dot{v} = \frac{eE}{m}$$

donde m es la masa de la partícula.

La velocidad del centro de masa iónica es equivalente a la velocidad promedio de los iones y recibe el nombre de *velocidad de deriva o de arrastre*, v_e , que se define como la integral de la aceleración \dot{v}

$$v_e = kE \quad 3.27$$

Es decir, la velocidad de deriva es la velocidad promedio de una nube de portadores a lo largo de su tiempo de tránsito (T_i). El tiempo de tránsito se

define como el tiempo que toma a los portadores de carga, de una sola especie, recorrer la distancia (d) entre electrodos.

$$v_i = \frac{d}{T_i} \quad 3.28$$

donde v_i y T_i son la velocidad y el tiempo de tránsito de un portador de carga en particular.

En este trabajo, la velocidad de deriva se identificará como v_e y sus unidades son cm/s .

3.4.2. Movilidad electrónica (μ)

La movilidad electrónica es una constante de proporcionalidad entre la velocidad de deriva v_e en la dirección del campo y la magnitud del campo aplicado E , para cada portador de carga.

$$k = \frac{v_e}{E} \quad 3.29$$

También es definida como la velocidad de deriva por unidad de campo eléctrico aplicado de una partícula. Sus unidades son $cm^2V^{-1}s^{-1}$.

3.4.3. Captura electrónica

La captura electrónica forma parte de los procesos conocidos como desionización, la cual afecta la conductividad de un gas ionizado.

La captura ocurre cuando una molécula neutra captura un electrón, generando la aparición de un ion negativo. En este caso, el número de portadores de carga no sufre ningún cambio, únicamente cambia el tipo de portador y por consiguiente sus propiedades de transporte, ya que la corriente eléctrica depende de la velocidad de los portadores de carga. Al capturarse los electrones, los iones se mueven con velocidades mucho menores (100 a 1,000 veces menores), lo que puede causar la extinción del arco eléctrico.

Los gases que favorecen la captura electrónica, son llamados electronegativos.

3.4.4. Parámetro E/N

Cuando un campo eléctrico es aplicado a los portadores de carga de un gas, éstos ganarán energía cinética y serán arrastrados en la dirección del campo, generando colisiones durante su tiempo de tránsito.

Como se definió en el apartado 3.2.3, la fuerza ejercida sobre una partícula de carga e y masa m es eE y la aceleración resultante es eE/m .

Considerando un periodo colisional τ o *tiempo libre medio* como el tiempo transcurrido entre colisiones sucesivas, entonces la velocidad antes de cada colisión es $eE\tau/m$ [50,55].

El *tiempo libre medio* es inversamente proporcional a la densidad del gas, $\tau = 1/N$, y por lo tanto la velocidad de las partículas cargadas será directamente proporcional al campo eléctrico e inversamente proporcional a la densidad del gas.

De igual forma, el camino libre medio es inversamente proporcional a la densidad del gas $\bar{\lambda} = 1/N$, por lo que la intensidad de campo eléctrico normalizado a la densidad del gas (E/N), es proporcional a la energía adquirida por los portadores de carga entre colisiones sucesivas.

A partir de la ley universal de los gases, se tiene que la presión total de un gas está en función del número de partículas del mismo y, por tanto, los parámetros E/N y E/P son equivalentes [50,54].

$$\frac{E}{N} = T(1.0354 \times 10^{-2}) \frac{E}{P} \quad 3.30$$

donde T es la temperatura del gas

3.4.5. Coeficiente de difusión longitudinal (D_L)

Por la naturaleza azarosa del movimiento térmico y las colisiones de los electrones con las moléculas del gas, un electrón liberado en cierto punto de la avalancha adquirirá una distribución espacial de densidad $n(x)$ que generalmente es de forma Gaussiana. La diferencia de densidad o

concentración en el espacio, es decir, si las partículas de un gas no se encuentran uniformemente distribuidas, dará como resultado un flujo de cargas debido al gradiente de densidad cuyo valor es diferente de cero (0), dado por la Ley de Fick [50,55].

$$\vec{j} = -D\nabla n \quad 3.31$$

Donde D es el coeficiente de difusión y sirve como una constante de proporcionalidad entre el flujo y el gradiente de densidad, proporcionando un parámetro que da idea de la facilidad con la que se mueven los electrones dentro del gas.

El signo negativo en (3.31) indica que el flujo y el gradiente de densidad tienen sentidos o direcciones opuestas.

Con base en (3.31) se deduce que el flujo (\vec{j}) terminará cuando la distribución de las partículas en la avalancha es homogénea ($\nabla n = 0$).

Cuando el campo eléctrico externo aplicado incrementa a un nivel de energía superior a la energía térmica de las moléculas, las partículas cargadas serán proyectadas en dirección del campo. Este arrastre eléctrico genera gradientes en las concentraciones y el flujo total producido está formado por una componente eléctrica y una componente de difusión [50, 55].

$$\vec{j}_i = -D\nabla n_i + n_i K_i E \quad 3.32$$

La componente de difusión ahora se presenta mediante dos coeficientes: el *Coeficiente de difusión longitudinal* (D_L) en dirección del campo eléctrico y el *Coeficiente de difusión transversal* (D_T) en dirección perpendicular al campo, y paralelas a los electrodos.

Con la técnica Pulsada de Townsend sólo es posible estudiar la difusión longitudinal, y se reporta normalizada a la densidad como ND_L ya que, si bien $D_L \sim 1/N$, entonces el producto ND_L es constante. Sus unidades son $cm^{-1}s^{-1}$.

3.4.6. Coeficiente de ionización efectiva (α_e)

Para describir el coeficiente de ionización efectiva, es necesario recordar la definición de los coeficientes de ionización por impacto electrónico (α) y el coeficiente de captura electrónica (η).

Coeficiente de ionización por impacto electrónico (α)

Este parámetro cuantifica la probabilidad de ionización por impacto en un gas. Se le conoce como el primer coeficiente de ionización de Townsend.

Coeficiente de captura electrónica (η)

Este parámetro indica el número de iones negativos formados por captura electrónica, por unidad de longitud en la dirección del campo eléctrico.

Coeficiente de ionización efectiva (α_e)

El coeficiente de ionización efectiva, es la diferencia entre los coeficientes de ionización y captura electrónica ($\alpha_e = \alpha - \eta$). Siendo de esta manera, un indicativo del fenómeno predominante en la ionización en el seno del gas.

El coeficiente de ionización depende directamente de la densidad del gas: a mayor densidad, mayor número de ionizaciones por unidad de longitud. Siendo así, al normalizar este coeficiente a la densidad, se vuelve constante. Lo mismo ocurre con la captura electrónica. El coeficiente de ionización efectiva normalizado a la densidad del gas.

$$\frac{\alpha_e}{N} = \frac{\alpha - \eta}{N} \quad 3.33$$

y sus unidades son cm^2 . El valor de E/N al cual el coeficiente de ionización es igual a cero ($\alpha - \eta = 0$) se le conoce como valor crítico o valor límite, E/N_{crti} o E/N_{lim} .

4. Desarrollo experimental

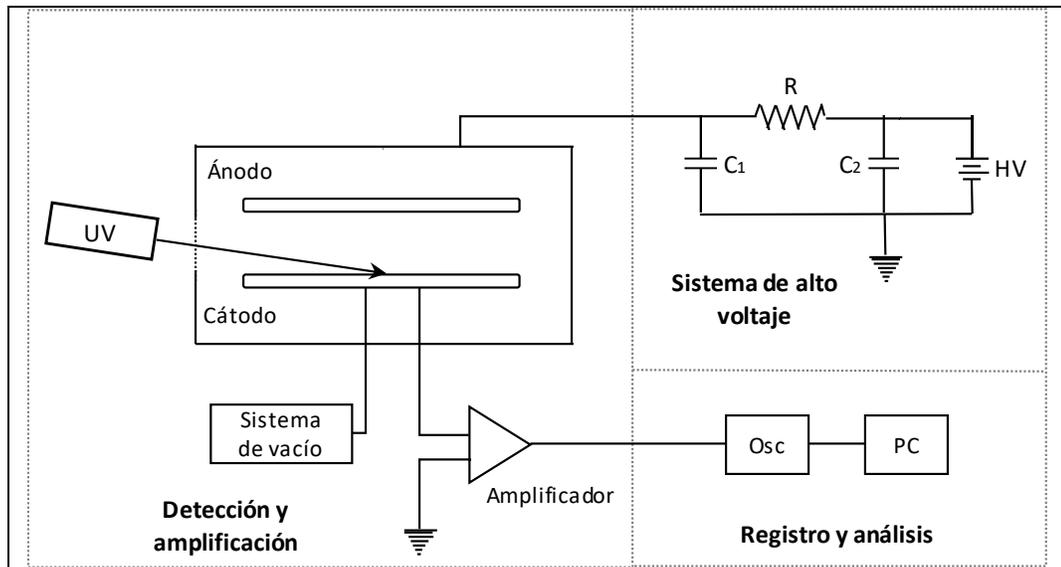
4.1. Técnica Pulsada de Townsend

Una de las técnicas utilizadas para el estudio de los fenómenos de transporte electrónico de gases es la Técnica Pulsada de Townsend (TPT, por sus siglas en inglés). Esta técnica consiste básicamente en la medición de la corriente de desplazamiento en función del tiempo, generada por los electrones e iones producidos mediante colisiones ionizantes en el seno de un campo eléctrico homogéneo, formado por un capacitor de placas paralelas sujeto a una diferencia de potencial.

Comúnmente, en la TPT, los electrones iniciales son liberados del cátodo mediante efecto fotoeléctrico a través de una fuente de luz externa. Durante su recorrido, el electrón colisionará con las moléculas del gas, incrementando los portadores de carga dentro de éste, que eventualmente genera una avalancha de electrones e iones entre los electrodos. La TPT se utiliza en la región de pre-ruptura del gas. La forma de los pulsos de corriente, está determinada por los parámetros de transporte de los portadores de carga en el capacitor de placas paralelas. Los parámetros de ionización y transporte dependen de la densidad de los portadores de carga y de la energía que el campo eléctrico ejerce sobre ellos.

Por lo tanto, los parámetros obtenidos mediante ésta técnica TPT se reportan en función del campo eléctrico normalizado a la densidad (E/N), en unidades Townsend. $1 Td = 10^{-17} V.cm^2$.

En la Figura 4.1 se presenta el arreglo experimental utilizado en laboratorio.



a) Esquema simplificado de la cámara TPT.



b) Cámara TPT en el laboratorio Plasma de Baja Temperatura del Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM.

Figura 4.1. Arreglo experimental utilizado en el desarrollo del presente trabajo. a) Esquema simplificado de la cámara TPT. b) Cámara TPT.

4.1.1. Arreglo experimental

El proceso experimental incluye la limpieza de la cámara, preparación de muestras, búsqueda del intervalo de E/N a medir, búsqueda del E/N crítico, medición de los transitorios electrónicos para intervalos de E/N y la medición a diferentes presiones absolutas.

La cámara utilizada para la medición de descargas pulsadas está formada básicamente por una cámara de descarga, fuente de electrones, sistema de alto voltaje y un sistema de alto vacío.

La cámara de descargas consta de un capacitor de placas paralelas formado por electrodos planos y separados por una distancia d de 31 mm. Los electrodos utilizados son de acero inoxidable (ánodo) y de aluminio (cátodo) con un diámetro de 120 mm y bordes redondeados con un radio de 0.6 mm. Los electrodos planos utilizados durante la experimentación se muestran en la Figura 4.2.

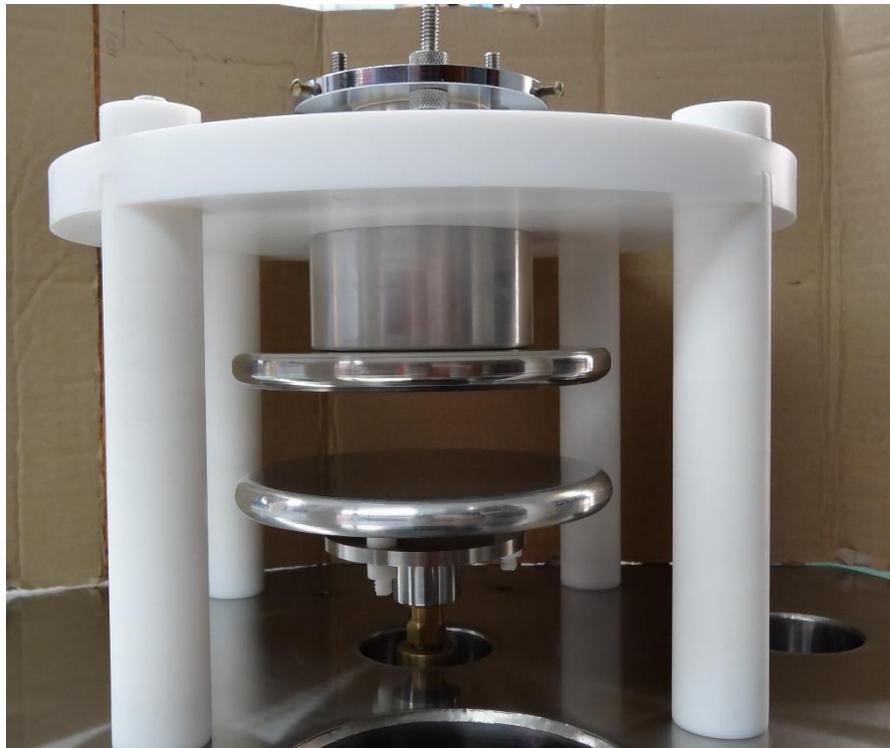


Figura 4.2. Arreglo de electrodos utilizados en la experimentación.

El ánodo tiene una perforación de 15 mm de diámetro al centro del electrodo para permitir el paso desde el exterior de un haz de luz. En esta perforación se coloca una malla de cobre electroformado con una distribución de 3 líneas/mm. La Figura 4.3 muestra el cátodo y la malla de cobre utilizada para uniformizar el campo eléctrico entre electrodos.



Figura 4.3. Malla de cobre electroformado para homogeneizar el campo eléctrico entre los electrodos.

La fuente de luz utilizada es un láser Nd-YAG con una longitud de onda (λ) de 1064 nm en la fundamental y un ancho de pulso de 4-5 ns. Las longitudes de onda empleadas en la experimentación se ubican en la región del ultravioleta (UV) con valores de 266 y 355 nm con 3mJ y 4mJ respectivamente.

El sistema de alto voltaje está formado por una fuente de corriente directa (CD) que proporciona un voltaje máximo de 5000 Volts y un filtro Pi, resistivo-capacitivo, para limitar el acoplamiento de señales de alta frecuencia a través de la fuente. La salida del filtro se conecta al ánodo del capacitor de placas paralelas.

Por último, el sistema de alto vacío está formado por dos bombas de extracción, una bomba rotatoria con capacidad de llegar a una presión de 10^{-3} Torr y una bomba de alto flujo (turbo-molecular) con una capacidad de 10^{-2} a

10^{-9} Torr. El alto vacío garantiza la limpieza de las paredes internas de la cámara y la superficie de los electrodos, evitando que partículas de otros gases se mezclen con las muestras bajo estudio y se obtengan resultados erróneos.

4.1.2. Validación del campo eléctrico homogéneo en la cámara TPT

El arreglo de electrodos utilizado en la cámara de Townsend, satisface los requerimientos para obtener un campo eléctrico homogéneo [56]. La validación de esta afirmación se realizó mediante el uso de software de análisis y resolución por elemento finito y, mediante la estimación del factor de utilización del campo eléctrico.

El estudio del arreglo se realizó con base en el análisis axisimétrico de los componentes. Definiendo la geometría de la cámara, la geometría de los componentes, una tensión máxima de 5 kV (voltaje máximo de la fuente de voltaje) y, conectando el cátodo y la envolvente al potencial de tierra.

El análisis se realizó para cuatro escenarios diferentes del arreglo capacitivo:

- Electrodo con aristas
- Electrodo redondeado
- Electrodo redondeado, ánodo con barreno
- Electrodo redondeado, ánodo con malla

Los resultados obtenidos de las simulaciones de los cuatro escenarios se presentan en el Apéndice A.

La Figura 4.4 muestra el comparativo de la concentración de esfuerzos mediante el análisis del gradiente y la distribución de las líneas de campo eléctrico, del escenario más crítico y la configuración final del arreglo capacitivo de placas paralelas de la cámara experimental. En esta figura es posible observar un comportamiento cuasi-homogéneo en los casos mostrados, con un gradiente de campo eléctrico de 3600 V/mm en el electrodo con aristas y un gradiente de 320 V/mm en el electrodo de bordes redondeados.

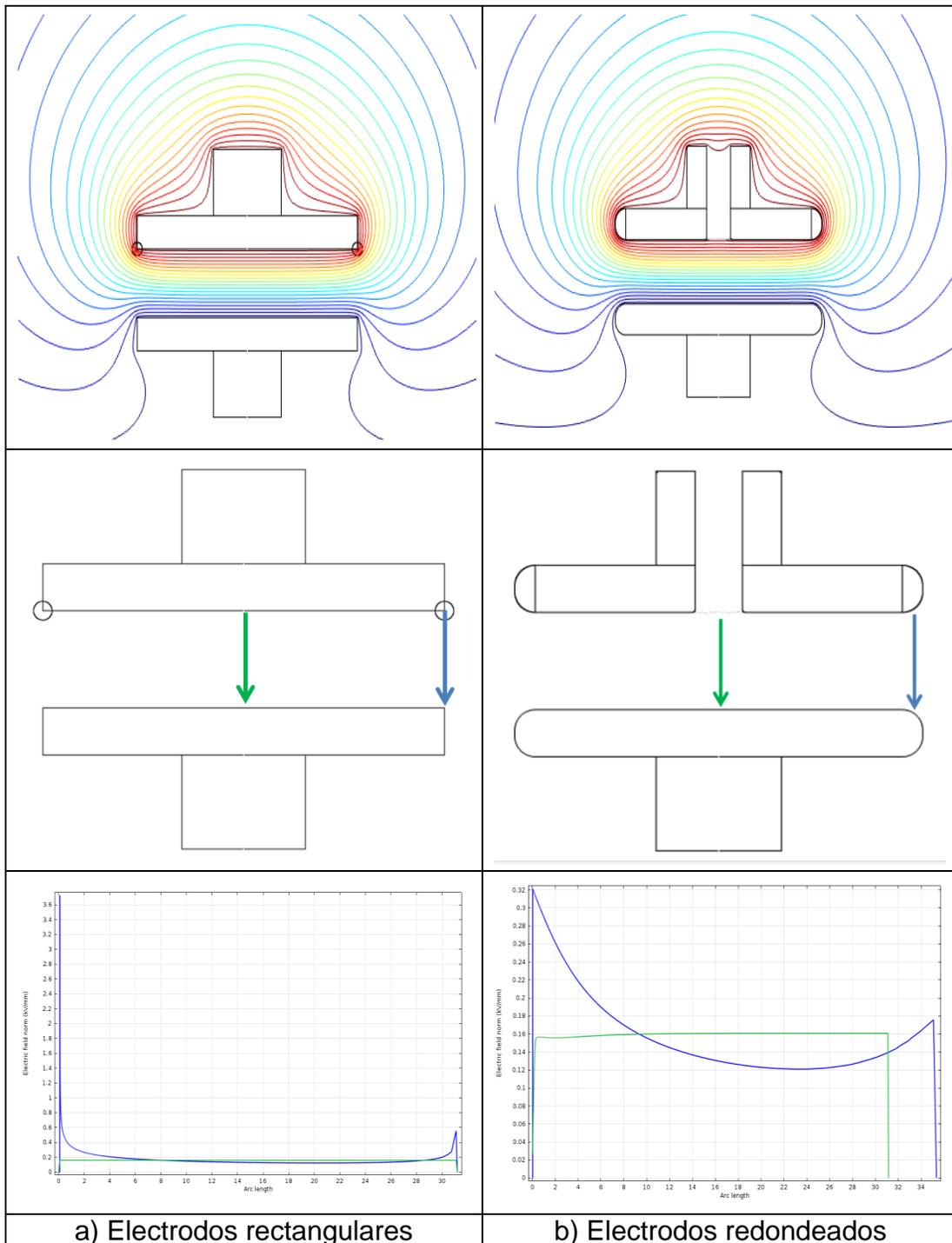


Figura 4.4. Gradiente electrico y distribución de líneas de campo eléctrico entre electodos. a) Electrodo planos con aristas. b) Electrodo planos con bordes redondeados ($r=0.6\text{mm}$)

En el electrodo sin perforación las líneas de campo permanecen constantes en toda la superficie del electrodo. Por el contrario, el electrodo con una perforación de 15 mm de diámetro al centro del electrodo, las líneas de campo tienen una diferencia de potencial de 4 V hasta una distancia de 8 mm a partir del ánodo.

De acuerdo con la simulación, la diferencia de potencial en los bordes de los electrodos sin redondear es superior a 22 veces la tensión al centro del arreglo capacitivo y 2 veces la tensión con electrodos con un radio de 0.6 mm.

Además, se realizó de forma sencilla la verificación del factor de utilización η del campo eléctrico, mediante la siguiente expresión [56]

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} \quad 4.1$$

$$E_{mean} = \frac{V}{d} \quad 4.2$$

donde: V es el voltaje máximo entre placas, 4900 volts; d es la distancia entre electrodos, 31 mm y; E_{max} es el campo eléctrico en el arreglo capacitivo, 160 V/mm.

Sustituyendo los valores en la expresión (4.1), se obtiene un factor de utilización del 0.99 p.u.

4.1.3. Movilidad electrónica normalizada

Debido a la cantidad de información registrada durante el tiempo de evaluación de un gas para la obtención de sus parámetros de transporte y a la necesidad de comparar los resultados entre diferentes mezclas, es necesario normalizar el cálculo de dichos parámetros.

Anteriormente se definió a la movilidad de los portadores de carga como la constante de proporcionalidad entre la velocidad de deriva y la intensidad del campo eléctrico aplicado que, de forma general, depende de las condiciones de prueba de cada experimento.

Por tal motivo, se utiliza el concepto de *movilidad reducida* que se define como el valor de la movilidad que se lleva a una temperatura de 273 K y a una presión de una atmósfera;

$$K_0 = \frac{NK}{N_0}$$

donde K_0 es la movilidad reducida y $N_0 = 2.69 \times 10^{25} m^{-3}$. Como K_0 depende del parámetro E/N la expresión se reduce a la siguiente expresión [50,55]

$$K_{0i} = \frac{v_i}{N_0(E/N)} \quad 4.3$$

donde K_{0i} es la movilidad para cualquier portador de carga.

4.1.4. Precisión o error

El error presente en el desarrollo experimental es intrínseco a las características de la instrumentación utilizada y al grado de pureza de las muestras del gas bajo estudio.

Debido a la naturaleza de las corrientes electrónicas generadas y la electronegatividad de los gases analizados, se requiere de equipos con una sensibilidad y velocidad de respuesta muy alta.

En las Tablas 4.1 y 4.2 se presenta la pureza de los gases muestra y el grado de precisión de los equipos utilizados.

Tabla 4.1. Precisión de los equipos del arreglo experimental

| Elemento | Magnitud | Precisión |
|-------------------|-------------------|---------------|
| Micrómetro | Paso del husillo | $\pm 2 \mu m$ |
| Baratrón | Presión absoluta | 0.01 % |
| Termopar (tipo K) | Temperatura | 0.2% |
| Fuente de voltaje | Voltaje de salida | 0.1% |
| Láser | Ancho de pulso | $\pm 1 ns$ |
| | Energía | 10 % |

Tabla 4.1. Continuación

| Elemento | Magnitud | Precisión |
|--------------|---------------------|--|
| Amplificador | Transimpedancia | $\pm 1\%$ |
| Osciloscopio | Tiempo de elevación | 8.75 ns |
| | Medición de voltaje | $\pm (3\% \times \text{lectura} + 0.05 \text{ div})$ |

Tabla 4.2. Concentración de los gases bajo estudio

| Elemento | Tipo | Pureza |
|-------------------|---------------------|----------|
| N ₂ | Cromatográfico | 99.998 % |
| CO ₂ | Extra seco | 99.800 % |
| SF ₆ | Comercial | 99.800 % |
| CF ₃ I | Grado investigación | 99.000 % |

4.2. Adquisición y acondicionamiento de resultados

En este capítulo se indicará el proceso de registro y adquisición de los pulsos transitorios, reducción de ruido externo, el análisis de las formas de onda y la determinación de los parámetros de transporte electrónico.

4.2.1. Adquisición de pulsos transitorios

Las corrientes generadas por las descargas en el régimen de Townsend son de magnitudes muy pequeñas, por lo que son acondicionadas a través de un amplificador de transimpedancia (corriente de entrada, voltaje de salida) con una ganancia de 100 kV/A, un tiempo de ascenso de 10 ns y un ancho de banda de 40 MHz.

La señal de voltaje amplificada es visualizada en un osciloscopio con un ancho de banda de 100 MHz para su análisis previo y posterior registro del transitorio. La Figura 4.5 muestra el uso del amplificador de transimpedancia y su conexión al osciloscopio para la visualización de la forma de onda del pulso transitorio.

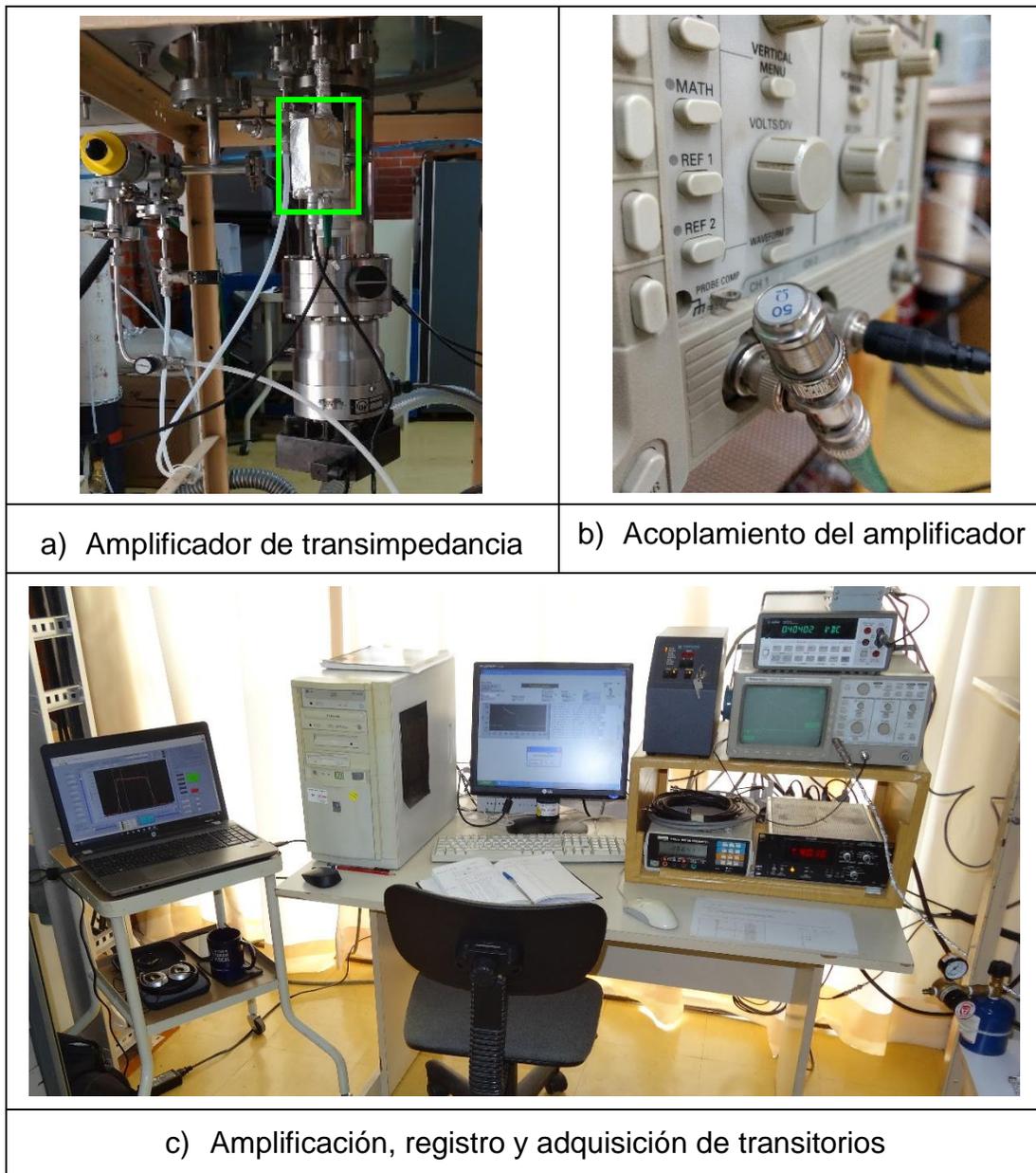


Figura 4.5. Amplificación y visualización de los pulsos transitorios medidos.

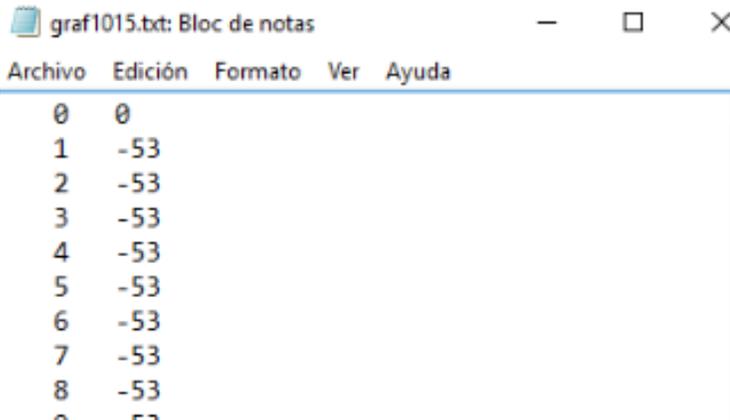
El software desarrollado por el Depto. de Ciencias Básicas de la UAM-Azcapotzalco en la plataforma de LabView, calcula el voltaje de prueba para obtener el valor deseado del campo normalizado (E/N), con base a las condiciones de presión (p), temperatura de prueba (t_p) y distancia entre

placas (d). El cálculo del voltaje aplicado (V_a) se realiza mediante la siguiente expresión

$$V_a = \frac{A * E/N * d * p}{273.15 + t_p} \quad 4.4$$

De esta manera, es posible establecer el intervalo de E/N en el cual los flancos de ascenso y descenso del pulso son claramente identificados, permitiendo determinar el tiempo de tránsito de los portadores de carga en la avalancha.

Una vez ajustado el voltaje de prueba, se registra el pulso promedio de 200 descargas, generando un archivo de texto que lleva por nombre el número de “disparo”, asociado a un valor de E/N y una presión de prueba específica. El archivo contiene dos columnas, que corresponden a los valores en el eje de las abscisas (X) y en el eje de las ordenadas (Y) de cada uno de los puntos que forman el pulso transitorio. En la Figura 4.6 se puede observar un archivo de texto correspondiente.



| Archivo | Edición | Formato | Ver | Ayuda |
|---------|---------|---------|-----|-------|
| 0 | 0 | | | |
| 1 | -53 | | | |
| 2 | -53 | | | |
| 3 | -53 | | | |
| 4 | -53 | | | |
| 5 | -53 | | | |
| 6 | -53 | | | |
| 7 | -53 | | | |
| 8 | -53 | | | |
| 9 | -53 | | | |

Figura 4.6. Archivo de texto de un transitorio.

Además, este software genera un archivo en formato texto, identificado con el nombre “bitácora” más la mezcla bajo estudio. Este archivo contiene información de las condiciones de prueba, asociadas a cada uno de los

disparos registrados en el intervalo de E/N establecido para la evaluación de cada mezcla en particular.

La Figura 4.7 muestra un archivo de texto con las variables medidas durante la evaluación de una mezcla.

10022017 Bitacora Veintiseis 50CF3I-10SF6-40CO2.txt: Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Lunes, 02 de Octubre de 2017

| Disp | E/N | Torr | D | Volt | Tmp | nS/div | V/div |
|------|--------|------|-----|-------------|-----|--------|-----------------|
| 1001 | 10.00 | 5.04 | 3.1 | 52.386000 | | 21.2 | 25.000 0.100000 |
| 1002 | 0.00 | 5.04 | 3.1 | 1.025000 | | 21.3 | 25.000 0.100000 |
| 1003 | 0.00 | 5.04 | 3.1 | 0.245000 | | 21.2 | 25.000 0.100000 |
| 1004 | 300.00 | 5.04 | 3.1 | 1537.780000 | | 21.2 | 25.000 0.100000 |
| 1005 | 305.00 | 5.05 | 3.1 | 1568.100000 | | 21.1 | 25.000 0.100000 |

Figura 4.7. Archivo de texto “bitácora” de medición.

4.2.2. Acondicionamiento de los pulsos medidos

La amplitud de las corrientes medidas se encuentra en el orden de 10^{-6} Amperes (μA), por lo que se requiere reducir al mínimo posible las señales de alta frecuencia acopladas al circuito de medición.

Como se mencionó anteriormente, la fuente de voltaje cuenta con un filtro Pi (pasa bajas) cuya salida se conecta al ánodo del capacitor de placas paralelas. Además, se instaló un transformador de aislamiento en el circuito de alimentación para la instrumentación del arreglo experimental y, finalmente; se redujo mediante software el ruido medido en la experimentación.

La Figura 4.8, muestra un pulso medido en la cámara de Townsend. En la imagen, es posible observar el ruido antes, durante y después del transitorio. Las pequeñas oscilaciones son propias del arreglo experimental. Además, en la imagen se observa un pico en el flanco de subida del transitorio; este pico es generado por efectos parásitos entre el capacitor de placas paralelos y la red externa.

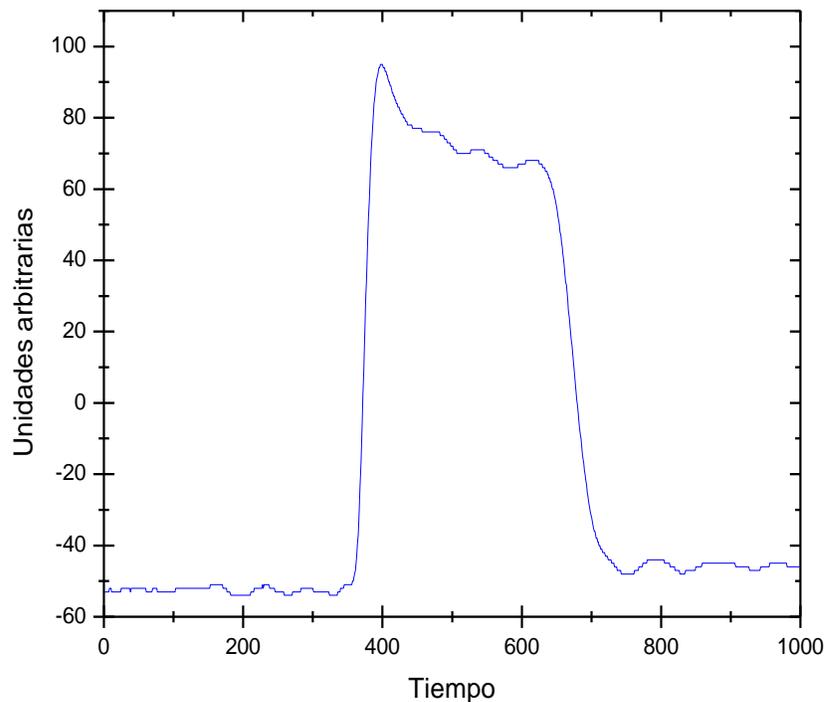


Figura 4.8. Pulso transitorio electrónico experimental.

Por lo anterior, una vez establecido el intervalo de E/N a evaluar para cada una de las presiones de prueba de las muestras bajo estudio, se determina la sensibilidad del circuito de medición y, mediante el uso de un programa desarrollado por el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM en lenguaje Phyton, se obtienen los pulsos finales, restando el ruido registrado a cada uno de los pulsos medidos.

La Figura 4.9 muestra los archivos que se ejecutan para reducir el ruido en los transitorios medidos. Los nuevos archivos generados contienen los datos numéricos de los pulsos transitorios con la disminución del ruido del arreglo experimental.

En la Figura 4.10 se pueden observar los pulsos transitorios acondicionados para su análisis. La imagen muestra el pico de corriente en el flanco de subida del transitorio. Sin embargo, para el cálculo del coeficiente de ionización no tiene efecto alguno, debido a que únicamente se utiliza la parte central de la meseta del transitorio.

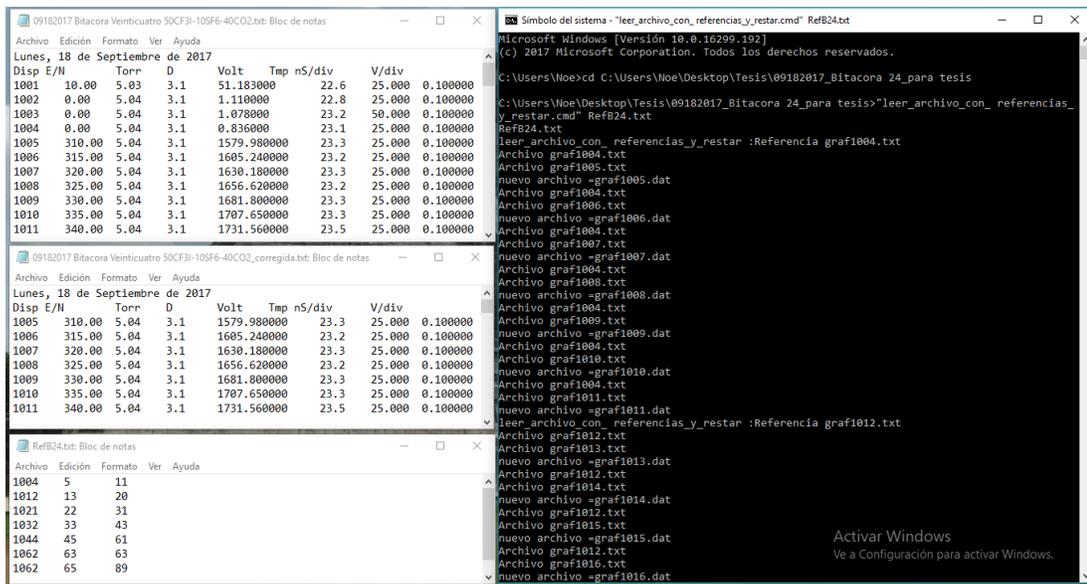


Figura 4.9. Ejecución del programa para reducir el ruido generado por el propio arreglo experimental

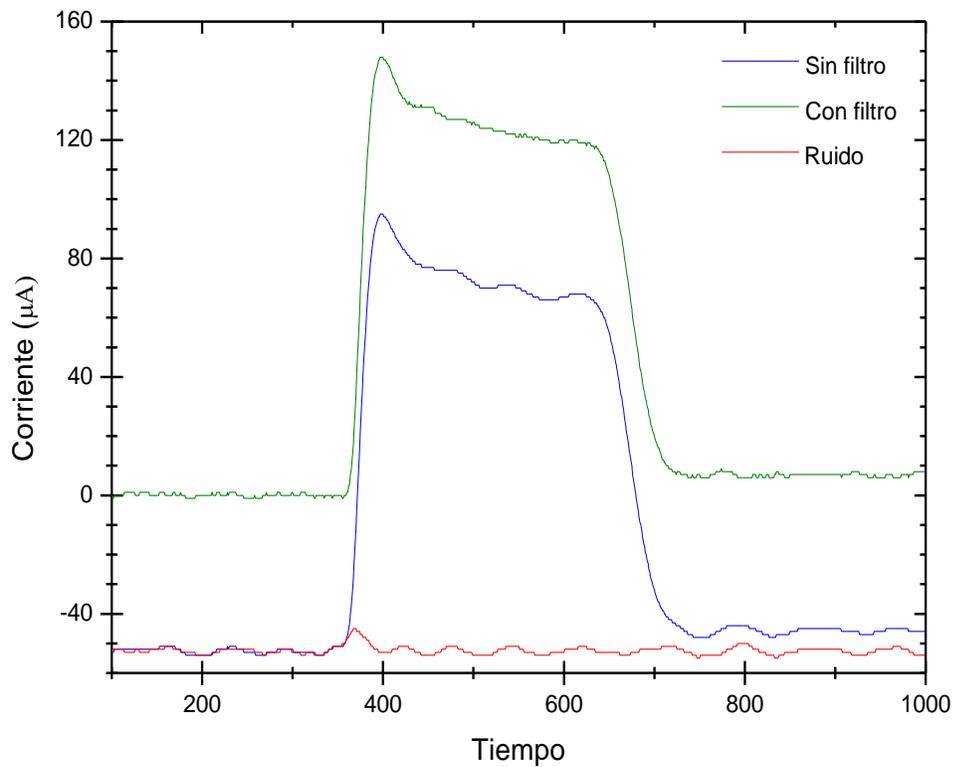


Figura 4.10. Acondicionamiento de pulsos transitorios.

4.2.3. Análisis de las formas de onda

De manera general, la forma de onda de los pulsos transitorios se compone de un crecimiento inicial a partir de cero; una zona central o meseta, un lento decaimiento de la amplitud y al final; una corriente excedente de amplitud superior a cero, debida a los iones lentos.

Idealmente, en una descarga eléctrica, los fotoelectrones iniciales son liberados simultáneamente desde el cátodo y se desplazan hacia el ánodo en ausencia de difusión

Sin embargo, un pulso transitorio real presenta una pendiente en los flancos de inicio y fin de éste. Lo anterior, debido a la naturaleza Gaussiana del pulso de luz UV y de la difusión electrónica. Además, de la contribución del tiempo de respuesta de la instrumentación utilizada para la detección y registro de la corriente de las descargas.

La Figura 4.11 muestra los pulsos transitorios de corriente, teórico y experimental, generados por las descargas eléctricas mediante la técnica pulsada de Townsend.

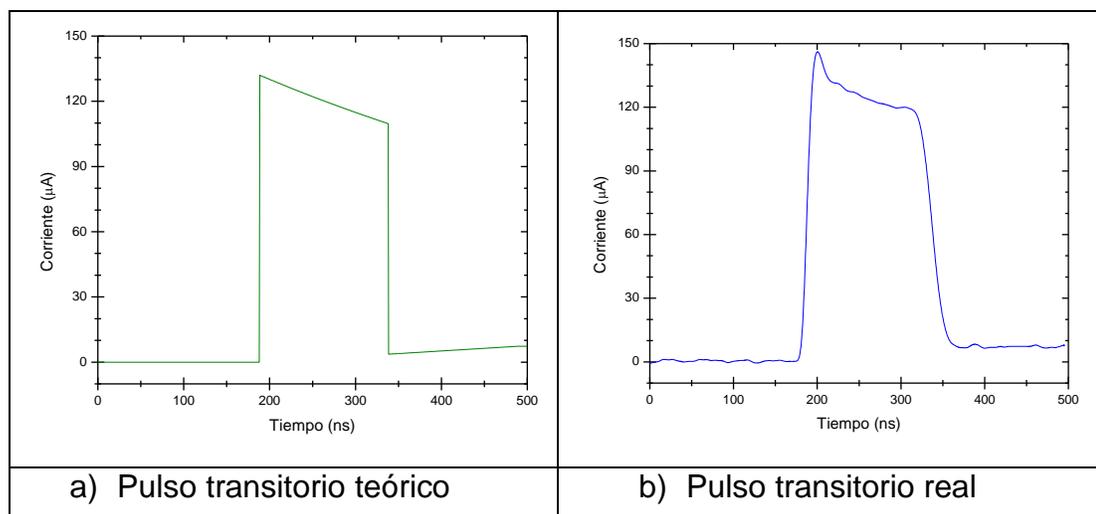


Figura 4.11. Pulsos transitorios de la corriente electrónica. a) pulso transitorio teórico y b) pulso transitorio real.

Debido a la diferencia en la movilidad de los electrones y los iones, la corriente total de la descarga es la suma de la corriente de la componente electrónica y la corriente de la componente iónica $i_T = i_e + i_+ + i_-$. Debido a la diferencia de masas entre los componentes de la corriente total, dichas partículas poseen tiempos de desplazamiento muy diferentes.

La componente electrónica es de corta duración, con una base de tiempo de nanosegundos y se debe al arrastre de los electrones durante su régimen de arrastre al ánodo. La componente iónica, por otro lado, es más lenta que la electrónica y ocurre con bases de tiempo del orden de microsegundos. Es decir, la contribución de cada partícula a la corriente total, se realiza en regímenes de tiempo diferentes. Por ello es necesario realizar la sustracción correspondiente de la corriente iónica para obtener el coeficiente de ionización efectivo (α_e) con la mayor precisión posible.

El cálculo de los parámetros de transporte electrónico se realiza con la ayuda del Software “Análisis_transitorios_v_1_4” desarrollado por el Depto. de Ciencias Básicas de la UAM-Azcapotzalco en la plataforma de LabView [57]. Inicialmente, se debe determinar el tiempo de transito electrónico. Mediante el uso del software, se localizan los tiempos de cada una de las componentes del pulso transitorio.

La Figura 4.12 muestra los cursores utilizados para el cálculo del tiempo transitorio, el significado de estos cursores, es el siguiente.

T_1 , inicio de la avalancha

T_2 , inicio de la región de ionización

T_3 , fin de la región de ionización

T_4 , tiempo de arribo promedio, fin de la componente electrónica

T_5 , componente iónica

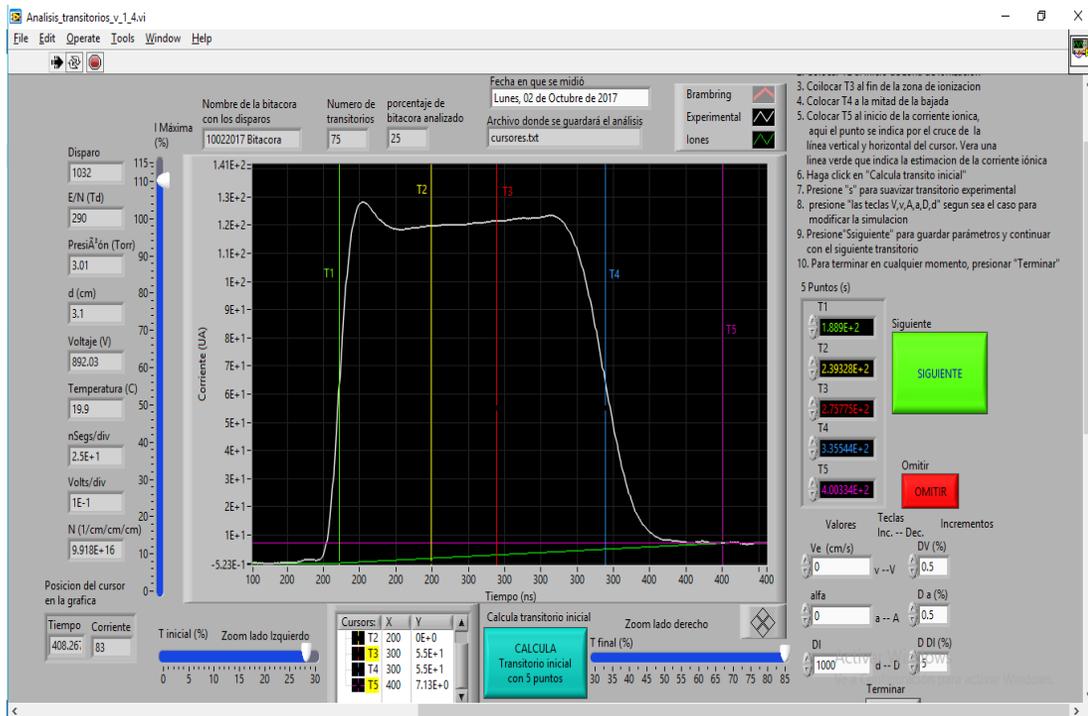


Figura 4.12. Determinación del tiempo de transito electrónico

Considerando que n_0 fotoelectrones son liberados simultáneamente desde el cátodo en un tiempo $t = 0$ y que el tiempo de transito electrónico (T_e), es el tiempo entre el inicio de la avalancha y el fin de la componente electrónica ($T1 - T4$), los cuales están relacionados con el tiempo de salida del cátodo y arribo al ánodo, a una distancia d entre electrodos.

Conociendo la separación d entre electrodos y el tiempo de tránsito electrónico, se obtiene la velocidad de deriva de acuerdo con

$$v_e = \frac{d}{T_e} \quad 4.5$$

Considerando el planteamiento de Raether [55], cuando un electrón con suficiente energía deja el cátodo, tendrá (α) colisiones y (η) capturas por unidad de longitud (x). De esta manera, el número de electrones a una distancia (dx) es la diferencia entre el número de electrones liberados por ionización y el número de electrones capturados.

$$dn_e(x) = dn_p(x) + dn_n(x)$$

$$dn_e(x) = n_e(x)(\alpha - \eta)dx \quad 4.6$$

donde n_p es el número de iones positivos y n_n es el número de iones negativos.

Por tanto, para conocer el número de electrones en una posición (x) determinada; se integra (4.6) en función de (4.5)

$$n_e(x) = n_e(0)e^{(\alpha-\eta)x} \quad 4.7$$

donde $n_e(0)$ es el número de fotoelectrones liberados del cátodo (n_0) en un tiempo T_0 . Considerando que todos los electrones dejan el cátodo simultáneamente en $n_0 = 0$.

Sustituyendo $x = v_e t$ es posible calcular el número de electrones en cualquier momento del tiempo de tránsito electrónico ($0 < t < T_e$).

$$n_e(t) = n_0 e^{(\alpha-\eta)v_e t} \quad 4.8$$

Considerando que la corriente es la variación de la carga en función del tiempo ($i_e = q_0/t$) y que el número de electrones después de concluido T_e es cero (0); se obtiene la evolución temporal de la corriente producida por la componente electrónica.

$$I_e(t) = \begin{cases} \frac{q_0 n_0}{T_e} e^{(\alpha-\eta)v_e t}, & 0 \leq t \leq T_e \\ 0, & t \geq T_e \end{cases} \quad 4.9$$

El producto $(\alpha - \eta)v_e$ se obtiene del ajuste de la curva entre los tiempos $T2$ y $T3$ del transitorio. Sin embargo, el cálculo realizado por el programa de análisis considera la suma de las corrientes de arrastre de electrones e iones. Debido a su pequeñez relativa, la corriente iónica se aproxima con una recta, y se sustrae ($T5$) de la componente electrónica del transitorio.

En la Figura 4.13 se puede observar el cálculo de la corriente de desplazamiento a partir de una primera aproximación al pulso transitorio medido.

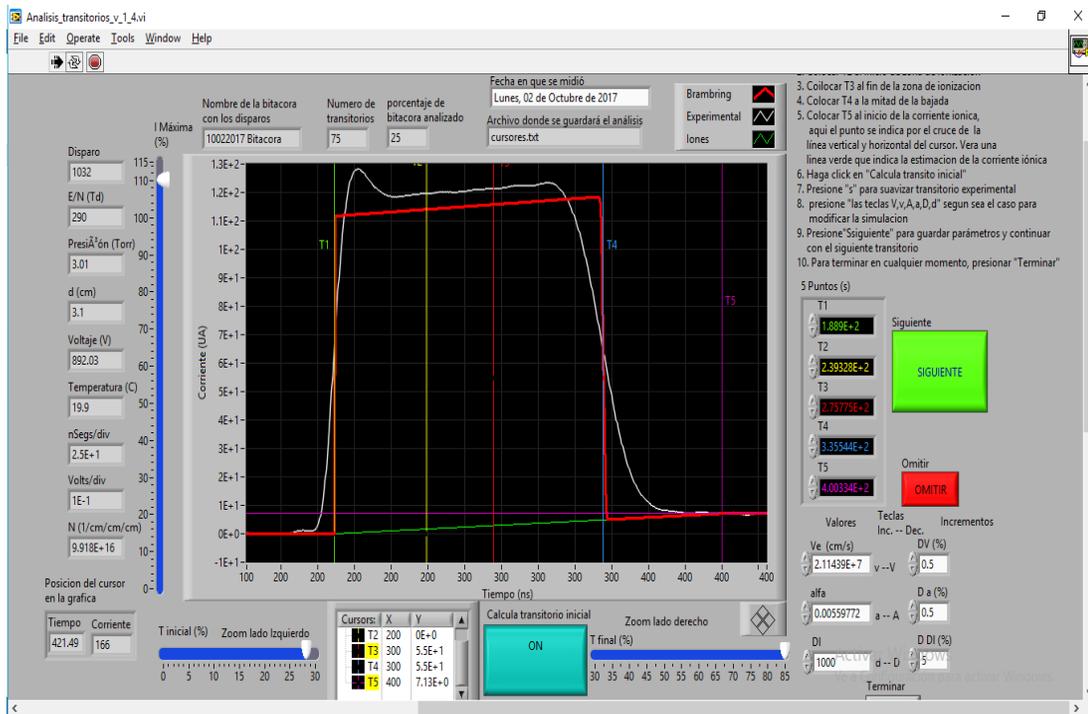


Figura 4.13. Cálculo del transitorio sin difusión

Posteriormente, el programa de análisis realiza una segunda aproximación del cálculo de la corriente, con base en el análisis realizado por Brambring [58] quien, partiendo de la ecuación de continuidad de los electrones, derivó una ecuación para la corriente electrónica total, considerando la difusión

$$i(t) = \frac{n_0 e v_e}{2d} \exp(\alpha_e v_e t) \left\{ \left[1 - \Phi \left(\frac{(v_e + \alpha_e D)t - d}{\sqrt{4Dt}} \right) \right] + \exp \left(\frac{v_e + \alpha_e D}{D} d \right) \left[\Phi \left(\frac{(v_e + \alpha_e D)t + d}{\sqrt{4Dt}} \right) - 1 \right] \right\} \quad 4.10$$

con Φ como la función de error

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-u^2) du \quad 4.11$$

Finalmente, el programa *Análisis_transitorios_v_1_4* permite modificar manualmente los valores ya calculados con la finalidad de encontrar el mejor ajuste posible.

En la Figura 4.14 se puede observar la aproximación del pulso teórico al pulso real mediante el ajuste manual del transitorio calculado a partir de los valores medidos. De acuerdo con los resultados, es posible observar una muy buena aproximación de los pulsos, con una pequeña diferencia al final de la difusión y la componente iónica de la corriente total de la descarga eléctrica.

Del ajuste de los transitorios, el programa de análisis crea un archivo de texto que contiene los datos de la bitácora de medición y los resultados del análisis de los transitorios. También genera un archivo con el ajuste de cada uno de los transitorios analizados. Este archivo contiene el tiempo de tránsito electrónico, la corriente experimental, la corriente iónica estimada y la corriente total del pulso.

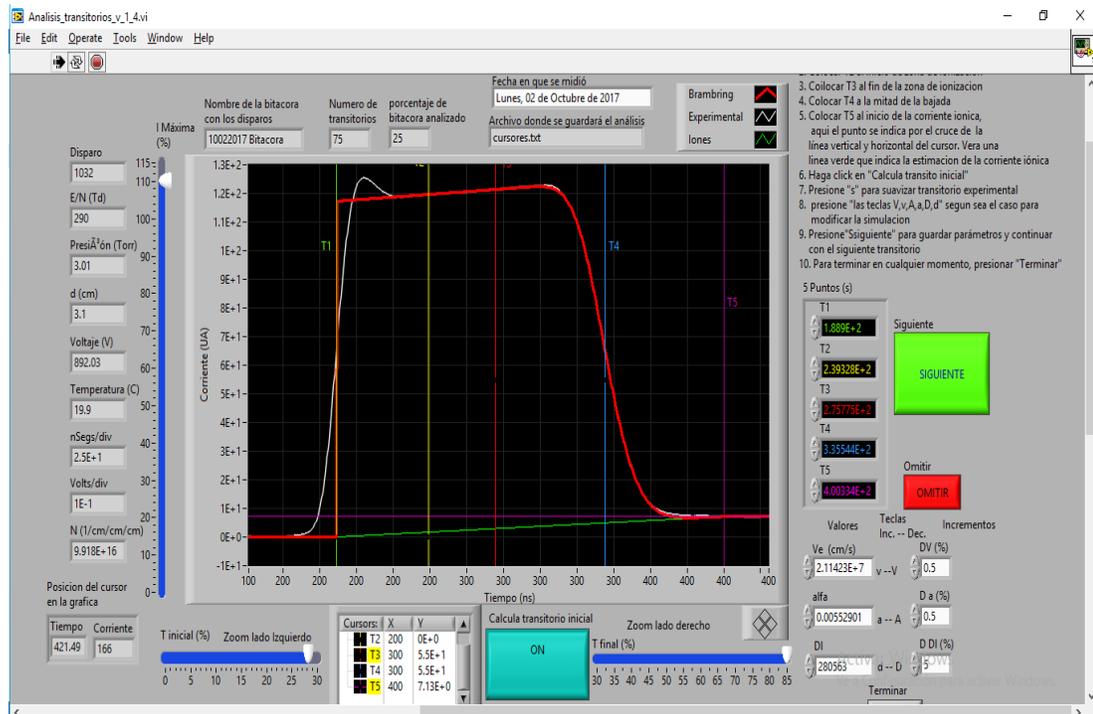


Figura 4.14. Ajuste de los transitorios medidos

La Figura 4.15 muestra los archivos generados del análisis y ajuste de los transitorios medidos de una mezcla bajo estudio mediante el programa de análisis.

| <p>Salida B25_355_nm_condif.txt: Bloc de notas</p> <p>Archivo Edición Formato Ver Ayuda</p> <p>Fecha de medición: Lunes, 02 de Octubre de 2017</p> <p>Medido por:nrcs</p> <p>Fecha de analisis :04/10/2017</p> <p>Analizado por :nrcs</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Shot #</th> <th>E/N Td</th> <th>Pressure Torr cm</th> <th>Distance Volts °C</th> <th>Voltage -</th> <th>Temperature -</th> <th>ns/div ns</th> <th>mv/div ns</th> <th>Tzero ns</th> <th>Tini ns</th> <th>Tfin cm2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1.009000E+3</td><td>2.800000E+2</td><td>5.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.425030E+3</td><td>1.950000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.010000E+3</td><td>2.850000E+2</td><td>5.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.462390E+3</td><td>1.940000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.011000E+3</td><td>2.900000E+2</td><td>5.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.487110E+3</td><td>1.940000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.012000E+3</td><td>3.000000E+2</td><td>5.020000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.541600E+3</td><td>1.960000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.013000E+3</td><td>3.050000E+2</td><td>5.020000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.565590E+3</td><td>1.970000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.014000E+3</td><td>3.100000E+2</td><td>5.020000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.592200E+3</td><td>1.960000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.017000E+3</td><td>2.750000E+2</td><td>4.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.126420E+3</td><td>1.990000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.018000E+3</td><td>2.800000E+2</td><td>4.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.148250E+3</td><td>1.970000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.019000E+3</td><td>2.850000E+2</td><td>4.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.169510E+3</td><td>1.960000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.020000E+3</td><td>2.900000E+2</td><td>4.010000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.189310E+3</td><td>1.960000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.021000E+3</td><td>2.950000E+2</td><td>4.020000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.211730E+3</td><td>1.990000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.022000E+3</td><td>3.000000E+2</td><td>4.020000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.231430E+3</td><td>2.000000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1.023000E+3</td><td>3.050000E+2</td><td>4.020000E+0</td><td>3.100000E+0</td><td>1.253900E+3</td><td>1.990000E+1</td><td>2.500000E+1</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> | Shot # | E/N Td | Pressure Torr cm | Distance Volts °C | Voltage - | Temperature - | ns/div ns | mv/div ns | Tzero ns | Tini ns | Tfin cm2 | 1.009000E+3 | 2.800000E+2 | 5.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.425030E+3 | 1.950000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.010000E+3 | 2.850000E+2 | 5.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.462390E+3 | 1.940000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.011000E+3 | 2.900000E+2 | 5.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.487110E+3 | 1.940000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.012000E+3 | 3.000000E+2 | 5.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.541600E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.013000E+3 | 3.050000E+2 | 5.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.565590E+3 | 1.970000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.014000E+3 | 3.100000E+2 | 5.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.592200E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.017000E+3 | 2.750000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.126420E+3 | 1.990000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.018000E+3 | 2.800000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.148250E+3 | 1.970000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.019000E+3 | 2.850000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.169510E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.020000E+3 | 2.900000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.189310E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.021000E+3 | 2.950000E+2 | 4.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.211730E+3 | 1.990000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.022000E+3 | 3.000000E+2 | 4.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.231430E+3 | 2.000000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | 1.023000E+3 | 3.050000E+2 | 4.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.253900E+3 | 1.990000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | <p>fit1029.dat: Bloc de notas</p> <p>Archivo Edición Formato Ver Ayuda</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Time(ns)</th> <th>Iexperimental</th> <th>Iion</th> <th>Itotal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.00000</td><td>-0.30000</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>0.50000</td><td>-0.30000</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>1.00000</td><td>-0.30000</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>1.50000</td><td>-0.29985</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>2.00000</td><td>-0.47238</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>2.50000</td><td>-0.29863</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>3.00000</td><td>-0.62053</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>3.50000</td><td>-0.29314</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>4.00000</td><td>-0.71228</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>4.50000</td><td>-0.27607</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>5.00000</td><td>-0.71259</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>5.50000</td><td>-0.23553</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>6.00000</td><td>-0.60163</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>6.50000</td><td>-0.15871</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>7.00000</td><td>-0.39038</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>7.50000</td><td>-0.03922</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>8.00000</td><td>-0.12122</td><td>0.00000</td><td>0.00000</td></tr> </tbody> </table> | Time(ns) | Iexperimental | Iion | Itotal | 0.00000 | -0.30000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.50000 | -0.30000 | 0.00000 | 0.00000 | 1.00000 | -0.30000 | 0.00000 | 0.00000 | 1.50000 | -0.29985 | 0.00000 | 0.00000 | 2.00000 | -0.47238 | 0.00000 | 0.00000 | 2.50000 | -0.29863 | 0.00000 | 0.00000 | 3.00000 | -0.62053 | 0.00000 | 0.00000 | 3.50000 | -0.29314 | 0.00000 | 0.00000 | 4.00000 | -0.71228 | 0.00000 | 0.00000 | 4.50000 | -0.27607 | 0.00000 | 0.00000 | 5.00000 | -0.71259 | 0.00000 | 0.00000 | 5.50000 | -0.23553 | 0.00000 | 0.00000 | 6.00000 | -0.60163 | 0.00000 | 0.00000 | 6.50000 | -0.15871 | 0.00000 | 0.00000 | 7.00000 | -0.39038 | 0.00000 | 0.00000 | 7.50000 | -0.03922 | 0.00000 | 0.00000 | 8.00000 | -0.12122 | 0.00000 | 0.00000 |
|--|-----------------------------|------------------|-------------------|-------------------|---------------|---------------|-----------|-----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|--|--|--|---|----------|---------------|------|--------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|----------|---------|---------|
| Shot # | E/N Td | Pressure Torr cm | Distance Volts °C | Voltage - | Temperature - | ns/div ns | mv/div ns | Tzero ns | Tini ns | Tfin cm2 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.009000E+3 | 2.800000E+2 | 5.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.425030E+3 | 1.950000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.010000E+3 | 2.850000E+2 | 5.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.462390E+3 | 1.940000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.011000E+3 | 2.900000E+2 | 5.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.487110E+3 | 1.940000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.012000E+3 | 3.000000E+2 | 5.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.541600E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.013000E+3 | 3.050000E+2 | 5.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.565590E+3 | 1.970000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.014000E+3 | 3.100000E+2 | 5.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.592200E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.017000E+3 | 2.750000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.126420E+3 | 1.990000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.018000E+3 | 2.800000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.148250E+3 | 1.970000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.019000E+3 | 2.850000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.169510E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.020000E+3 | 2.900000E+2 | 4.010000E+0 | 3.100000E+0 | 1.189310E+3 | 1.960000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.021000E+3 | 2.950000E+2 | 4.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.211730E+3 | 1.990000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.022000E+3 | 3.000000E+2 | 4.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.231430E+3 | 2.000000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.023000E+3 | 3.050000E+2 | 4.020000E+0 | 3.100000E+0 | 1.253900E+3 | 1.990000E+1 | 2.500000E+1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Time(ns) | Iexperimental | Iion | Itotal | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.00000 | -0.30000 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0.50000 | -0.30000 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.00000 | -0.30000 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.50000 | -0.29985 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.00000 | -0.47238 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.50000 | -0.29863 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.00000 | -0.62053 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.50000 | -0.29314 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.00000 | -0.71228 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.50000 | -0.27607 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.00000 | -0.71259 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5.50000 | -0.23553 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.00000 | -0.60163 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6.50000 | -0.15871 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.00000 | -0.39038 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7.50000 | -0.03922 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8.00000 | -0.12122 | 0.00000 | 0.00000 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| a) Bitácora de análisis y ajuste de transitorios | b) Ajuste de un transitorio | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figura 4.15. Archivos de salida con los parámetros de transporte electrónico.

Con base en lo descrito anteriormente, el comportamiento de la corriente total (I_T) de la descarga eléctrica debida a los procesos de ionización por colisión y de desionización por captura electrónica (α_e) puede tomar valores positivos, negativos o cero, cuando la ionización y la captura son iguales.

Ionización efectiva predominante

Cuando $\alpha_e > 0$, indica una mayor creación de pares electrón-ión por colisiones ionizantes sobre la captura de electrones.

La Figura 4.16 muestra el transitorio de la corriente de desplazamiento con un proceso de ionización superior al proceso de captura electrónica.

Ionización efectiva nula

Cuando $\alpha_e = 0$, indica que la cantidad de pares electrón-ión y los electrones capturados son las mismas, permaneciendo constante el número de

electrones durante la descarga. Al valor de E/N para el cual $\alpha_e = 0$ se le conoce como el valor de campo eléctrico crítico (E/N_{crit}).

La Figura 4.17 muestra el transitorio de la corriente de desplazamiento con un proceso de ionización nulo.

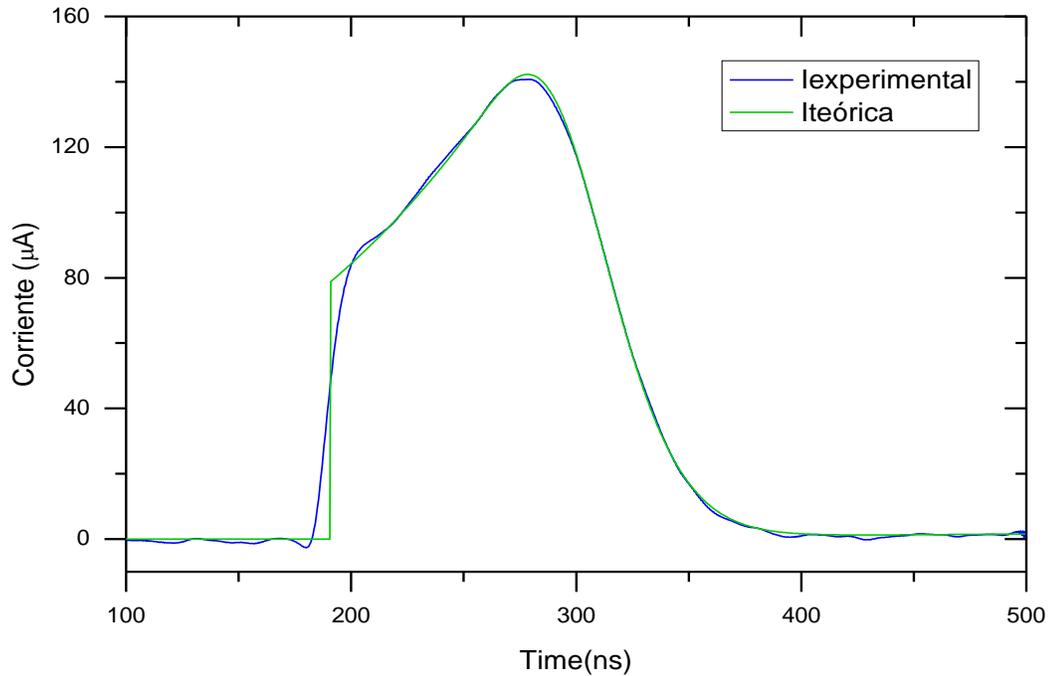


Figura 4.16. Transitorio con una ionización efectiva.

Captura electrónica predominante

Cuando $\alpha_e < 0$, indica que la captura electrónica es mayor al número de pares electrón-ión creados en la descarga.

La Figura 4.18 muestra el transitorio de la corriente de desplazamiento con un proceso de desionización por captura superior al proceso de ionización.

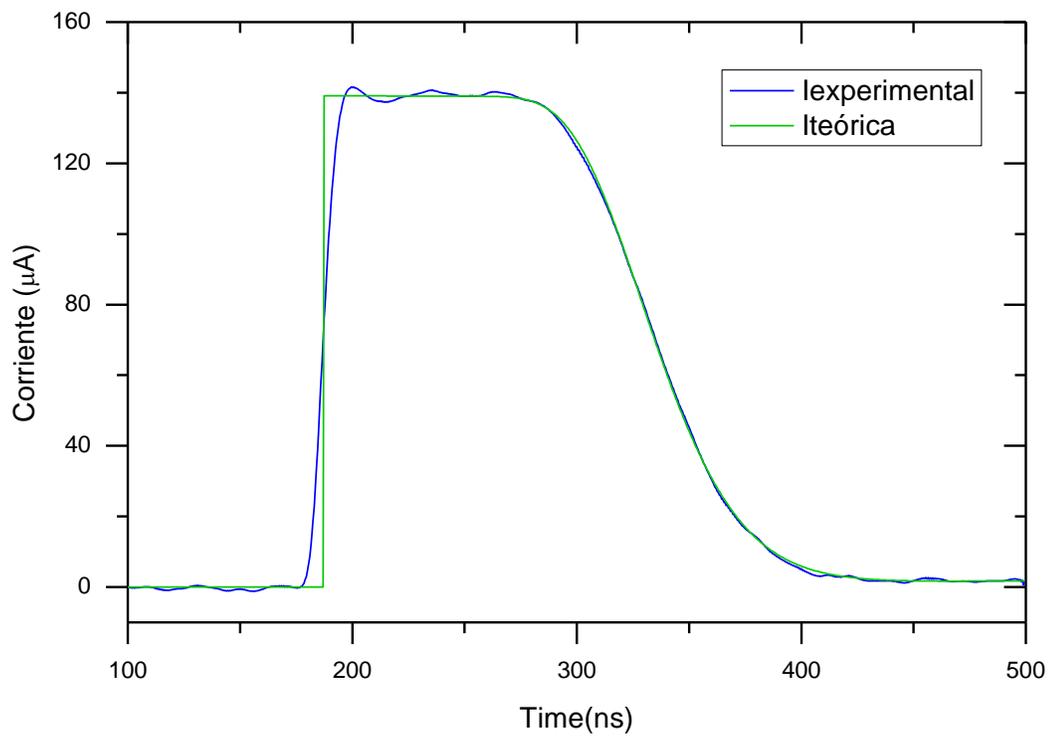


Figura 4.17. Transitorio con una ionización efectiva nula.

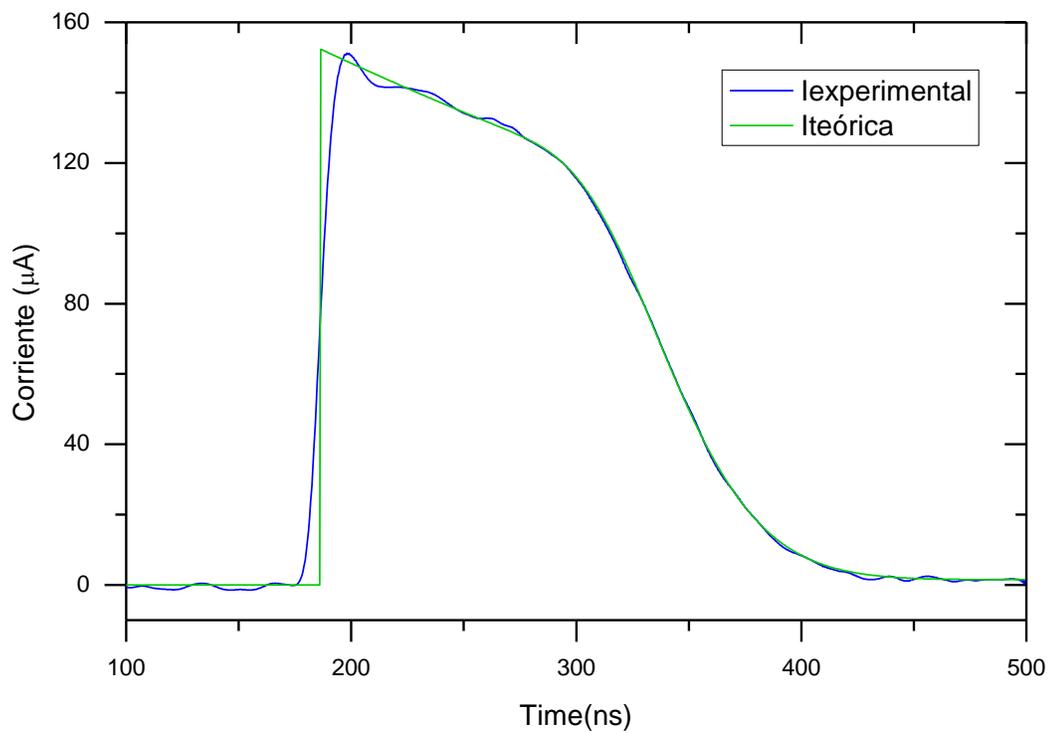


Figura 4.18. Transitorio con una captura electrónica predominante.

En la Figura 4.19 se puede apreciar la evolución temporal de la corriente de descarga en función del campo eléctrico normalizado (E/N). La figura muestra que para valores de E/N menores a 320 Td, la corriente presenta un proceso de captura electrónica, y a partir de un valor de $E/N=325$ Td, la corriente presenta un crecimiento. El valor crítico (E/N_{cri}) del campo eléctrico normalizado para el gas analizado, se encuentra entre 320 y 325 Td.

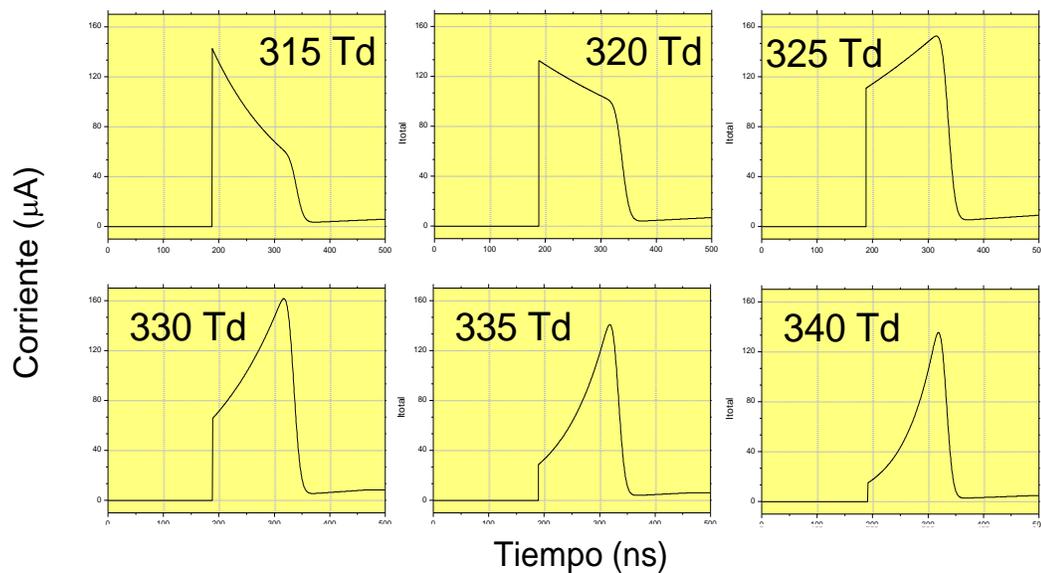


Figura 4.19. Evolución temporal de la corriente en función de E/N .

5. Mediciones y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados experimentales conseguidos en el desarrollo del presente trabajo. Los parámetros de transporte obtenidos son: el coeficiente de ionización efectiva, la velocidad de deriva y el coeficiente de difusión longitudinal.

Se presenta también la validación de las mediciones realizadas mediante la comparación de resultados obtenidos con el simulador Bolsig+.

5.1. Mezclas ternarias

Estos parámetros se obtuvieron para 4 gases puros y 10 mezclas ternarias con diferentes concentraciones. Los gases y mezclas evaluadas se enlistan a continuación.

| | |
|---|--|
| Nitrógeno, N ₂ | Hexafloruro de Azufre, SF ₆ |
| Dióxido de Carbón, CO ₂ | Trifluoriodometano, CF ₃ I |
| 10%CF ₃ I-30%SF ₆ -60% N ₂ | 10%CF ₃ I-30%SF ₆ -60% CO ₂ |
| 30%CF ₃ I-10%SF ₆ -60% N ₂ | 30%CF ₃ I-10%SF ₆ -60% CO ₂ |
| 10%CF ₃ I-50%SF ₆ -40% N ₂ | 10%CF ₃ I-50%SF ₆ -40% CO ₂ |
| 50%CF ₃ I-10%SF ₆ -40% N ₂ | 50%CF ₃ I-10%SF ₆ -40% CO ₂ |
| 40%CF ₃ I-40%SF ₆ -20% N ₂ | 40%CF ₃ I-40%SF ₆ -20% CO ₂ |

Todas las mediciones se realizaron a temperatura ambiente, entre 295 y 298 K (22° y 25° C), a presiones de 0.5 a 5 Torr (0.67 a 6.7 mBar) y en un intervalo de E/N entre 250 a 500 Td

En el análisis de los pulsos medidos, se aprecia el comportamiento exponencial de la componente electrónica debido al carácter electronegativo de las mezclas. Además, es posible identificar los tipos de ionización

predominante durante el intervalo de (E/N) , teniendo especial atención en el valor (E/N_{crit}) donde $\alpha_e = 0$.

5.2. Validación de resultados

Para validar los resultados obtenidos, se hizo la comparación de los parámetros de transporte de los gases puros SF₆, CF₃I y CO₂ con el simulador BOLSIG+ (versión 1.2), desarrollado por Gerjan Hagelaar (LAPLACE, Francia).

BOLSIG+ calcula los parámetros de transporte a través de la solución numérica de la ecuación de Boltzmann para electrones en gases débilmente ionizados en campos eléctricos uniformes, condiciones que típicamente aparecen en la mayor parte de los plasmas colisionales de baja temperatura [59].

Las Figuras 5.1 y 5.2 muestran la comparación de los parámetros de transporte los gases SF₆ y CF₃I, obtenidos durante la experimentación y los parámetros obtenidos mediante el simulador BOLSIG+ en función de E/N [59-61].

En la Figura 5.1 se observa un incremento en el error de la velocidad de deriva v_e entre los resultados experimentales y los resultados calculados por Bolsig+ a mayor E/N para el gas SF₆. La Tabla 5.1 indica el error calculado para los intervalos de E/N medidos.

Tabla 5.1. Error en la medición del coeficiente de velocidad electrónica

| Intervalo E/N (Td) | Error (%) |
|--------------------------|-----------|
| $Td > 380$ | > 2 |
| $360 < Td < 380$ | 1-2 |
| $Td < 360$ | < 1 |

Por otro lado, para el CF₃I en todo el intervalo de medición E/N presenta un error aproximado al 1%.

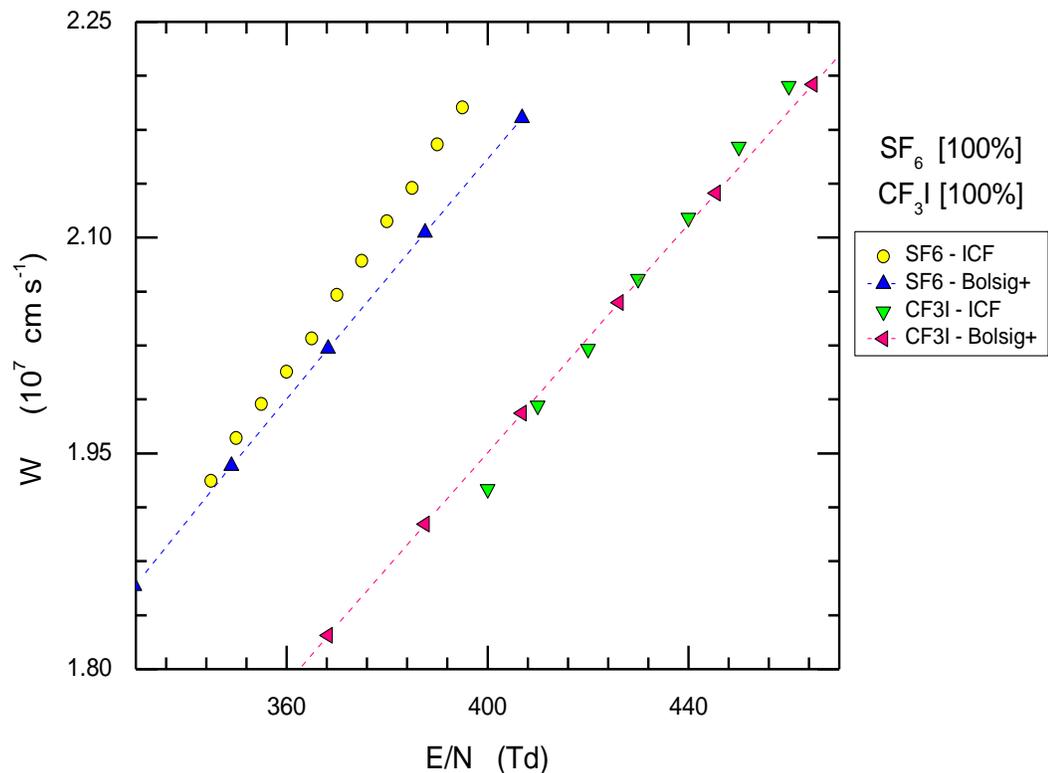


Figura 5.1. Variación de la velocidad de deriva del SF_6 y CF_3I en función de E/N .

De la comparación de velocidades de deriva entre los gases SF_6 y CF_3I se observa, que los electrones en SF_6 tienen una mayor velocidad de arrastre que en CF_3I . Esto se debe en parte a la mayor electronegatividad del CF_3I , que incrementa la captura electrónica en función del aumento de E/N .

En la Figura 5.2 se observa un muy buen acuerdo de α_e/N en los resultados experimentales y los calculados por Bolsig+ para ambos gases [59-61]. El coeficiente de ionización efectiva se verificó mediante el valor de campo eléctrico crítico (E/N_{crit}), teniendo como resultado un error calculado menor al 1% para ambas mezclas.

La Tabla 5.2, presenta el error estimado con base en los resultados obtenidos anteriormente [36-37] por el ICF de la UNAM y los resultados con Bolsig+.

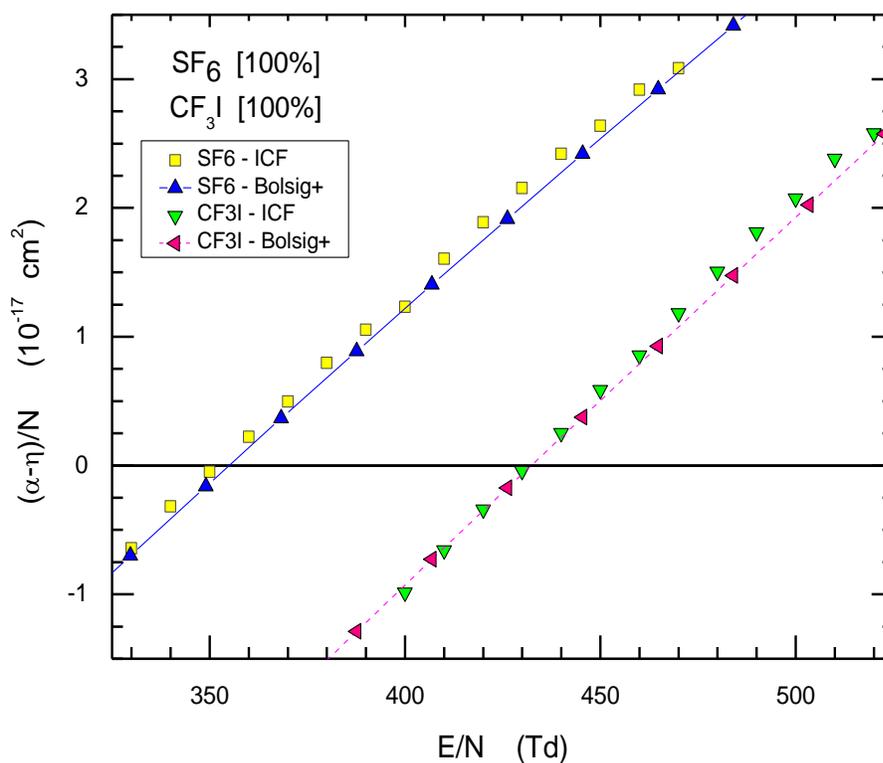


Figura 5.2. Coeficiente de ionización efectiva del SF₆ y CF₃I en función de E/N.

Tabla 5.2. Error en la medición del coeficiente de ionización efectiva en SF₆ y CF₃I

| Gas | E/N_{crit} (Td) | Error (%) | E/N_{crit} (Td) | Error (%) |
|-------------------|--------------------|-----------|------------------------|-----------|
| | Este trabajo - ICF | | Este trabajo - Bolsig+ | |
| SF ₆ | 352-361 | 2.5 | 352-355 | < 1 |
| CF ₃ I | 432-437 | 1 | 432-431 | < 1 |

De la comparación de los resultados del campo eléctrico crítico, se puede comprobar que el CF₃I tiene un campo eléctrico crítico de 1.2 veces el campo del SF₆.

También se presenta la comparación de los parámetros de transporte del CO_2 , obtenidos en el presente trabajo y mediante el simulador BOLSIG+ [59, 61-65]. Debido a la diferencia en los valores de los parámetros de transporte del CO_2 calculados por BOLSIG+, se realiza la comparación de todas las bases de datos disponibles en BOLSIG+ y los resultados experimentales de este trabajo.

Los resultados obtenidos del simulador, muestran valores idénticos de la velocidad de deriva y del coeficiente de ionización efectiva del CO_2 en el intervalo de 0 – 100 Td en las bases de datos Morgan y Siglo, quedando superpuestos en las Figuras 5.3 y 5.4.

Las Figuras 5.3 y 5.4 muestran la comparación de la velocidad de deriva electrónica v_e y el coeficiente de ionización efectiva α_e/N en función de E/N .

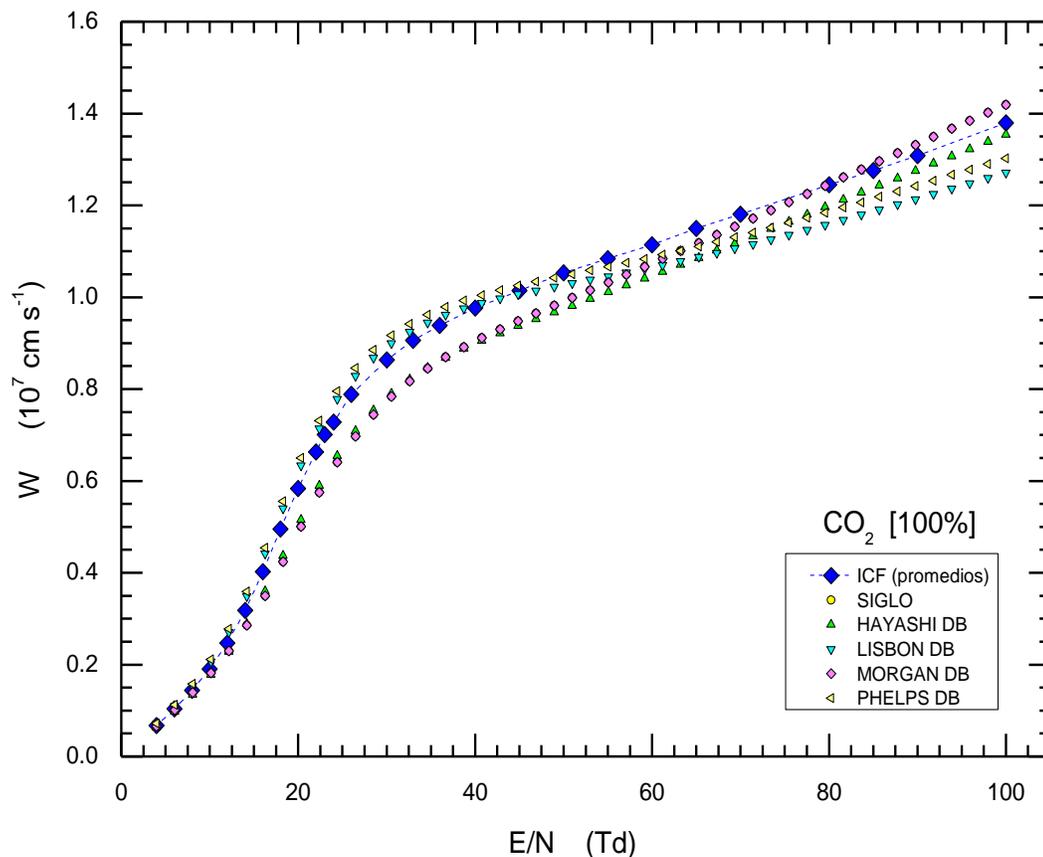


Figura 5.3. Variación de la velocidad de deriva del CO_2 en función de E/N

Como se muestra en la Figura 5.3, la velocidad de deriva experimental para valores de E/N menores a 20 Td presenta una similitud con todas las bases de datos de BOLSIG+, en el intervalo de $20 < Td < 65$ los resultados experimentales tienen mejor acuerdo con la base de datos Phelps y para valores mayores a 65 Td los resultados tienen mejor acuerdo con la base de datos Morgan.

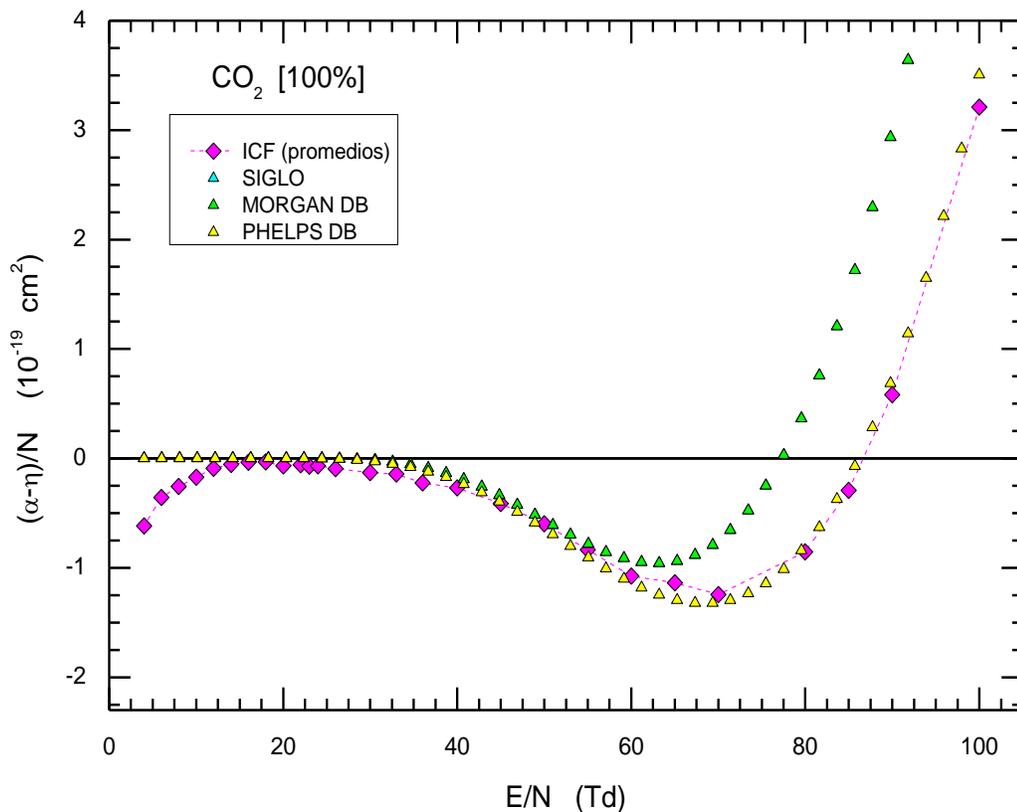


Figura 5.4. Coeficiente de ionización efectiva del CO₂ en función de E/N .

En la Figura 5.4, se puede observar que el coeficiente de ionización efectiva medido presenta una mayor similitud con la base de datos Phelps de BOLSIG+ [59, 61-65]. Obteniendo un error menor al 1% aproximadamente para el valor del coeficiente de campo eléctrico crítico.

La Tabla 5.3, presenta el error del coeficiente de ionización efectiva con base en el valor de campo eléctrico crítico.

Tabla 5.3. Error en la medición del coeficiente de ionización efectiva en CO₂

| Parámetro | BOLSIG+ | Este trabajo | Error (%) |
|-------------------|---------|--------------|-----------|
| E/N_{crit} (Td) | 86.1 | 86.6 | < 1 |

5.3. Mezcla CF₃I-SF₆-CO₂

Una vez evaluada la aproximación de las mediciones realizadas con otras referencias, se presentan los parámetros de transporte de las mezclas analizadas para una posible sustitución del SF₆ como aislante en equipos eléctricos.

La Figura 5.5, muestra las curvas de velocidad de deriva electrónica v_e en función de E/N y de la concentración de los gases que forman la mezcla ternaria CF₃I- SF₆- CO₂. En esta figura se observa que los gases SF₆ y CF₃I, tienen una menor velocidad de arrastre que cualquiera de las mezclas y el gas CO₂.

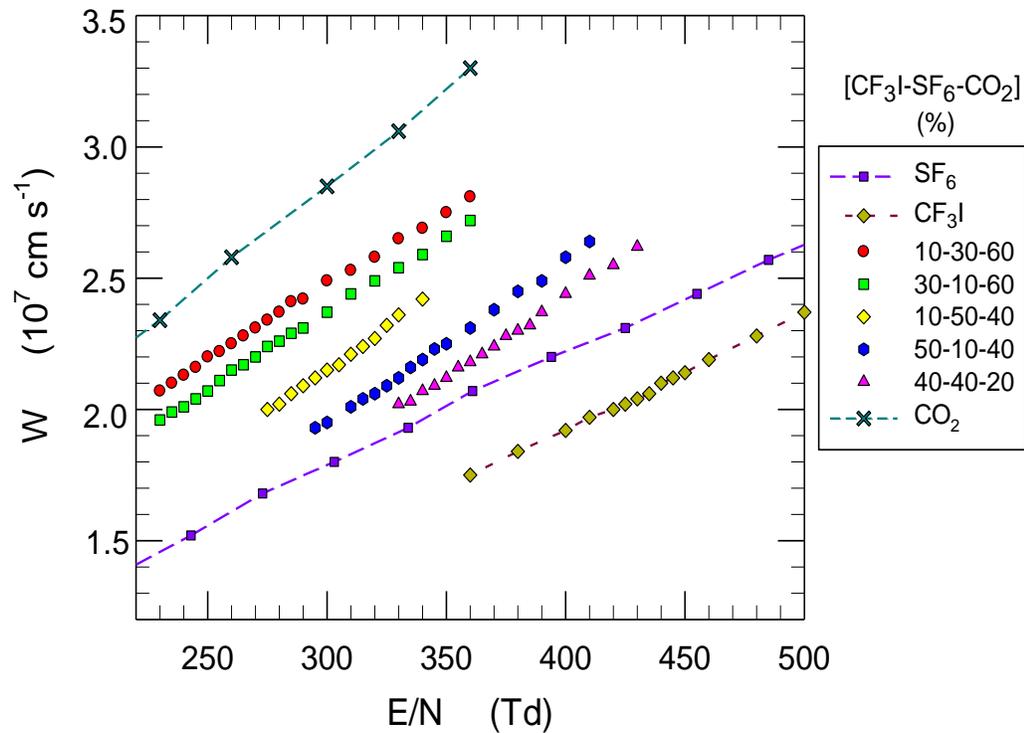


Figura 5.5. Velocidad de deriva de las mezclas CF₃I-SF₆-CO₂ en función de E/N

Del análisis de las mezclas, se observa que la velocidad de arrastre se reduce conforme se incrementa la concentración de los gases más electronegativos. Por ejemplo, en las mezclas 10%CF₃I-30%SF₆-60%CO₂ y 10%CF₃I-30%SF₆-60%CO₂, la concentración del CO₂ permanece constante, variando únicamente la concentración de los gases SF₆ y CF₃I. Cuando la concentración del CF₃I es mayor, la mezcla presentará una menor velocidad de arrastre en comparación con el caso en que la concentración del SF₆ es mayor.

Como se mencionó anteriormente, esto se debe a la mayor electronegatividad del gas CF₃I y al incremento en la densidad del gas en la mezcla, lo que favorece la captura electrónica.

La Figura 5.6, muestra las curvas medidas del coeficiente de ionización efectiva $\alpha_e = (\alpha - \eta)/N$ en función de E/N y de la concentración de los gases que forman las mezcla ternaria CF₃I-SF₆-CO₂.

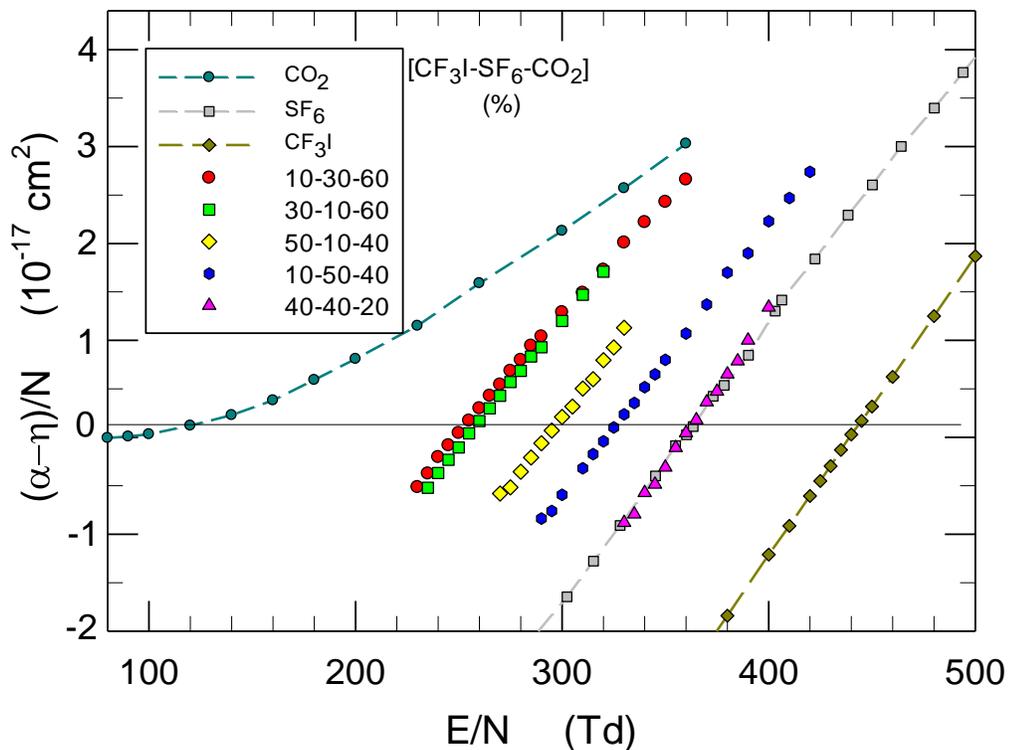


Figura 5.6. Ionización efectiva de las mezclas CF₃I-SF₆-CO₂ en función de E/N

En la Figura 5.6 se observa que, para E/N fijo, el coeficiente de ionización efectiva de los gases disminuye en función del incremento en la concentración de los gases SF₆ y CF₃I.

Por ejemplo, a un valor de campo $E/N = 350$ Td, puede observarse que la mezcla 10%CF₃I-30%SF₆-60%CO₂ tiene un α_e/N igual a 2.4×10^{-17} cm², mientras que la mezcla 50%CF₃I-10%SF₆-40%CO₂ tiene un α_e/N igual a 0.8×10^{-17} cm².

Además, es posible observar que la mezcla 40%CF₃I-40%SF₆-20%CO₂ tiene un comportamiento muy similar al del SF₆ puro.

La Figura 5.7, muestra las curvas medidas del coeficiente de difusión longitudinal ND_L en función de E/N y de la concentración de los gases que forman la mezcla ternaria CF₃I-SF₆-CO₂.

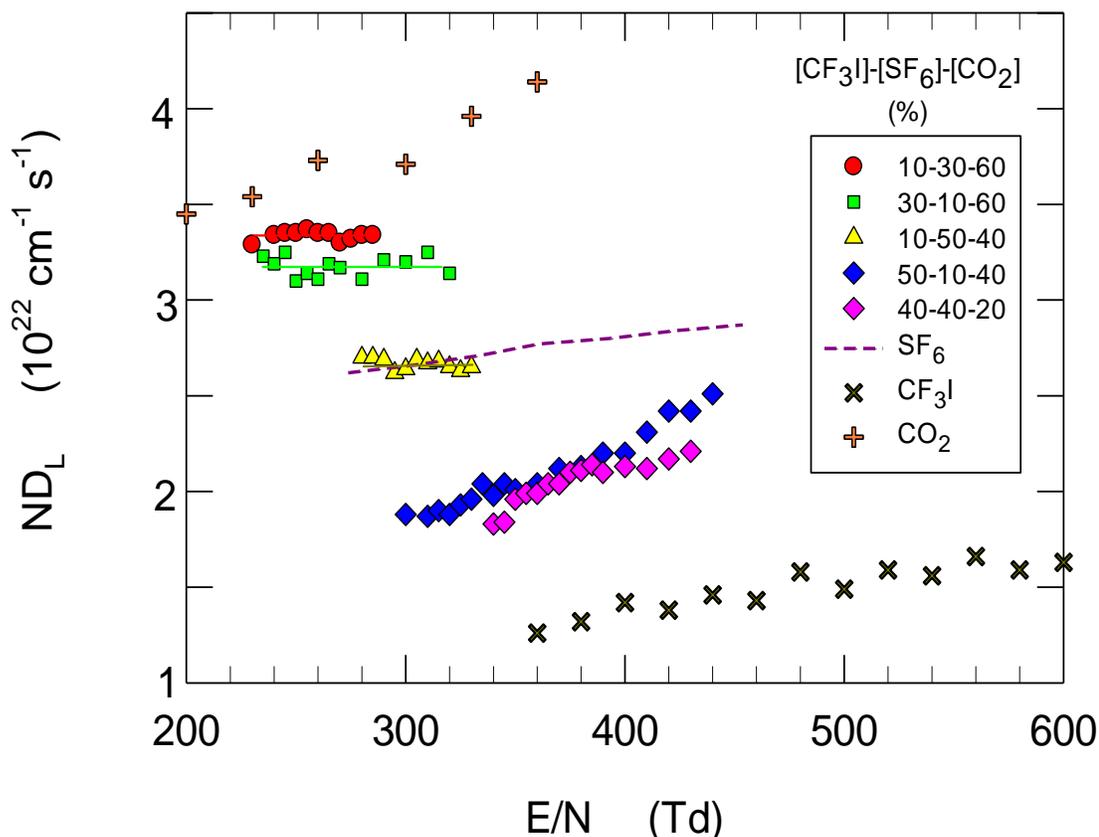


Figura 5.7. Coeficientes de difusión longitudinal normalizados a la densidad de las mezclas $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-CO}_2$ en función de E/N

Debido a la alta incertidumbre en los valores de la difusión electrónica, la Figura 5.7 muestra los resultados del coeficiente ND_L determinados para una presión experimental de 3 Torr, para facilitar su análisis.

Considerando que, la difusión es un parámetro de la facilidad con la que se mueven los electrones dentro del gas, es posible comprender la distribución de los resultados obtenidos en este trabajo, en que la mayor difusión se presenta en la mezcla con menor concentración de gases electronegativos y, caso contrario, una menor difusión en las mezclas en que la captura electrónica es predominante.

5.4. Mezcla CF₃I-SF₆-N₂

La Figura 5.8, muestra la comparación de la velocidad de deriva electrónica v_e en función de E/N y de la concentración de los gases que forman las mezcla ternaria CF₃I-SF₆-N₂.

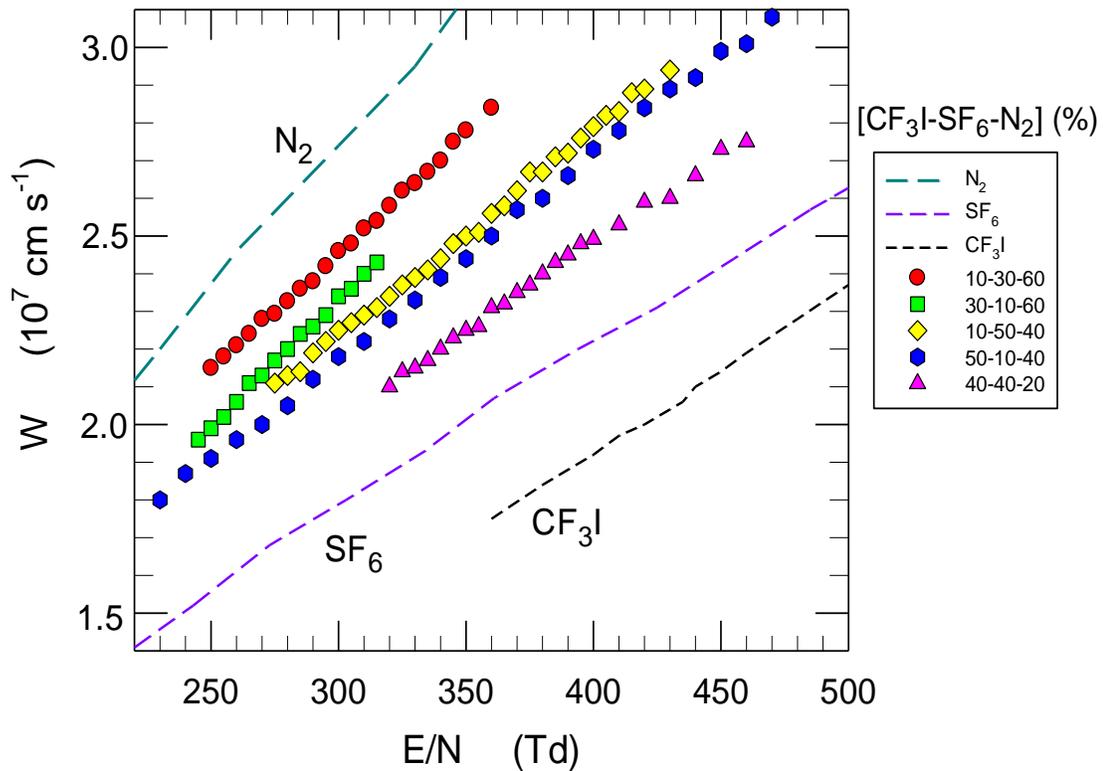


Figura 5.8. Velocidad de deriva de las mezclas de CF₃I-SF₆-N₂ en función de E/N

De la misma forma que en el análisis de las mezclas con CO₂, la Figura 5.8 muestra que la velocidad de arrastre de las mezclas se reduce conforme se incrementa la concentración de los gases más electronegativos.

Además de la comparación de los resultados obtenidos entre las mezclas con CO₂ y N₂, se encontró que las velocidades de deriva de las mezclas tienen comportamientos similares, con velocidades mayores para las mezclas que utilizan N₂ como gas portador.

Para un valor de $E/N = 350$ Td, la diferencia en la velocidad de deriva de las mezclas 40%CF₃I-40%SF₆-20%N₂, 50%CF₃I-10%SF₆-40%N₂ y las mezclas 40%CF₃I-40%SF₆-20%CO₂, 50%CF₃I-10%SF₆-40%CO₂ es menor al 8%; mientras que para el resto de las mezclas la diferencia de la velocidad es menor al 1%.

Para el mismo valor de E/N los gases portadores CO₂ y N₂ tienen una velocidad de deriva de 2.94×10^7 cm/s y 2.96×10^7 cm/s, respectivamente.

La Figura 5.9 muestra la comparación del coeficiente de ionización efectiva $\alpha_e = (\alpha - \eta)/N$ en función de E/N y de la concentración de los gases que forman la mezcla ternaria CF₃I-SF₆-N₂.

De la misma forma que en el análisis de las mezclas con CO₂, la Figura 5.9 muestra que el coeficiente de ionización efectiva de los gases disminuye en función del incremento en la concentración de los gases SF₆ y CF₃I.

La Figura 5.10, muestra las curvas medidas del coeficiente de difusión longitudinal ND_L en función de E/N y de la concentración de los gases que forman la mezcla ternaria CF₃I-SF₆-N₂.

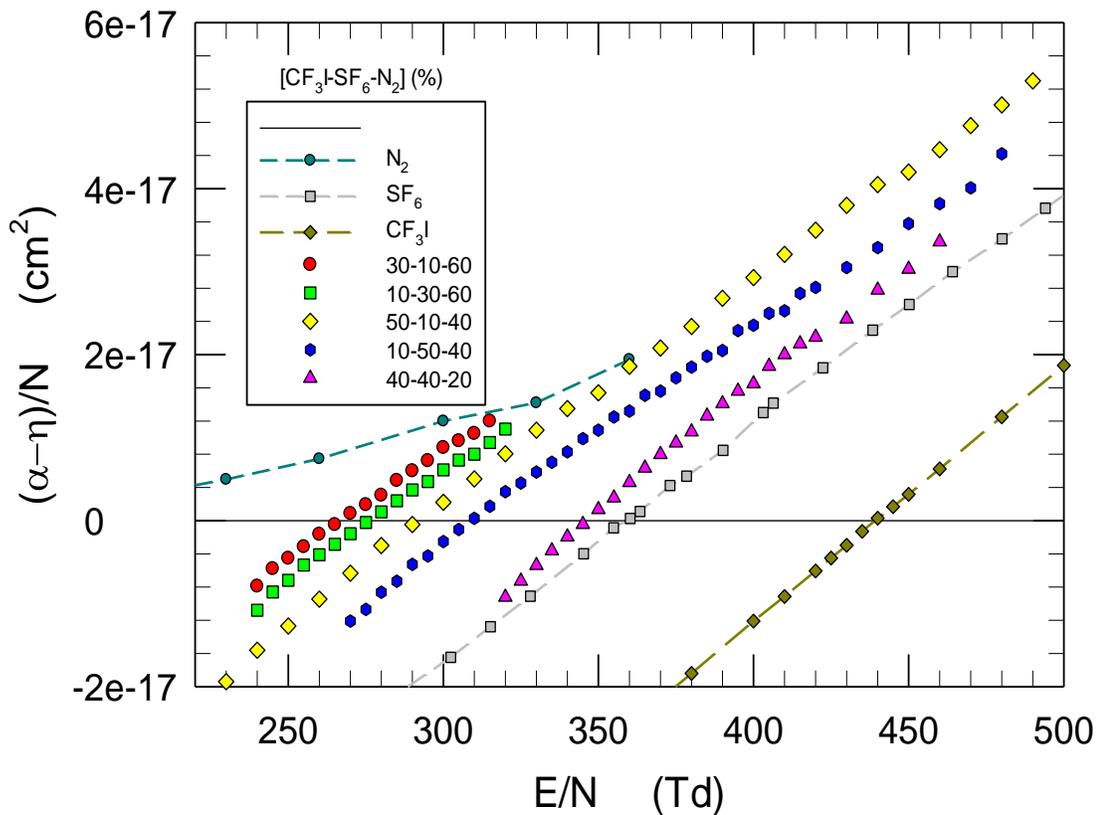


Figura 5.9. Ionización efectiva de las mezclas de $\text{CF}_3\text{I-SF}_6\text{-N}_2$ en función de E/N

De la misma forma que en el análisis de las mezclas con CO_2 , la Figura 5.10 muestra que la mayor difusión se presenta en la mezcla con menor concentración de gases electronegativos y, una menor difusión en las mezclas donde la captura electrónica es predominante.

5.5. Campo eléctrico crítico.

El valor del campo eléctrico crítico (E/N_{crit}) representa la condición en que la ionización efectiva es nula ($\alpha - \eta = 0$). Este parámetro es importante para la pre-visualización del comportamiento como aislante de gases electronegativos. Es decir, los nuevos gases o mezclas gaseosas cuya

aplicación sea de aislamiento eléctrico, deberán contar con un E/N_{crit} tal alto como sea posible.

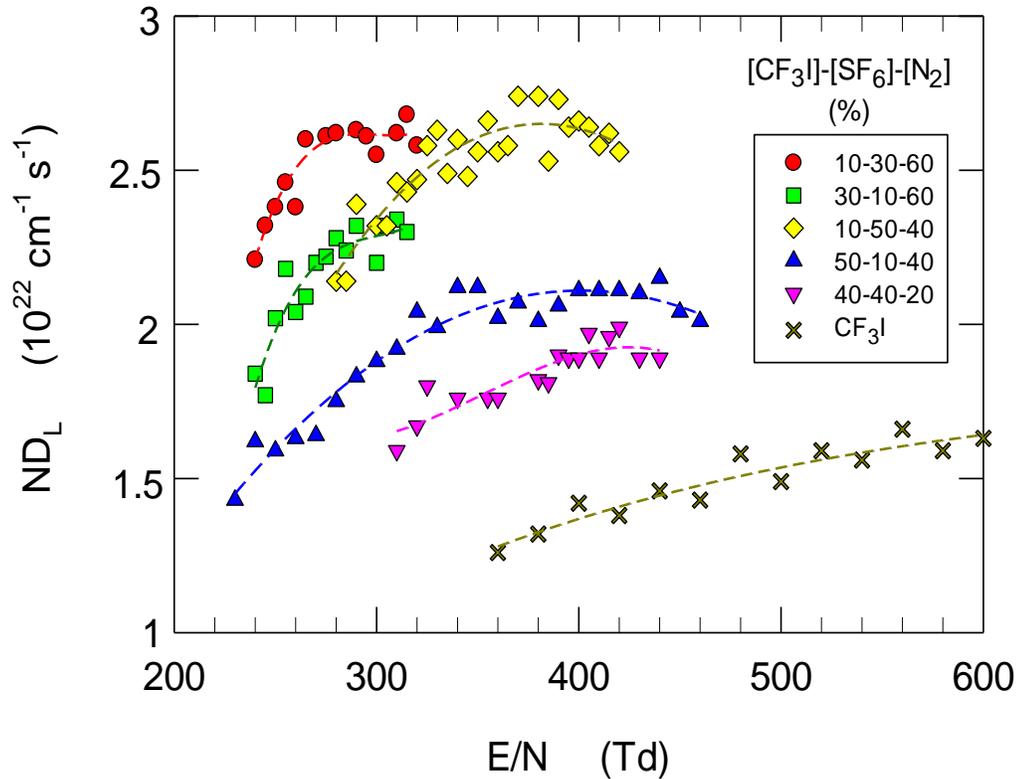


Figura 5.10. Difusión longitudinal de las mezclas de CF₃I-SF₆-N₂ en función de E/N

La Figura 5.11 muestra el E/N_{crit} de las mezclas CF₃I-N₂, CF₃I-SF₆, CF₃I-SF₆-N₂ y CF₃I-SF₆-CO₂ en función de la concentración del gas CF₃I. En esta figura se observa que el E/N_{crit} de las mezclas binarias CF₃I- N₂ y CF₃I-SF₆ varían proporcionalmente con la concentración del gas CF₃I en la mezcla. La mezcla CF₃I-N₂ tiene un comportamiento prácticamente lineal.

De igual manera, se observa que el E/N_{crit} del CF₃I (437 Td) es mayor al del SF₆ (361 Td) [36, 37, 48].

Por otro lado, las mezclas ternarias CF₃I-SF₆-N₂ y CF₃I-SF₆-CO₂, también muestran un incremento de E/N_{crit} en función de la concentración de los gases electronegativos. Sin embargo, es posible observar que el umbral del

campo eléctrico crítico es aproximadamente 300 Td, teniendo que para valores de $E/N < 300$ Td, las mezclas con N_2 tienen un mayor E/N_{crit} , y valores de $E/N > 300$ Td, las mezclas con CO_2 tienen un mayor E/N_{crit} .

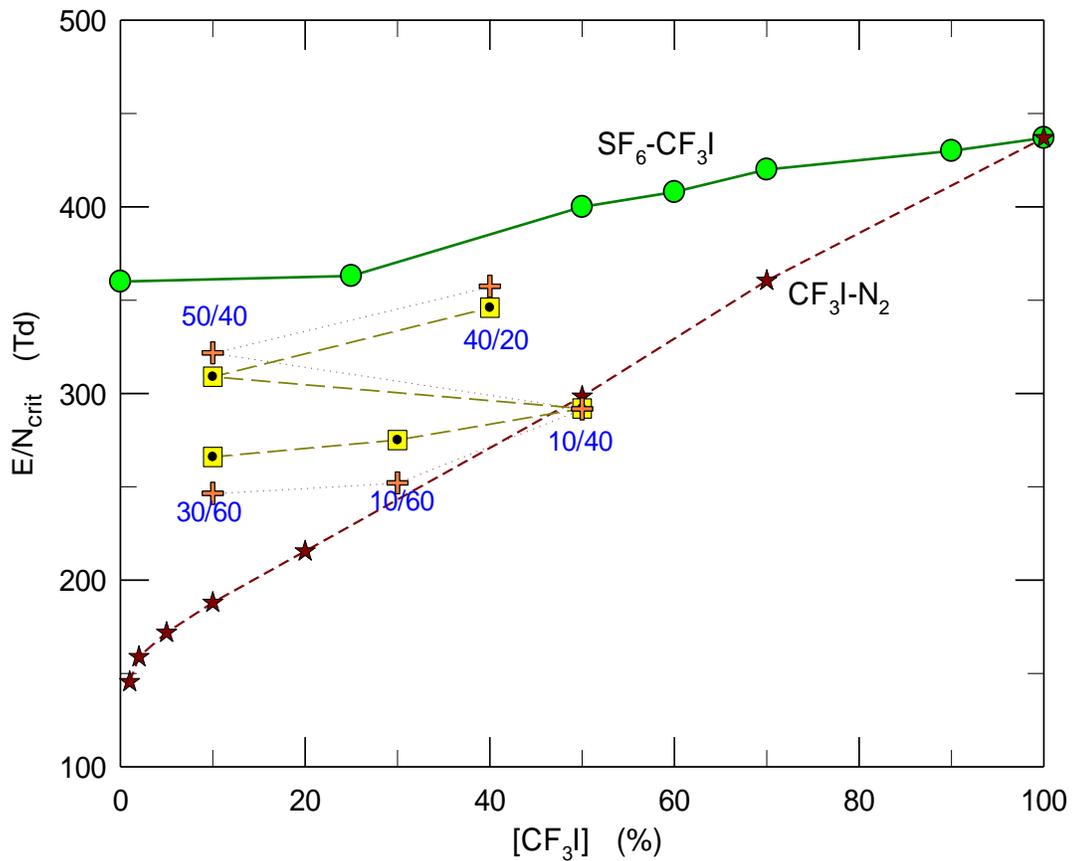


Figura 5.11. Campo eléctrico crítico de las mezclas: ● CF₃I-N₂, ★ CF₃I-SF₆, ■ CF₃I-SF₆-N₂ y + CF₃I-SF₆-CO₂, en función de la concentración del gas CF₃I.

Como se mencionó anteriormente, esto se debe a la mayor electronegatividad del gas CF₃I y al incremento en la densidad del gas en la mezcla, favoreciendo la captura electrónica.

Las mezclas con 50%CF₃I y 10%SF₆ (60% de gases electronegativos) y una concentración del 40% de gases portadores (CO₂ y N₂) tienen el mismo E/N_{crit} (290 Td).

Las mezclas de 25%CF₃I en SF₆, 70%CF₃I en N₂ y 40%CF₃I-40%SF₆-20%N₂ tienen un valor de campo eléctrico crítico similar al E/N_{crit} del SF₆. De las mezclas evaluadas experimentalmente en este trabajo, las mezclas 40%CF₃I-40%SF₆-20%N₂ y 40%CF₃I-40%SF₆-20%CO₂ son potenciales sustitutos del SF₆ como medio aislante, con base en su valor E/N_{crit} .

6. Conclusiones

6.1 Conclusiones

En este trabajo, se presentaron las actividades de investigación experimental de las interacciones entre los iones y los electrones de las mezclas ternarias formadas por los gases SF₆, CF₃I, CO₂ y N₂. El análisis se realizó mediante la obtención de los parámetros de ionización y transporte electrónico mediante la Técnica Pulsada de Townsend.

Las mediciones realizadas se llevaron a cabo en un intervalo de E/N de 250 a 500 Td, limitado por la electronegatividad de las mezclas. La medición de la evolución temporal de la corriente se realizó variando únicamente el valor del voltaje aplicado entre placas, en un intervalo de E/N que permita observar claramente los flancos de subida y bajada del pulso transitorio de la descarga eléctrica para cinco presiones conocidas, modificando la densidad del gas dentro de la cámara. Este procedimiento permitió discriminar la dependencia de la presión durante las mediciones. Además, al considerar los parámetros de transporte normalizados a la densidad de la mezcla, el efecto de la temperatura durante las mediciones también es eliminada.

Los parámetros obtenidos, muestran un comportamiento casi lineal con el incremento en la concentración de los gases electronegativos. La velocidad de deriva y el coeficiente de difusión longitudinal disminuyen a mayores concentraciones de éstos gases. En cambio, el coeficiente de ionización efectiva incrementa a mayores concentraciones.

De los gases electronegativos presentes en las mezclas ternarias, el más representativo en la obtención del coeficiente de ionización efectiva y el campo eléctrico crítico es el CF₃I. Esto se debe a su mayor electronegatividad y al incremento en la densidad del gas en la mezcla, lo que favorece la captura electrónica.

Con base en los valores de campo eléctrico crítico E/N_{cri} (parámetro de referencia para establecer el umbral de rompimiento eléctrico de un gas) de las mezclas analizadas, se observa que las mezclas con mayor posibilidad de sustituir al SF₆ como medio aislante son las mezclas: 40%CF₃I-40%SF₆-20%CO₂ y 40%CF₃I- 40%SF₆-20%/N₂. Los valores de campo crítico para la mezcla con CO₂ es 345 Td y para la mezcla con N₂ es 343 Td. Estos valores son muy similares al E/N_{cri} del SF₆ (347 Td).

Un mayor valor de campo crítico de la mezcla 40%CF₃I-40%SF₆-20%CO₂, se debe a la mayor electronegatividad del CO₂ sobre el N₂.

Las mezclas seleccionadas como potenciales sustitutos del SF₆, reducen 60% el uso del hexafluoruro de azufre como aislamiento y medio de extinción de arco eléctrico en equipo de alta tensión. Además, de representar una opción amigable con el medio ambiente al utilizar gases con un potencial de calentamiento global menor o igual a uno ($GWP \leq 1$). Siendo la mezcla 40%CF₃I-40%SF₆-20%/N₂ la de menor potencial de calentamiento global.

Las mezclas ternarias y los resultados obtenidos de la medición de los parámetros de transporte iónico y electrónico mediante la técnica pulsada de Townsend, se consideran primigenios ya que no se encontraron evidencias de investigaciones previas a este trabajo en la literatura especializada.

Los parámetros aquí reportados, pueden utilizarse para la obtención de la sección eficaz de las mezclas y, como antecede para su evaluación dieléctrica mediante pruebas de alta tensión y alta corriente.

7. Trabajos futuros

7.1 Otras mezclas

En este trabajo se ha buscado exitosamente la utilización de N_2 y CO_2 para estudiar mezclas ternarias que, si bien no resuelven el problema de la eliminación del SF_6 , se ha llegado a reducir en un 60% la parte del SF_6 al utilizar un gas altamente electronegativo, CF_3I , con muy bajo potencial de calentamiento global y que no dañan a la capa de ozono, con gases atmosféricos, uno electropositivo, N_2 , y otro débilmente electronegativo, CO_2 , con muy bajo potencial de calentamiento global y que no dañan a la capa de ozono, y observando que ambas mezclas ternarias tienen la misma rigidez dieléctrica. Convendrá en el futuro cercano y mediano explorar mezclas ternarias con fluorocarbonos de bajo poder invernadero y que no afecten a la capa de ozono. Entre estos hay algunas cetonas y olefinas interesantes.

7.2 Otras pruebas a las mezclas actuales.

Es necesario continuar con el estudio de estas pruebas en condiciones cercanas a las de los equipos de aislamiento de alto voltaje. Asimismo, convendrá estudiar los subproductos provenientes del sometimiento de las mezclas a corrientes intensas en condiciones de descarga y de aislamiento estático.

Referencias

- [1] D. Kind, H. Kärner, *High-Voltage Insulation Technology*, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Alemania, 1985.
- [2] R. Arora, W. Mosch, *High voltage and Electrical insulation Engineering*, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] V. Maller, M. Naidu, *Advantages in High Voltage Insulation and Arc Interruption in SF₆ and Vacuum*, Pergamon Press, 1980.
- [4] "Sulphur Hexaluoride", Solvay Special Chemicals Technical Brochure, pp. 5- 51, 2014.
- [5] Hermann Koch, *Gas Insulated Substations*, Wiley, Alemania, 2014
- [6] International Standard, IEC-60376, *Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment*, 2a. ed., 2005.
- [7] Gas Encyclopedia, Air Liquide, <https://encyclopedia.airliquide.com/>
- [8] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, D. S. Green, *Gases for Electrical Insulation and Arc Interruption: Possible Present and Future Alternatives to Pure SF₆*, NIST Technical Note 1425, National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, USA, 1997.
- [9] B. Belmadani, J. Casanovas, A. M. Casanovas, R. Grob and J. Mathieu, "SF₆ decomposition under power arcs. I. Physical aspects," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1163-1176, Dec 1991.
- [10] B. Belmadani, J. Casanovas and A. M. Casanovas, "SF₆ decomposition under power arcs. II. Chemical aspects," in *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1177-1182, Dec 1991.
- [11] Working Group 23-10 CIGRE, "SF₆ and the global atmosphere," (Electra number 164 February 1996 pages 121-138).

-
- [12] Inventory of U.S. Greenhouse Emissions and Sinks: 1990-2000, U.S. Environmental protection Agency, Office of Atmospheric programs, EPA 430- R-02-003, April 2002.
- [13] CIGRÉ B3. 02 Task Force 01, "SF₆ Recycling Guide. Re-use of SF₆ gas in electrical power equipment and final disposal".
- [14] IEEE Std C37.122.3™-2011. IEEE Guide for Sulphur Hexafluoride (SF₆) Gas Handling for High-Voltage (over 1000 Vac) Equipment.
- [15] IEC Std 60376. 2005-06. Specification of technical grade sulfur hexafluoride (SF₆) for use in electrical equipment.
- [16] IEC Std 60480. 2004-10. Guidelines for the checking and treatment of sulfur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment and specification for its re- use.
- [17] Síntesis de fallas interruptores de potencia 2013. Gerencia de Subestaciones de la Coordinación de Transmisión, CFE.
- [18] Y. Qiu and E. Kuffel, "Comparison of SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ gas mixtures as alternatives to SF₆ gas," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 892-895, Dec 1999.
- [19] Y. Hoshina, M. Sato, H. Murase, M. Toyada and A. Kobayashi, "Dielectric properties of SF₆/N₂ gas mixtures on a full scale model of the gas-insulated busbar," *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*, 2000, pp. 2129-2134 vol.3.
- [20] F. Guastavino, A. Ratto, F. Porcile, E. Torello and D. Santinelli, "Dielectric characterization of gas mixtures as electrical insulating for high voltage components and appliances," *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Shenzhen, 2013, pp. 1008-1011.

-
- [21] Y. Qiu and Y. P. Feng, "Investigation of SF₆-N₂, SF₆-CO₂ and SF₆-air as substitutes for SF₆ insulation," *Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Montreal, Que., 1996, pp. 766-769 vol.2.
- [22] W. P. Song, D. I. Yang, Y. H. Chung, D. S. Kim and H. S. Koh, "A study of large current interrupting capability of SF₆/N₂ mixtures," *Conference Record of the the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Cat. No.02CH37316)*, 2002, pp. 457-459.
- [23] H. Okubo and A. Beroual, "Recent trend and future perspectives in electrical insulation techniques in relation to sulfur hexafluoride (SF₆) substitutes for high voltage electric power equipment," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 27, no. 2, 2011.
- [24] Hernández Ávila J L, Basurto E and de Urquijo J, "Electron transport and swarm parameters in CO₂ and its mixtures with SF₆", 2002, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35 2264.
- [25] A. V. Phelps and R. J. Van Brunt, "Electron-transport, ionization, attachment, and dissociation coefficients in SF₆ and its mixtures", 1988, *J. Phys. D: Appl.* 64 (9).
- [26] Hernández Ávila J L and de Urquijo J, "Pulsed Townsend measurement of electron transport and ionization in SF₆-N₂ mixtures ", 2003, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36(12).
- [27] Basurto E., Hernández-Ávila J.L., de Urquijo J. (2004) "Recent Measurements of Electron Swarm Coefficients in the Mixtures of SF₆ with Halocarbon and Rare Gases". In: Christophorou L.G., Olthoff J.K., Vassiliou P. *Gaseous Dielectrics X*. Springer, Boston, MA
- [28] E Basurto, J L Hernández-Ávila, A M Juárez, J de Urquijo, "Electron swarm coefficients and the limiting field strength of SF₆-N₂O mixtures", 2013, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (35).

-
- [29] J de Urquijo, E Basurto, J L Hernández-Ávila, “Effective ionization, electron and ion transport in SF₆-He mixtures”, 2001, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34(14).
- [30] J de Urquijo, C A Arriaga, C Cisneros and I Alvarez, “A time-resolved study of ionization, electron attachment and positive-ion drift in methane”, 1999, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32(1).
- [31] A. Beroual; A. Haddad, “Recent Advances in the Quest for a New Insulation Gas with a Low Impact on the Environment to Replace Sulfur Hexafluoride (SF₆) Gas in High-Voltage Power Network Applications”, *Energies* 2017, 10, 1216.
- [32] G. Raju, *Gaseous Electronics: Tables, Atoms, and Molecules*, CRC, 2012.
- [33] Koch, M. Prediction of Breakdown Voltages in Novel Gases for High Voltage Insulation. Ph.D. Thesis, ETH-Zürich, Zürich, Switzerland, 2015.
- [34] Solomon, S., J. B. Burkholder, A. R. Ravishankara, and R. R. Garcia, “Ozone depletion and global warming potentials of CF₃I”, 1994, *J. Geophys. Res.*, 99 (D10).
- [35] X. Li, H. Zhao, J. Wu and S. Jia, “Analysis of the insulation characteristics of CF₃I mixtures with CF₄, CO₂, N₂, O₂ and air”, 2013, *J. Phys. D: Appl.* 46 (34) 5203.
- [36] J de Urquijo, “Is CF₃I a good gaseous dielectric? A comparative swarm study of CF₃I and SF₆”, 2007, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 86 (1).
- [37] J de Urquijo, A M Juárez, Basurto E and J LHernández Ávila, “Electron impact ionization and attachment, drift velocities and longitudinal diffusion in CF₃I and CF₃I–N₂ mixtures” 2007, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (7).
- [38] L. G. Christophorou and J. K. Olthoff, “Electron Interactions with CF₃I”, 2000, *J. Phys. and Chem. Reference Data*, 29(4).

-
- [39] Subcommittee on Iodotrifluoromethane, Iodotrifluoromethane: Toxicity Review, Washington, USA: The National Academies Press, 2004.
- [40] L. Chen, "Investigation on the Feasibility of Trifluoroiodomethane (CF₃I) for Application in Gas-Insulated Lines", Ph.D. thesis, Cardiff University, UK, 2015.
- [41] Y. Cressault, V. Connord, Hugues F. Hingana, Alain Gleizes, Ph Teulet,, "Transport properties of CF₃I thermal plasmas mixed with CO₂, air or N₂ as an alternative to SF₆ plasmas in high-voltage circuit breakers", 2011, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 (49).
- [42] M. N. Ngoc, A. Denat, N. Bonifaci, O. Lesaint, W. Daoud and M. Hassanzadeh, "Electrical breakdown of CF₃I and CF₃I-N₂ gas mixtures," *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2009. CEIDP '09. IEEE Conference on*, Virginia Beach, VA, 2009.
- [43] H. Kasuya, Y. Kawamura, H. Mizoguchi, Y. Nakamura, S. Yanabu and N. Nagasaki, "Interruption capability and decomposed gas density of CF₃I as a substitute for SF₆ gas," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 17, no. 4, pp. 1196-1203, August 2010.
- [44] H. Katagiri, H. Kasuya, H. Mizoguchi and S. Yanabu, "Investigation of the performance of CF₃I Gas as a Possible Substitute for SF₆," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 5, 2008.
- [45] J de Urquijo, A. Minatri, G. Ruiz-Vargas, "Limiting field strength and electron swarm coefficients of the CF₃I-SF₆ gas mixture", 2011, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44 (34).
- [46] Y. Deng, D. Xiao, "Analysis of the insulation characteristics of CF₃I gas mixtures with Ar, Xe, He, N₂, and CO₂ using Boltzmann equation method", 2014, *Japanese J. Phys. D: Appl. Phys.* 53 (9).
- [47] A M Juárez, Basurto E, J L Hernández-Ávila and J de Urquijo, "Electron swarm coefficients of CF₃I and CF₃I/N₂ and their comparison with those of SF₆", 2008.

-
- [48] X. Li, H. Zhao, J. Wu and S. Jia, "Analysis of the insulation characteristics of CF₃I mixtures with CF₄, CO₂, N₂, O₂ and air", 2013, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 46 (34).
- [49] M. Kimura and Y. Nakamura, "Electron swarm parameters in CF₃I and a set of electron collision cross sections for the CF₃I molecule", 2010, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 43 (14).
- [50] E. Nasser, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*, John Wiley & Sons, 1971.
- [51] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel, *High Voltage Engineering: Fundamentals*, 2nd. Ed. Newnes, Great Britain, 2000.
- [52] CL Wadhwa, *High Voltage Engineering*, 2nd. Ed., New Age International (P) Ltd., Publishers, New Delhi, 2007.
- [53] Sir H. Massey, *Atomic and Molecular Collisions*, Taylor & Francis Ltd., London, 1979.
- [54] Earl W. McDaniel and Edwards A. Masson, *The mobility and diffusion of ions in gases*, John Wiley and Sons, USA, 1973.
- [55] H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases*, Butterworths, London, 1964.
- [56] IEC Std 60052.2002. Voltage measurement by means of standard air gaps.
- [57] Basurto E, Manual de usuario. Programa de Análisis de Transitorios Electrónicos de la Cámara de Townsend. Ver. 1.0, UAM- Azcapotzalco, 2013.
- [58] J de Urquijo, I. Álvarez, C. Cisneros, "Transient analysis of the drift and longitudinal diffusion of ions in a uniform-field discharge gap", 1985, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 18 (1).
- [59] BOLSIG+ solver ver. 03/2016, www.lxcat.net
- [60] TRINITI database, www.lxcat.net, 2017
- [61] SIGLO database, www.lxcat.net, 2017
- [62] MORGAN database, www.lxcat.net, 2017

- [63] PHELPS database, www.lxcat.net, 2017
- [64] LISBON database, www.lxcat.net, 2017
- [65] HAYASHI database, www.lxcat.net, 2017

Apéndice

Apéndice A. Modelado del arreglo de electrodos del set experimental

La configuración de los electrodos utilizados en el arreglo experimental para la medición de los parámetros de transporte electrónico e iónico de mezclas gaseosas, mediante la técnica pulsada de Townsend, consiste de un capacitor de placas paralelas formado por electrodos planos y separados por una distancia d de 31 mm. Los electrodos utilizados son de acero inoxidable (ánodo) y de aluminio (cátodo) con un diámetro de 120 mm.

De acuerdo con la teoría de Townsend, la obtención de los parámetros de bajo estudio se debe realizar bajo un campo eléctrico homogéneo.

Por lo anterior, se realizó el modelado mediante un software de análisis y resolución por elemento finito al arreglo de electrodos utilizado, para garantizar un campo eléctrico homogéneo entre electrodos y consecuentemente un tránsito electrónico en zonas con el menor gradiente eléctrico posible.

Los parámetros utilizados para el estudio del arreglo de electrodos son: la geometría de la cámara, la geometría de los componentes al interior de la misma, un voltaje máximo de 5 kV aplicado al ánodo y la referencia al potencial de tierra el cátodo y la envolvente de la cámara experimental.

El análisis se realizó para cuatro escenarios diferentes del arreglo capacitivo:

- Electrodos planos con aristas
- Electrodos planos con bordes redondeados
- Electrodos con bordes redondeados, ánodo con barreno central
- Electrodos con bordes redondeados, ánodo con malla en barreno central

Caso 1. Electrodo planos con aristas

La Figura A.1 muestra una configuración de electrodos rectangulares con aristas. En la figura, se observa un comportamiento homogéneo, con la mayor concentración de las líneas de campo eléctrico en las aristas de los electrodos y un campo eléctrico homogéneo hacia el centro de los mismos, donde las líneas de campo permanecen constantes en toda la superficie de los electrodos.

De acuerdo con la simulación, la diferencia de potencial en los bordes de los electrodos sin redondear es superior a 22 veces la tensión al centro del arreglo capacitivo, presentando un gradiente de campo eléctrico de 3700 V/mm a una distancia entre electrodos $d < 1\text{mm}$ del ánodo y un gradiente menor a 600 V/mm a una distancia $30\text{mm} < d < 31\text{mm}$ en dirección al cátodo.

Caso 2. Electrodo planos con bordes redondeados

El arreglo de electrodos mostrado en la Figura A.2 está formado por un par de electrodos con bordes redondeados con radio $r=0.6\text{mm}$.

En este capacitor de placas paralelas, se observa un comportamiento homogéneo, con la mayor concentración de las líneas de campo eléctrico en los bordes de los electrodos y un campo eléctrico homogéneo hacia el centro de los mismos, donde las líneas de campo permanecen constantes en toda la superficie de los electrodos (gradiente eléctrico = 160 V/mm).

De acuerdo con la simulación, la diferencia de potencial en los bordes de los electrodos redondeados es dos veces la tensión al centro del arreglo capacitivo, presentando un gradiente de campo eléctrico de 360 V/mm a una distancia entre electrodos $d < 1\text{mm}$ del ánodo y un gradiente menor a 180 V/mm a una distancia $34\text{mm} < d < 35\text{mm}$ en dirección al cátodo.

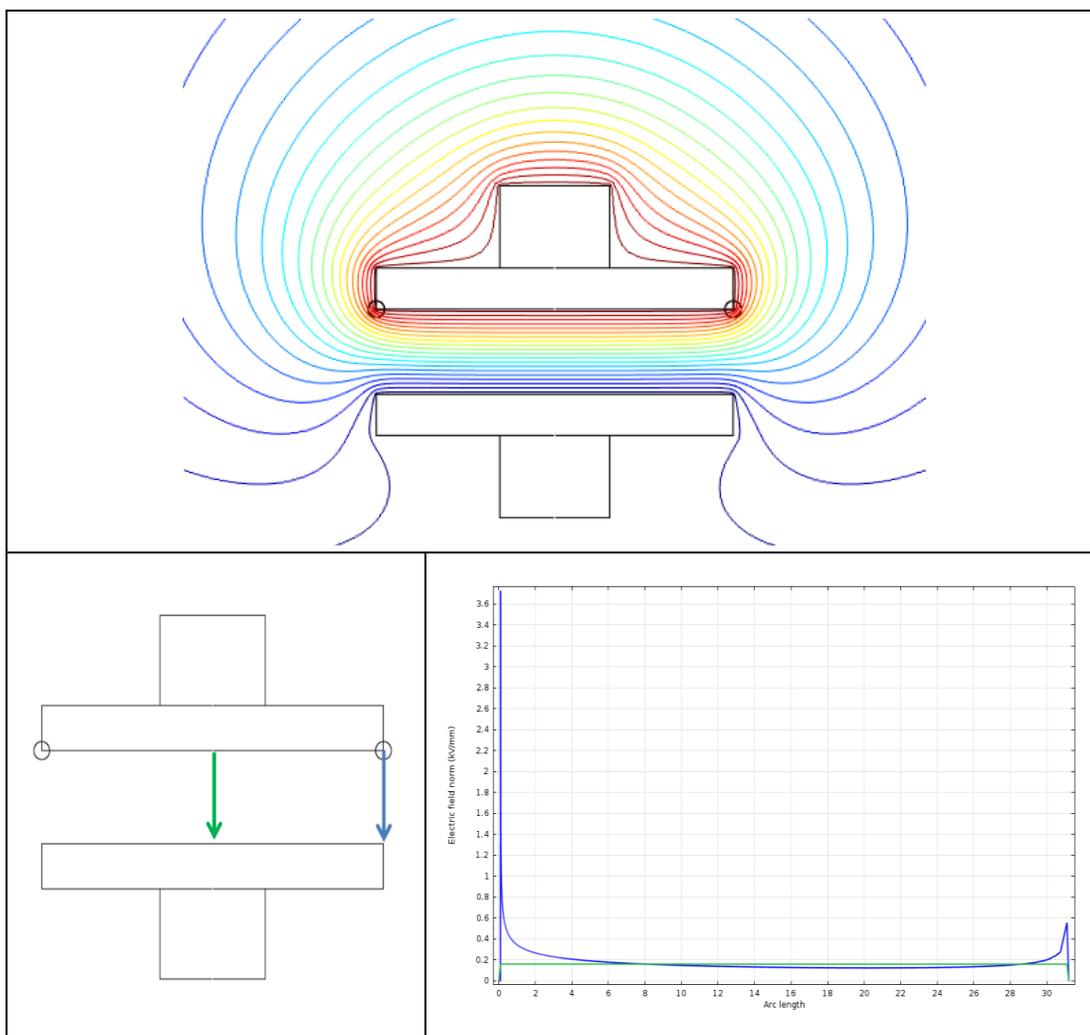


Figura A.1. Campo y gradiente eléctrico de electrodos con aristas

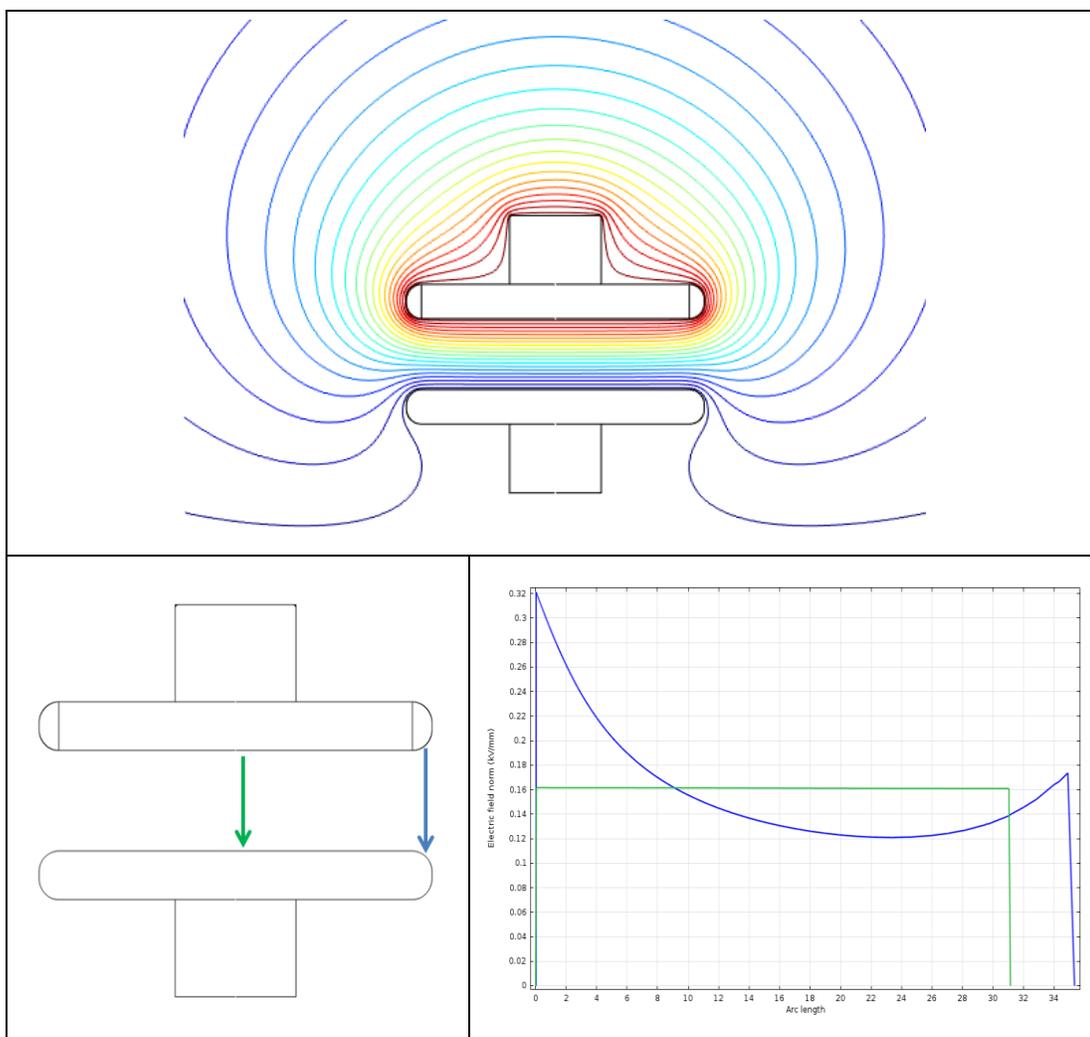


Figura A.2. Campo y gradiente eléctrico de electrodos con bordes de $r=0.6$ mm.

Caso 3. Electrodo con bordes redondeados y ánodo con barreno central

El arreglo de electrodos mostrado en la Figura A.3 está formado por un par de electrodos con bordes redondeados con radio $r=0.6$ mm, donde el ánodo tiene con una perforación de 15mm de diámetro al centro del electrodo, permitiendo el paso de luz UV a través del ánodo para incidir perpendicularmente en el cátodo.

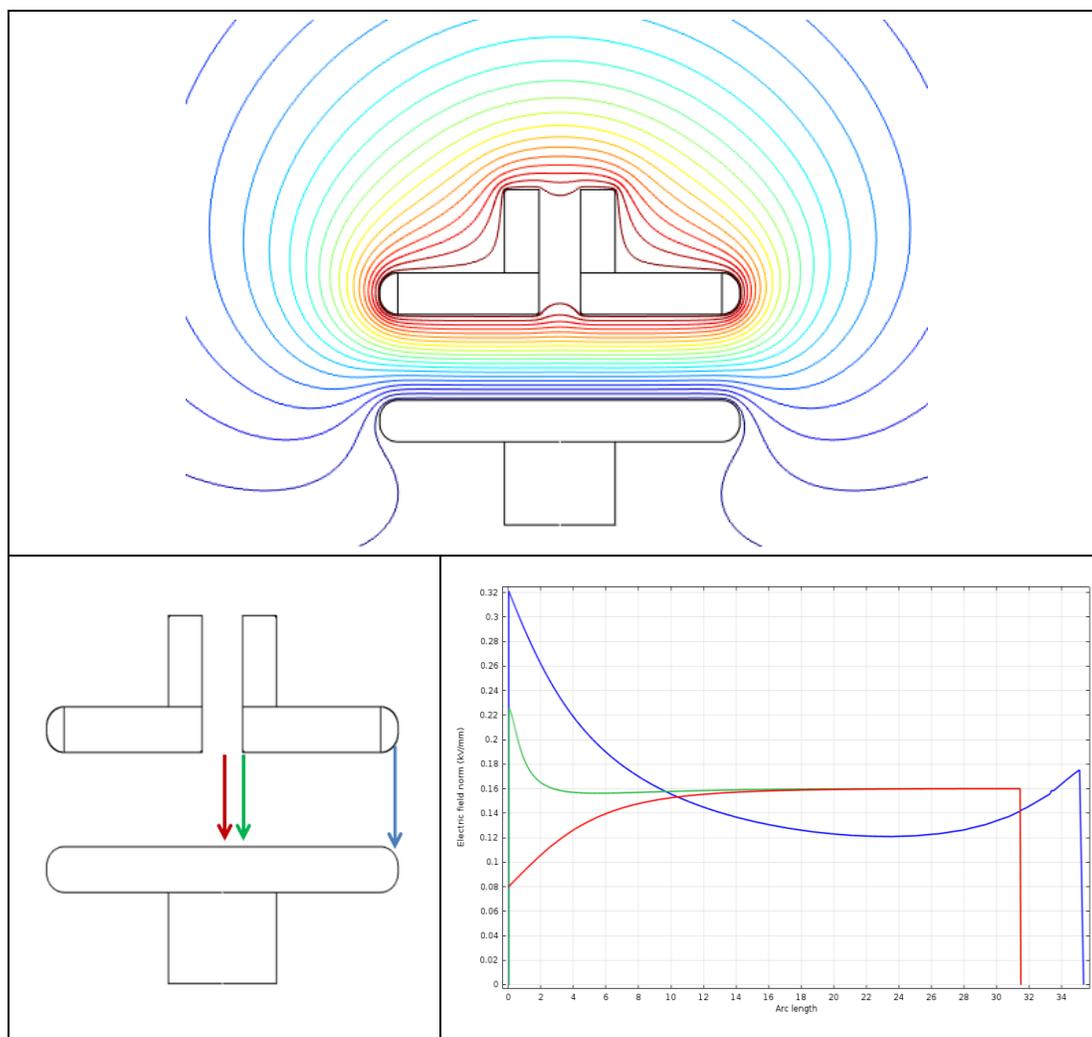


Figura A.3. Campo y gradiente eléctrico de electrodos con bordes de $r=0.6$ mm y ánodo con barreno central.

En la Figura A.3 se observa un comportamiento no homogéneo, con concentraciones de campo eléctrico en los bordes externos y al centro del ánodo debido a la perforación sin bordes redondeados. A diferencia de los casos descritos anteriormente, las líneas de campo de campo eléctrico en el centro de los electrodos, presenta una distorsión durante una longitud de 12 mm.

De acuerdo con la simulación, el gradiente de campo eléctrico en los bordes externos de los electrodos es de 320 V/mm a una distancia entre electrodos $d < 1\text{mm}$ del ánodo y un gradiente menor a 180 V/mm a una distancia $34\text{mm} < d < 35\text{mm}$ en dirección al cátodo. Además, los gradientes presentes al centro de los electrodos y en las aristas del orificio central son 80 V/mm y 60 V/mm, respectivamente.

Teniendo una variación de la distribución de campo eléctrico del 50% al centro de los electrodos y del 25% en las aristas del orificio central.

Caso 4. Electrodos con bordes redondeados, ánodo con malla en barreno central

En la Figura A.4 se observa el arreglo de electrodos formado por un par de electrodos con bordes redondeados de radio $r=0.6\text{mm}$. El ánodo cuenta con una malla de cobre electroformado con una distribución de 3 líneas/mm para uniformizar el campo eléctrico entre electrodos.

De acuerdo con la simulación, el gradiente de campo eléctrico en los bordes externos de los electrodos es de 320 V/mm a una distancia entre electrodos $d < 1\text{mm}$ del ánodo y un gradiente menor a 180 V/mm a una distancia $34\text{mm} < d < 35\text{mm}$ en dirección al cátodo. Por otro lado, el gradiente presente al centro de los electrodos y en las aristas del orificio central es del mismo valor ($\sim 160\text{V/mm}$)

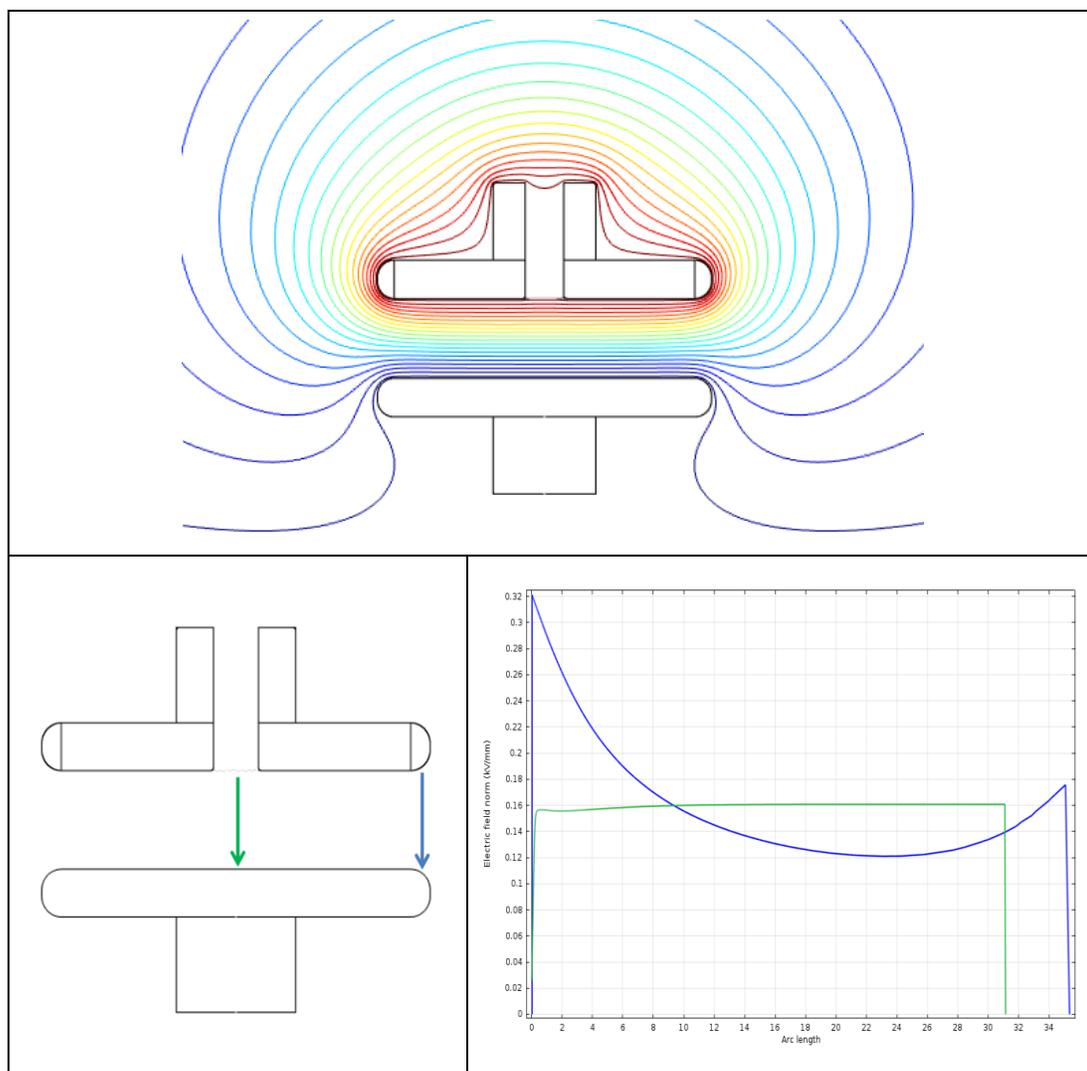


Figura A.4. Campo y gradiente eléctrico de electrodos con bordes de $r=0.6$ mm y malla de cobre en el ánodo.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados de las simulaciones presentadas anteriormente, el caso 2 representa la condición ideal del arreglo de electrodos (arreglo utilizado en este trabajo) para la medición experimental de los parámetros de transporte electrónico e iónico de gases bajo campos homogéneos, en donde se garantiza que la avalancha electrónica se genere al centro de los electrodos, sin la ocurrencia de descargas en los extremos de los electrodos o entre los electrodos y la envolvente.

En el caso 4, la malla de cobre con 3 líneas/mm colocada en el ánodo, resuelve la necesidad de un campo eléctrico homogéneo en un arreglo de electrodos, en el que la incidencia de la luz UV que genera el inicio de la avalancha electrónica mediante la fotoionización, se realiza de forma perpendicular al cátodo haciendo pasar el haz de luz a través del ánodo.

De la comparación del caso 2 (ideal) y el caso 4, las líneas de campo eléctrico entre electrodos son prácticamente homogénea y la variación del gradiente eléctrico al centro del arreglo capacitivo es menor al 1.5% (~ 2 V/mm).