

**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE  
DESCARGAS TIPO TOWNSEND PARA EL ESTUDIO  
DE LAS PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE  
IONES Y ELECTRONES EN GASES DIELECTRICOS**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :  
MAESTRO EN CIENCIAS EN  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA**

**MARTÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**



**MÉXICO, D.F.**

**DICIEMBRE DE 2004**



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 17:00 horas del día 4 del mes de Agosto del 2004 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada Por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. Para examinar la tesis de grado titulada:

**“CONSTRUCCIÓN DE UNA CÁMARA DE DESCARGAS TIPO TOWNSEND PARA EL ESTUDIO DE PROPIEDADES DE TRANSPORTE DE IONES Y ELECTRONES EN GASES DIELECTRICOS”**

Presentada por el alumno:

**HERNÁNDEZ**

Apellido paterno

**HERNÁNDEZ**

materno

**MARTÍN**

nombre(s)

Con registro:

0	2	0	0	6	0
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. EDUARDO BASURTO URIBE

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

DR. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ AVILA

M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

M. EN C. TOMÁS ASIAÍN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. FLORENCIO SÁNCHEZ SILVA



SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

### CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 6 del mes Septiembre del año 2004 el que suscribe Martín Hernández Hernández alumno del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica con número de registro 020060 , adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Eduardo Basurto Uribe y cede los derechos del trabajo intitulado: "Construcción de una cámara de descargas tipo Townsend para el estudio de propiedades de transporte de iones y electrones en gases dieléctricos" al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: ebasurto@correo.azc.uam.mx.

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Martín Hernández Hernández

Nombre y firma

---

**DEDICATORIAS**

**A mi Madre:**

*María Alma*

*Con amor y agradecimiento por  
los esfuerzos y sacrificios que ha  
realizado para mi educación.*

**A mi Esposa:**

*Patricia*

*Por su comprensión, infinita paciencia y apoyo*

**A mi Hijo:**

*Martín Vladimir*

*Por su gran fortaleza y amor a la vida*

**A mi Hermana:**

*Guadalupe*

*Por su apoyo y consejos.*

---

---

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi director de tesis, Dr. Eduardo Basurto Uribe y co-director de tesis Dr. Ricardo Octavio Mota Palomino por su valiosa dirección, asesoría, consejos y su apoyo para la realización de este trabajo.*

*Al Dr. José Luis Hernández Ávila por sus consejos y ayuda para la realización de este trabajo. Y a su proyecto CONACyT 36645-A.*

*Al Dr. Jaime de Urquijo Carmona por el acceso y apoyo de su laboratorio en el CCF- UNAM Cuernavaca Morelos.*

*Al CCF-UNAM por su invaluable aportación a la construcción de la Cámara de Townsend.*

*Al proyecto DGAPA-UNAM IN104501.*

*A los profesores de la Sección de estudios de Posgrado e Investigación (SEPI).*

*Al Instituto Politécnico Nacional (IPN).*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada.*

*A los compañeros de Maestría por su apoyo y consejos en mi desarrollo personal y profesional.*

*A la familia Lara Piña por la amistad y apoyo incondicional recibido durante mis estudios.*

---

## RESUMEN

Debido a sus excelentes propiedades dieléctricas y a sus propiedades físicas el Hexafloruro de Azufre ( $SF_6$ ) es ampliamente utilizado por la industria eléctrica como el mejor aislante gaseoso. Sin embargo, a pesar de estas características como aislante, el  $SF_6$  es un potente y peligroso promotor del efecto invernadero. En este sentido el  $SF_6$  posee un potencial de calentamiento global (Global Warming Potential GWP) del orden de 24,000 veces superior al que posee el Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ). Por tales razones, la investigación actual se basa en la búsqueda de algún sustituto del  $SF_6$  o de mezclas de otros gases con  $SF_6$ , que cumplan por una parte, con las propiedades de aislamiento propias de este gas y por otro lado que sean gases compatibles ambientalmente, con bajo nivel de GWP. Entre los candidatos se pueden presentar mezclas de  $SF_6$  con halocarbonos, gases inertes,  $CO_2$  o  $N_2$ , este último ha sido ampliamente estudiado y recientemente se han presentado nuevos resultados. Entre las múltiples propiedades que pueden ser estudiadas en las mezclas binarias, aquellas correspondientes a la descarga eléctrica son de capital importancia. En los últimos años se han desarrollado tecnologías que utilizan plasmas de baja temperatura, en la actualidad el uso de las computadoras ha incentivado el empleo de simulaciones de los procesos antes de realizar prototipos experimentales. En estas simulaciones están involucrados una gran cantidad de parámetros, por ejemplo las secciones eficaces de los procesos involucrados, la movilidad de electrones, iones positivos o negativos, así como las reacciones electrón e ión-molécula que se producen en el plasma. Para tales propósitos en este trabajo se diseñó y construyó una Cámara de Descargas Tipo Townsend con la cual se propone estudiar los parámetros de transporte, en particular la velocidad de deriva iónica y electrónica, y las reacciones ión-molécula presentes en estos sistemas en particular. Se estudian las mezclas  $SF_6 - CO_2$ ,  $SF_6 - N_2$ , Aire y  $SF_6$  puro. Se espera que los datos presentados sirvan como una base de datos para las descargas en gases, así como para el diseño en interruptores de arco.

## ABSTRACT

Due to its excellent dielectric properties and to their physical properties the Sulfur hexafluoride ( $SF_6$ ) is widely used by the electrical industry like the best gaseous insulator. Nevertheless, in spite of these characteristics like insulator, its a powerful and dangerous promoter of the effect greenhouse. In this sense the  $SF_6$  has a Global Warming Potential (GWP) of the order of 24.000 times superior to which has Carbon Dioxide ( $CO_2$ ).

For such reasons, the present investigations are focused in the search of some substitute of this gas or a binary gas mixtures with  $SF_6$ , that fulfill on the one hand, with the isolation properties of this gas and by another side to be environmentally compatible, having a low GWP.

From the mixtures of  $SF_6$  with noble gases, halocarbons,  $CO_2$  or  $N_2$ , the last one is the most studied and recently new results were obtained. From the multiple properties that can be studied in the binary mixtures, those related to the electrical discharge is the principal subject of investigation.

In the last years the development of new technologies involving low temperature plasmas, were founded in the advance of computer-simulation for the physical and chemical processes. The use of simulations reduces the use of experimental prototypes, reducing cost and development times. In these simulations a great amount of parameters are involved, for example the effective cross-sections of the involved processes, the positive or negative ion and electron mobility in the gas that under study, as well as the ion and electron-molecule reactions that take place in the plasma.

In this work a Pulsed Townsend Discharge apparatus was designed and constructed, to study the transport parameters, principally the ion and electron drift velocity, and in some particular cases the ion-molecule reactions. The mixtures studied in this work were  $SF_6 - CO_2$ ,  $SF_6 - N_2$ , Air and  $SF_6$  pure. For those mixtures the drift velocity and the effective ionization were measured. One hopes that the presented data serve as a data base for the gas discharge simulations.

## CONTENIDO

---

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Lista de figuras.....	iii
Lista de tablas.....	x
Glosario.....	xi
Notación.....	xi

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

---

1.1	Objetivo de la tesis.....	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Estado del arte.....	2
1.4	Antecedentes.....	4
1.5	Limitaciones y alcances.....	9
1.6	Estructura de la tesis.....	10

## CAPÍTULO 2: CONCEPTOS GENERALES

---

2.1	Conceptos básicos de la teoría cinética de los gases.....	11
2.1.1	Gas ideal.....	11
2.1.2	Distribución de velocidades en un gas ideal.....	12
2.1.3	Mezclas.....	14
2.2	Propiedades de transporte de electrones e iones en gases....	16
2.2.1	Velocidad de deriva y movilidad.....	16
2.2.2	Difusión.....	17
2.2.3	Camino libre medio y $E/N$ .....	18
2.3	Reacciones electrón-molécula.....	20

2.3.1	Ionización.....	20
2.3.2	Captura electrónica e ionización efectiva.....	21
2.3.3	Clusters.....	22
2.4	Técnicas Experimentales.....	23
2.4.1	Descargas de Townsend pulsadas.....	22
2.4.2	Tubo de deriva.....	25
2.5	Propiedades eléctricas básicas del SF <sub>6</sub> .....	26
2.5.1	Breve historia.....	26
2.5.2	Propiedades químicas.....	27
2.5.3	Propiedades eléctricas.....	28
2.6	Usos del SF <sub>6</sub> en sistemas eléctricos de potencia.....	28
2.7	Problemas en el Medio Ambiente.....	30
2.8	Sustitutos del SF <sub>6</sub> .....	34

### **CAPÍTULO 3: ARREGLO EXPERIMENTAL**

---

3.1	Arreglo Experimental.....	35
3.2	Diseño y modificación de la cámara de Townsend.....	36
3.3	Instrumentación y sistema de adquisición de datos.....	46
3.3.1	Control de modulo de alto voltaje.....	46
3.3.2	Lectura de temperatura en 4 puntos.....	48
3.3.3	Programa general de control y monitoreo.....	52
3.4	Uso de amplificadores corriente-voltaje.....	54
3.4.1	Amplificador FET.....	55
3.4.2	Amplificador rápido de ganancia 10.....	59
3.5	Ensamblaje de la cámara de Townsend.....	62

### **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LOS TRANSITORIOS EXPERIMENTALES**

---

4.1	Análisis de transitorios electrónicos.....	68
4.1.1	Análisis sin difusión.....	68

4.1.2	Análisis con difusión.....	70
4.2	Análisis de transitorios iónicos.....	71
4.2.1	Análisis sin difusión.....	71

---

## **CAPÍTULO 5: MEDICIONES EN SF<sub>6</sub> PURO Y MEZCLAS**

---

5.1	Uso de los programas para análisis de transitorios.....	76
5.2	Mediciones en SF <sub>6</sub> puro .....	78
5.2.1	Mezcla SF <sub>6</sub> -Aire.....	80
5.2.2	Mezclas SF <sub>6</sub> -CO <sub>2</sub> , SF <sub>6</sub> -N <sub>2</sub> .....	82
5.2.2.1	Velocidades electrónicas.....	82
5.2.2.2	Coeficientes efectivos de ionización.....	83
5.2.2.3	Valor límite (o crítico) de E/N.....	85
5.3.	Aire puro.....	86

---

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

---

Conclusiones.....	88
Aportaciones.....	89
Sugerencias para trabajos futuros.....	90
Referencias.....	91

---

## **ANEXOS**

---

Apéndice A Listado de programas de computadora desarrollados.....	94
Listado del programa de adquisición de datos en Visual Basic®.....	94
Listado del programa para simular los transitorios electrónicos en ANSI C® .....	105

Listado del programa para simular los transitorios iónicos en

ANSI C®.....	108
Apéndice B Características del sistema de adquisición de datos.....	111
Apéndice C Características del sistema de Alto Vacío.....	114
Apéndice D Trabajo presentado en el 7° Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas Noviembre 03 al 07, 2003, México, D.F.....	118

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 2.1	Función de distribución de velocidades de Maxwell Boltzmann en términos de la fracción $v_r$ .....	13
Figura 2.2	Efecto de la difusión en función de la distancia para el ion $K^+$ en $N_2$ en un experimento de tubo de deriva.....	17
Figura 2.3	El movimiento de un ion positivo en un gas bajo el efecto del Campo eléctrico $E$ con una sola colisión elástica, las colisiones ocurren entre los iones y las moléculas.....	19
Figura 2.4	En una mezcla de dos gases A y B se pueden llevar los siguientes casos a) colisión inelástica, b) por excitación de transferencia c) ionización de segundo orden, d) transferencia de carga, e) efecto Penning.....	21
Figura 2.5	Diagrama simplificado para la cámara de Townsend.....	24
Figura 2.6	Corte transversal del tubo de deriva. A) entrada del gas a la fuente de iones, IS) región de ionización, QMS) analizador de masas cuadrupolar, GR) anillos de guarda, RR) región de termalización, DR) región de arrastre, S) orificio de muestreo de iones, C) channeltron.....	26
Figura 2.7	Molécula de $SF_6$ .....	27
Figura 2.8	Concentración de $SF_6$ en la atmósfera.....	32
Figura 3.1	Cámara de Townsend pulsada A ánodo, C cátodo, L UV laser, AMP amplificador de transimpedancia, OD osciloscopio digital, PC Computadora personal, HV fuente de alto voltaje.....	35
Figura 3.2	Diseño del capacitor en isométrico A ánodo, C cátodo, Soporte Aislante, B base.....	38
Figura 3.3	Diseño del capacitor vista frontal las acotaciones están en milímetros.....	38
Figura 3.4	Diseño Capacitor vista superior.....	39

Figura 3.5	Capacitor de la cámara de Townsend.....	39
Figura 3.6	Detalle del capacitor nótese la delgada película de cobre	40
Figura 3.7	Capacitor montado sobre la base.....	40
Figura 3.8	Diseño Base inferior vista en isométrico.....	41
Figura 3.9	Diseño de la base inferior vista frontal las acotaciones están en milímetros.....	41
Figura 3.10	Diseño de la base vista frontal las acotaciones están en milímetros.....	42
Figura 3.11	Base inferior puerto nótese los puertos.....	42
Figura 3.12	Diseño de la cámara principal isométrico puertos P, cubierta de la cámara C.....	43
Figura 3.13	Diseño de la cámara principal mostrando los puertos las acotaciones están en milímetros.....	43
Figura 3.14	Diseño de la cámara principal vista frontal las acotaciones están en milímetros.....	44
Figura 3.15	Cámara principal realizada en acero inoxidable.....	44
Figura 3.16	Diseño de la ventana vista isométrico soporte del cristal de Cuarzo.....	45
Figura 3.17	Diseño de la ventana vista superior las acotaciones están en milímetros.....	45
Figura 3.18	Diseño de la ventana vista frontal las acotación está en Milímetros.....	45
Figura 3.19	Ventana, sellos y atravesador.....	46
Figura 3.20	relación decimal a binaria en la adecuación de la Programación para Visual Basic.....	47
Figura 3.21	Gráfica de datos de control en función del voltaje de la fuente La línea representa la regresión lineal.....	48
Figura 3.22	Interfase para sensor temperatura.....	49
Figura 3.23	regresión lineal para el termistor S1.....	49
Figura 3.24	regresión lineal para el termistor S2.....	50
Figura 3.25	regresión lineal para el termistor S3.....	50

Figura 3.26	regresión lineal para el termistor S4.....	52
Figura 3.27	Ventana del programa para el sensor temperatura en 4 puntos.....	52
Figura 3.28	Ventana del programa para sensor de temperatura en 4 puntos promedio.....	56
Figura 3.29	Pantalla principal del programa de adquisición de datos para la captura de la medición del transitorio iónico SF <sub>6</sub> puro condiciones, 400 Td, presión 9.47 torr, temperatura 22°C, distancia 1.2 cm.....	54
Figura 3.30	Amplificador FET para la cámara de Townsend.....	56
Figura 3.31	Diagrama de conexiones para pruebas de ganancia del el amplificador FET.....	56
Figura 3.32	Curva de ganancia para el amplificador FET.....	57
Figura 3.33	Curva de ganancia para el amplificador FET en <i>dB</i> ....	57
Figura 3.34	Gráfica de linealidad del amplificador FET.....	58
Figura 3.35	Tiempos en la señal senoidal.....	58
Figura 3.36	Amplificador rápido de ganancia para la cámara de Townsend.....	59
Figura 3.37	Histograma del osciloscopio a la frecuencia 998 <i>kHz</i> ....	60
Figura 3.38	Histograma del osciloscopio a la frecuencia 1050 <i>kHz</i> ...	60
Figura 3.39	Histograma del osciloscopio a la frecuencia 1080 <i>kHz</i> ....	61
Figura 3.40	Curva de ganancia para el amplificador rápido de ganancia en <i>dB</i> .....	61
Figura 3.41	Mesa diseñada para la cámara de Townsend M mesa, BC base de la cámara, BM bomba mecánica.....	62
Figura 3.42	Montaje parcial de la cámara de Townsend CT, A amplificador, II filtro, HV fuente de alto voltaje, CBT controlador de la bomba turbo molecular, CSV control del sensor de vacío.....	63

- Figura 3.43 Bomba turbo molecular BT a la derecha se observa su controlador CBT a la izquierda se observa el controlador del medidor de vacío por ionización CVS, se aprecia la conexión de la válvula de seguridad V la cual protege a la bomba turbo molecular del aceite de la bomba mecánica a formarse el vacío..... 63
- Figura 3.43 bomba turbo molecular a la derecha se observa su controlador a la izquierda se observa el controlador del medidor de vacío por ionización, se aprecia la conexión de la válvula de seguridad la cual protege a la bomba turbo molecular del aceite de la bomba mecánica a formarse el vacío..... 63
- Figura 3.44 Prueba en vacío de la cámara Townsend obsérvese el sensor por ionización encendido MI, este solo funciona en presiones menores a  $1 \times 10^{-4}$  torr, BM bomba mecánica..... 64
- Figura 3.45 detalle de la fuente de alto voltaje HV con un filtro **p** para proteger de un corto circuito en caso de ruptura del dieléctrico en la cámara de Townsend..... 64
- Figura 3.46 Detalle de la fuente de alimentación y control de disparo para el laser de nitrógeno..... 65
- Figura 3.47 Laser de nitrógeno en el instante del disparo sobre el cristal de cuarzo en la cámara de Townsend para ionizar al gas..... 65
- Figura 3.48 sistema de adquisición de datos el cual consta de la PC, tarjeta de adquisición de datos, tarjeta GPIB, osciloscopio OD, multímetros digitales MD..... 66
- Figura 3.49 Detalle del diseño de la entrada de la tarjeta analógica digital Avantech ® mostrando cuatro canales para el sensor de los 4 puntos de temperatura en la cámara de Townsend..... 66
- Figura 3.50 Detalle de las conexiones para la comunicación de los instrumentos con la tarjeta GPIB..... 67
- Figura 3.51 La cámara de descargas tipo Townsend completa..... 67

Figura 4.1	Simulación del tránsito electrónico para distancias entre cátodo y ánodo del capacitor de $1,2,3 \text{ cm}$ para la cámara de descargas pulsadas tipo Townsend.....	70
Figura 4.2	Simulación de un transito electrónico para un rango de presión variable en un rango comprendido de $0.6 \text{ a } 2.3 \text{ torr}$ nótese que la magnitud de corriente esta en función de la presión.....	70
Figura 4.3	Simulación del transito electrónico a temperatura variable el efecto de temperatura en la magnitud de corriente apreciable a temperaturas ambiente, sin embargo el efecto se aprecia cuando entre temperaturas extrema de trabajo como $200 \text{ y } 400 \text{ K}$ .....	71
Figura 4.4	Simulación para el coeficientes efectivo de ionización variable en este caso se presenta cuando el coeficiente de ionización efectivo es cero , esto , es $\alpha = \eta$ entonces se tiene el valor limite o (crítico) de $E/N$ Un parámetro importante, de interés técnico y ampliamente usado en aplicaciones de descargas gaseosas.....	71
Figura 4.5	Simulación para la velocidad electrónica en $v_e$ en un rango de $0.2 * 10^7 \text{ a } 1 * 10^7 \text{ m/s}$ .....	72
Figura 4.6	variación espacio temporal de los portadores de densidad para iones positivos $n_+ = r_+(x,t)$ y para iones negativos $r_n(x,t)$ . Ambos ejes están normalizados por el mismo factor están dados en unidades arbitrarias. Los efectos de l difusión son claramente vistos en $r_+(x,t), 0$ , cátodo; d, ánodo; la escala de tiempo son $m$ .....	73
Figura 4.7	Simulación para el transito iónico con distancia variable entre el ánodo y cátodo del capacitor para $1,2,3 \text{ cm}$ .....	75
Figura 4.8	Simulación transito iónico temperatura variable.....	75

Figura 4.9	Simulación Transito iónico coeficientes efectivos de ionización Variables.....	76
Figura 4.10	Simulación transitorio iónico $V_i$ variable.....	76
Figura 4.11	Simulación para el Transito iónico $V_n$ variable.....	77
Figura 5.1	Programa de análisis de transitorios, se visualiza el transitorio tal cual es capturado en el osciloscopio para este caso se trata de un transitorio iónico a baja presión.....	78
Figura 5.2	En esta etapa se suaviza el transitorio así se puede ajustar a la curva azul la cual es el modelo teórico de la difusión.....	79
Figura 5.3	Se presenta el transitorio iónico ya ajustado al modelo Teórico de la difusión.....	80
Figura 5.4	Transitorio iónico 100 % $SF_6$ con $E/N = 400$ , $P = 3.25 Td$ .....	81
Figura 5.5	Transitorio iónico 100 % $SF_6$ con $E/N = 104 Td$ , $P = 7.82 Torr$ . .....	81
Figura 5.6	Velocidad iónica para $SF_6$ puro. Los rectángulos sólidos representan las mediciones realizadas con la CDT construida en este trabajo.....	82
Figura 5.7	Comparación entre diferentes concentraciones para la velocidad electrónica mezcla $SF_6$ -Aire.....	83
Figura 5.8	Coefficiente de ionización entre diferentes concentraciones $SF_6$ -Aire.....	83
Figura 5.9	Resultados de la velocidad electrónica de la mezcla $SF_6-N_2$ (símbolos) y una comparación con los resultados previos de Aschwanden (líneas sólidas) [26].....	84
Figura 5.10	Resultados de la velocidad electrónica de la mezcla $SF_6-CO_2$ (símbolos). Las líneas son solo indicativas.....	85

Figura 5.11	Coeficientes efectivos de ionización (símbolos), comparados con los resultados experimentales de Aschwanden (líneas sólidas) para $SF_6 - N_2$ [4].....	86
Figura 5.12	Coeficientes efectivos de ionización para $SF_6 - CO_2$ . Las líneas son solo indicativas.....	86
Figura 5.13	Variación de valor limite de E/N para las dos mezclas en función de la concentración de $SF_6$ . Para comparación se presenta los datos experimentales de E/N <sub>crit</sub> determinados por Aschwanden.....	87
Figura 5.14	Velocidad electrónica aire 100 % puro comparación con el trabajo de Dutton.....	88
Figura 5.15	Coeficiente de ionización para el aire 100 % puro.....	89
Figura B-1	Osciloscopio TDS3012B.....	113
Figura B-2	Multímetro Fluke 45.....	113
Figura B-3	Tarjeta de adquisición de datos.....	114
Figura B-4	Tarjeta GPIB.....	114
Figura B-5	Laser ultra violeta de Nitrógeno.....	115
Figura B-6	Módulo de alto voltaje (HV) y características principales	115
Figura C-1	Bomba mecánica de vacío.....	116
Figura C-2	Bomba turbo molecular ATP80 y su controlador ACT200	117
Figura C-3	Controlador de velocidad Bomba turbo molecular.....	117
Figura C-4	Manómetro de efecto capacitivo Baratron.....	118
Figura C-5	Medidor iónico de filamento caliente.....	118
Figura C-6	Módulo de control para el medidor iónico.....	117

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCION

### 1.1 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo general de ésta tesis es: Diseñar y construir una Cámara de Descargas tipo Townsend (CDT) que opere con un sistema de control y monitoreo computarizado.

Como objetivos específicos se tienen:

- Diseñar y construir los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos de la CDT.
- Diseñar y elaborar un programa maestro de operación de la CDT que controle y capture las variables físicas, que adquiera la corriente de la descarga.

La CDT se instalará para su funcionamiento en el Laboratorio de Fenómenos Críticos y Fluidos Complejos del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

Con el análisis de los datos que se obtengan de los experimentos realizados con la CDT que se construyó, se pretende contribuir a la generación del conocimiento de las interacciones electrón-ión, electrón-molécula, e ión-molécula a nivel experimental. Los conocimientos que se generaran con los experimentos de la CDT se enmarcan en el área de la Física de Descargas Eléctricas, generando una base de datos que sirva para la prueba de modelos computacionales que se utilizan en el diseño de diferentes sistemas con aplicaciones en la industria eléctrica. Contribuir al estudio de las propiedades de transporte de mezclas gaseosas que al sustituir el uso de gases como el hexafloruro de azufre puro ( $SF_6$ ), disminuyan el efecto invernadero causado por las fugas en los equipos o por vaciar directamente a la atmósfera este gas durante la operación de equipos en la industria eléctrica.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se ha generado un gran interés por disminuir las emisiones de gases que producen el efecto invernadero, en nuestro caso el conocimiento que se genere en éste trabajo, forma parte de un esfuerzo a nivel mundial por encontrar mezclas gaseosas que disminuyan el uso de gases como el  $SF_6$  en la industria eléctrica y de semiconductores. Estas mezclas deben de preservar las propiedades de transporte de iones y electrones, así como de otras propiedades tales como el voltaje de ruptura.

Es de vital importancia el impulsar proyectos de investigación experimental, sobre todo en casos en los que se contribuye tanto al conocimiento en Ciencia Básica, como en aplicaciones en Ingeniería, medio ambiente o de uso industrial, mediante la elaboración de proyectos interdisciplinarios con otras ciencias o ingenierías.

## 1.3 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años se han desarrollado tecnologías que utilizan plasmas de baja temperatura, el uso de las computadoras ha incentivado el empleo de simulaciones de los procesos antes de realizar prototipos experimentales, lo que ahorra una gran cantidad de dinero en la etapa de desarrollo. En estas simulaciones se consideran una gran cantidad de parámetros, por ejemplo las secciones eficaces de los procesos involucrados, la movilidad de electrones e iones en el gas que se estudia, así como las reacciones ión-molécula que se producen en el plasma.

El escoger la mezcla bajo estudio es muy importante, ya que de esto dependen las aplicaciones de los datos producto de este estudio, para ello enfocaremos nuestro esfuerzo en el área de vital importancia el cual se describe a continuación. Gases o plasmas con aplicaciones industriales, y con un impacto nocivo en el medio ambiente.

En la actualidad hay una gran cantidad de contaminantes atmosféricos que se generan mediante el uso de nuevas tecnologías, tales como el  $SF_6$  que se usa

como aislante en transformadores, y como extinguidor de descargas en interruptores de alto voltaje utilizados en la generación y distribución de electricidad, los óxidos de azufre y de nitrógeno ( $SO_x$  y  $NO_x$ ) producidos por el uso de combustibles fósiles, y el uso de fluorocarbonos ( $CF_4$ ,  $CHF_3$ ,  $C_2F_4$ ,  $C_4F_8$ ) que finalmente son emitidos a la atmósfera.

En el caso de los  $NO_x$  y  $SO_x$ , existen métodos para su eliminación mediante el uso de plasmas de baja temperatura, pero hace falta conocer las reacciones ión-molécula y los parámetros de transporte en los gases producto de la combustión.

Los parámetros de transporte que se obtengan con la CDT en futuros trabajos, podrán generar bases de datos confiables para la simulación y desarrollo de estos sistemas, obteniendo así mejores rendimientos.

El hexafluoruro de azufre es uno de los mejores aislantes en aplicaciones de alto voltaje, pero con el inconveniente de ser el gas con mayor efecto invernadero. En este sentido el  $SF_6$  posee un potencial de calentamiento global (Global Warming Potential  $GWP$ ) del orden de 24,000 veces superior al que posee el Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ) [1,2]. En 1996, la razón de crecimiento de la proporción de este gas en la atmósfera fue del 6.9 % y aunque la extrapolación es imprecisa, se espera que para el año 2010 la concentración del  $SF_6$  en la atmósfera podría alcanzar los 10 ppm. [1].

Se han realizado una serie de esfuerzos encaminados a disminuir sus efectos en el corto plazo mediante el uso de mezclas de  $SF_6$  con otros gases con menor o incluso un nulo efecto invernadero, tal es el caso del nitrógeno. Se ha encontrado que las mezclas con contenido de 40–50 % de  $SF_6$  en  $N_2$  (por volumen) son las ideales para sustituir el  $SF_6$  en las aplicaciones de aislante en sistemas de alto voltaje, y en los interruptores de alto voltaje para extinguir las descargas de arco [1,3]. En el caso de concentraciones menores de  $SF_6$  en estas mezclas, cercano al 10 %, las características dieléctricas para

transitorios rápidos de alto voltaje, son similares a las de  $SF_6$  puro, y puede ser usada en líneas de transmisión con aislamiento por gas [4].

La mezcla  $SF_6 - N_2$  ha sido una de las más ampliamente estudiadas de una larga lista de posibles candidatos a sustituir al  $SF_6$  puro. En una revisión exhaustiva que fue publicada recientemente [5], parece ser que a diferencia del  $SF_6$  puro, para el que se tiene una gran cantidad de estudios sobre las propiedades de transporte iónico y las reacciones ión-molécula[6-11], en las mezclas no hay datos disponibles de estos parámetros, Rao y Olthoff [7], midieron las distribuciones de energía cinética de los iones en una descarga en  $SF_6$  a valores altos del campo eléctrico normalizado a la densidad del gas  $E/N$ , encontraron que el esquema de reacciones ión-molécula es difícil de comprender, principalmente en el caso de los iones positivos. Los estudios concernientes a la descomposición química ocurrida al inyectar gas en una descarga eléctrica, se han concentrado en los radicales neutros formados [6, 7,10]. Solo unos cuantos estudios se han enfocado a la detección de iones formados a través de descargas de chispa en la mezcla  $SF_6 - N_2$ , en los que el nitrógeno se encuentra a nivel de impureza, 20-500 ppm. Incluso en estas concentraciones tan bajas, los iones que contienen nitrógeno, como por ejemplo  $S_2F_8N^+$ , son más abundantes que los iones provenientes de  $SF_6$  puro. El conocimiento de las velocidades de deriva iónica es esencial para evaluar la energía promedio de los iones, y las tasas de reacción ión-molécula, en este tipo de sistemas es conveniente usar equipos con análisis en masa. Estos datos son necesarios en el modelado de plasmas, donde afectan de forma significativa las propiedades macroscópicas de las descargas.

## 1.4 ANTECEDENTES

Los primeros estudios en plasmas se deben a Townsend a principios del siglo XX, “dedicados a la conducción de electricidad en gases”, en 1905 Langevin [12] realizó modificaciones sustanciales a un trabajo anterior en que se

modelaba la interacción ión-molécula como dos esferas duras, con el único potencial de pared repulsiva infinita. Esta teoría se descartó, pues quedó en fuerte desacuerdo con las movibilidades medidas principalmente a bajo  $E/N$  en aquella época. Los tubos de deriva fueron usados desde fines del siglo XIX [13-16] en forma continua para la medición del transporte iónico y electrónico. Con la construcción de varios tubos de deriva con análisis de masa en la década de 1960 comenzó un nuevo auge en la medición de la movilidad y las tasas de reacción, ya que se hizo posible la identificación del ión resultante de las reacciones ión molécula que ocurre durante la deriva del ión. La mayoría de los coeficientes de transporte conocidos se concentra en mediciones utilizada para la confirmación o desarrollo de las teorías de transporte iónico [20]. Para ello, se utilizaron gases nobles como de arrastre, y se estudiaban iones alcalinos simplemente cargados ( $H^+$ ,  $Li^+$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ ). En la década de 1980 con el trabajo de Aschwanden Th [17,18], el más importante sobre las propiedades de transporte del  $SF_6$  puro y en la década de 1990 organizaciones como el *IEEE* y *CIGRE* entre otras [19] advierten sobre la peligrosidad de  $SF_6$  como un potente gas invernadero, así como las posibles alternativas las cuales proponen mezclas que disminuyan su efecto nocivo. A la fecha se han realizado un gran esfuerzo internacional por parte de grupos de investigadores para encontrar mezclas sustitutos utilizando la técnica de plasma de baja temperatura que minimice el efecto invernadero del  $SF_6$  [20,21], véase tabla 1.1.

Tabla 1.1 Se muestra una lista el desarrollo histórico de los trabajos realizados en este ámbito.

<b>Autores</b>	<b>Gas puro o Mezcla</b>	<b>Método</b>	<b>Institución / Organización/ Publicación</b>	<b>Año</b>
J.S. Townsend [12]	Gases ionizados		Phil. Trans <b>193,129</b>	1889
Langevin Ann [13]	Gases ionizados		Chim Phys., Vol. <b>5, 245</b>	1905
Tyndall [14]	Movilidad ion $Li^+, Na^+$	Tubo de deriva	Cambridge University	1938
Biondi and Chanin [15]	Movilidad ion $Xe^+$	Tubo de deriva	Phys. Rev. <b>94</b> , 910	1954
Crompton and Elford [16]	Movilidad ion $K^+$	Tubo de deriva	Proc. Phys London	1959
Monsley,snuggs,Martin, and McDaniel [17]	Movilidad ion $N_4^+$	Tubo de deriva con análisis de masa	Phys. Rev. <b>178,234</b>	1969
Keller and Beyer [18]	Movilidad ion $K^+$	Tubo de deriva con análisis de masa	Private communication	1971
Graham [19]	Movilidad ion $H^+$	Tubo de deriva con análisis de masa	Georgia Institute of Technology.	1974
J. Urquijo, I. Alvarez, C Cisneros [20]	Análisis transitorio de la velocidad y la difusión longitudinal de iones en descargas de campo uniforme	Análisis matemático para el Método pulsado de Townsend	Centro de Ciencias Físicas U.N.A.M	1984
Aschwanden Th [21]	Estudio de iones de $SF_6$	Método pulsado de Townsend	New York: Pergamon	1984

Aschwanden Th [22]	Estudio de iones de $SF_6$	Método pulsado de Townsend	ETH Zürich Switzerland	1985
James, DR, et al [23]	Investigación de la producción $S_2F_{10}$ en sistemas eléctricos de potencia aislados por $SF_6$		Institute of Electrical and Electronics Engineers, inc (IEEE)	1993
Penderson, P H [24]	Sustitutos de los potentes gases invernadero ( $HFCs$ , $PFCs$ y $SF_6$ )		Danish Technological Institute	1997
D M Xiao, L Li Zhu and Z Chen [25]	Determinación de Parámetros de enjambre en electrones en mezclas de $SF_6 / Ne$	Método pulsado de Townsend	School of Electric Engineering, Shangay Jiaotong University, Shangai	1998
D M Xiao, L Li Zhu and Z Chen [26]	Parámetros de enjambre en electrones en mezclas de $SF_6$ y $He$	Método pulsado de Townsend	School of Electric Engineering, Shangay Jiaotong University, Shangai	1999
J. Urquijo, I. Álvarez, C Cisneros [27]	Ionización, captura electrónica, y deriva en $CHF_3$	Método pulsado de Townsend	Centro De Ciencias Físicas U.N.A.M	1999
U.S. EPA [28]	Guía para mezclas de $SF_6$		International Council on Large Electric Systems (CIGRE)	2000
D M Xiao, L Li Zhu and X G Li [29]	Coeficientes de transporte electrónico en mezclas $SF_6$ y Xenón	Método pulsado de Townsend	School of Electric Engineering, Shangay Jiaotong University, Shangai	2000

U.S. EPA [30]	Subproductos del $SF_6$ en la industria eléctrica		US EPA	2001
J. Urquijo E. Basurto [31]	Captura electrónica, ionización y deriva en $c - C_4F_8$	Método pulsado de Townsend	Centro De Ciencias Físicas U.N.A.M	2001
D M Xiao, L Li Zhu and X Xu [32]	Parámetros de enjambre en mezclas $SF_6$ y $CO_2$	Método pulsado de Townsend	School of Electric Engineering, Shangay Jiaotong University, Shangai	2001
J. Urquijo E. Basurto [33]	Movimiento de $SF_x^+$ ( $x = 1 - 3,5$ ) y conversión del ión en mezclas de $SF_6 - N_2$	Método pulsado de Townsend	Centro De Ciencias Físicas U.N.A.M	2001
J. Urquijo E. Basurto [34]	Movilidad de $CF_3^+$ en $CF_4, CF_2^+$ en $CF_3$ , y $C^+$ en $Ar$	Tubo de deriva doble análisis de masa	Centro De Ciencias Físicas U.N.A.M	2001
M J Pinheiro and J Loureiro [35]	Coeficientes de ionización efectiva y velocidades de deriva electrónicas para mezclas gaseosas de $SF_6$ con $He, Xe, CO_2$ y $N_2$ usando análisis de Boltzmann	Análisis matemático para el Método pulsado de Townsend	Centro de Física dos Plasmas, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, Lisboa Portugal	2002
J. Urquijo E. Basurto J.L. Hernández [36]	Transporte del electrón y parámetros de enjambre en $CO_2$ en mezclas con $SF_6$	Método pulsado de Townsend	Centro De Ciencias Físicas U.N.A.M U.A.M Azcapotzalco Departamentos Energía y Ciencias Básicas	2002
J. Urquijo E. Basurto J.L.	Estudio temporal del movimiento de iones	Método pulsado de	Centro De Ciencias Físicas	2002

Hernández [37]	negativos en el $SF_6$ en altas presiones	Townsend	U.N.A.M U.A.M Azcapotzalco Departamentos Energía y Ciencias Básicas	
J. Urquijo E. Basurto J.L. Hernández y F. Ramírez [38]	Enjambre de electrones y coeficientes de transporte para las mezclas binarias de $SF_6$ con $Ar$ y $Xe$	Método pulsado de Townsend	Centro De Ciencias Físicas U.N.A.M	2003

## 1.5 LIMITACIONES Y ALCANCES

En este trabajo se logró construir una CDT para el estudio de las propiedades de transporte y de reacción en gases dieléctricos, las ventajas principales del sistema construido son:

- Presiones del gas bajo estudio de hasta 1500 torr.
- Uso de un volumen aproximado de 5 litros del gas de trabajo.
- Sistema de control computarizado.

Con estas ventajas el sistema puede trabajar bajo condiciones de mayor presión que los sistemas convencionales, y con ligeras modificaciones en los medidores de presión se pueden lograr presiones aun mayores. Esto permite realizar experimentos en condiciones más cercanas a las condiciones de trabajo en la industria.

La principal limitante del sistema consiste en que la distancia entre electrodos es fija, esta se puede cambiar pero hay que abrir el sistema para poder modificarla, por lo que con el diseño actual no se puede variar la distancia entre electrodos entre mediciones consecutivas.

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo se divide en 6 capítulos:

En el capítulo 1 "Introducción". Se define el objetivo del presente trabajo, se presenta el estado del arte sobre la problemática en este ámbito, así como un marco histórico sobre los trabajos realizados en este rubro.

En el capítulo 2 "Conceptos generales". Se definen los conceptos básicos de la teoría del transporte, así como las técnicas de estudio de los fenómenos del transporte, cámara de descargas tipo Townsend y tubo de deriva.

Se presenta el uso del  $SF_6$  en los sistemas eléctricos de potencia en las principales aplicaciones en la industria eléctrica como aislante de alta tensión, el impacto ambiental como un gas de efecto invernadero y las posibles mezclas para solucionar el problema.

En el capítulo 3 "Arreglo experimental". Se detalla el diseño y construcción de la cámara de descargas tipo Townsend, se hace la descripción del sistema de alto vacío, se detalla el diseño del software de adquisición de datos, y la utilización de los amplificadores de corriente-voltaje.

En el capítulo 4 "Análisis de los transitorios experimentales". Se hace un análisis y simulación del modelo de los transitorios electrónicos y iónicos sin el efecto de la difusión sobre la base de teoría del transporte de carga eléctrica.

En el capítulo 5 "Mediciones en  $SF_6$  puro y mezclas" Se presenta un estudio bibliográfico de las mediciones existentes para  $SF_6$  puro y sus mezclas. Se presentan las mediciones realizadas en este trabajo para  $SF_6$  puro.

En el capítulo 6 "Conclusiones" Se analizan los resultados de este trabajo, así como las aportaciones y sugerencia para mejorar al mismo.

## CAPÍTULO 2

### CONCEPTOS GENERALES

#### 2.1 Conceptos básicos de la teoría cinética de los gases.

En el presente trabajo se estudian descargas tipo Townsend en gases a presiones menores de una atmósfera por lo que se pueden describir como gases ideales. A continuación se da una breve introducción sobre los conceptos que se analizan.

##### 2.1.1 Gas ideal

Todos los gases se aproximan a un gas ideal cuando la presión es mucho menor a una atmósfera, debido a que las moléculas se separan cada vez más, de manera que las fuerzas de interacción entre ellas disminuyen y dichas moléculas ocupan una parte despreciable del volumen total. La ecuación de estado que relaciona su presión  $P$ , el volumen  $V$ , la temperatura absoluta  $T$ , y el número  $n$  de partículas del gas esta dada por [31,32]

$$PV = nk_B T, \quad (2.1)$$

donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann.

A la ecuación (2.1), la escribiremos de la siguiente forma [33] ;

$$P = Nk_B T, \quad (2.2)$$

donde  $N = n/V$  es la densidad del gas y tiene unidades de partículas por unidad de volumen. Esta ecuación es de uso común en descargas en gases, ya que  $N$  es una variable importante. Cuando la presión es muy grande el gas deja de comportarse como un gas ideal, en general la industria eléctrica trabaja con gases a altas presiones. En este caso tenemos la ecuación de estado de Van der Waals (1873) como una primera aproximación;

$$p_c = a/27b^2, \quad (2.3)$$

donde  $a$  y  $b$  son coeficientes que están en función de  $T$  y  $P$  [32].

### 2.1.2 Distribución de velocidades en un gas ideal

En un gas ideal las moléculas que forman el gas se mueven de forma azarosa pero la rapidez promedio de éstas es una constante cuando el gas está en equilibrio térmico, de la Física estadística se obtiene la distribución de velocidades de las partículas en un gas ideal y que se conoce como la distribución de velocidades Maxwell-Boltzmann y describe de forma estadística el movimiento de las partículas debido a la temperatura del gas, por esta razón las variables obtenidas utilizando esta distribución se conocen como “térmicas” [31].

Si para un total de  $n$  partículas,  $dn$  es el número de partículas con velocidades entre  $v$  y  $v + dv$ ,  $dn/n$  representará la probabilidad de que  $dn$  partículas tengan velocidades en ese mismo intervalo, y estará dada por

$$dn/n = 4/\sqrt{\pi} (v/v_p)^2 e^{-(v/v_p)^2} dv/v_p, \quad (2.4)$$

donde  $v_p$  es la velocidad más probable.

Definiendo la función de distribución de velocidades  $f(v/v_p)$  desde cero hasta infinito como  $f(v/v_p) = \frac{dn/n}{dv/v_p}$ , que se conoce como la distribución de velocidades de Maxwell-Boltzmann (ver figura 2.1). Esta función asocia una probabilidad a cada valor de velocidad en términos de los valores absolutos referidos anteriormente se tiene entonces que

$$f(v/v_p) = 4/\pi (v_p/v)^2 e^{-(v/v_p)^2}, \quad (2.5)$$

donde  $v_v = v/v_p$  y es la proporción de velocidad de las particulares con respecto al valor más probable, rescribiendo (2.4) toma la siguiente forma:

$$dn/n = f(v_v) dv_v, \quad (2.6)$$

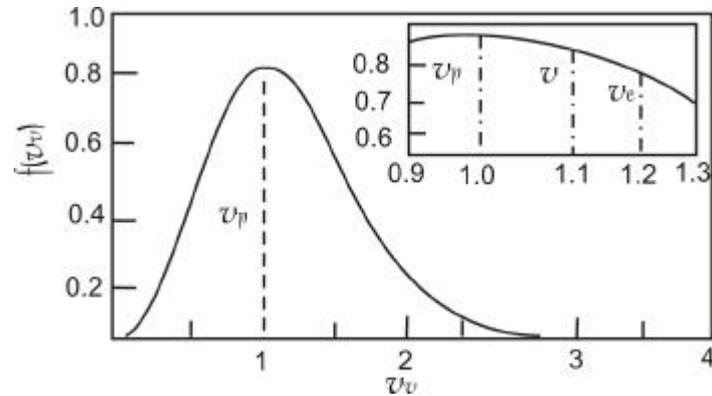


Figura 2.1 Se muestra la forma de la función de distribución de velocidades de Maxwell Boltzmann en términos de la fracción  $v/v_p$  [31].

Una vez que se conoce la distribución de velocidades de las partículas de un gas, se puede deducir la velocidad promedio de las mismas con la expresión

$$\bar{v}_v n = \int_0^{N_t} v_v dn, \quad (2.7)$$

de modo que al despejar  $dn$  de (2.4) y sustituir en (2.7) se obtiene

$$\bar{v}_v = 4/\sqrt{\mathbf{p}} \int_{v_v=0}^{v_v=\infty} v_v^3 e^{-v_v} dv_v = 4/2\sqrt{\mathbf{p}}. \quad (2.8)$$

Como  $v_p$  se definió como la fracción de velocidades relativa al valor más probable, entonces el promedio de todas las velocidades  $\bar{v}$  será tal que

$$\bar{v} = 2/\sqrt{\mathbf{p}} v_p. \quad (2.9)$$

La desviación cuadrática media de la distribución de velocidades se obtiene por medio de un procedimiento análogo al anterior y que consiste en obtener el segundo momento de la distribución. Por otro lado, a partir de la teoría cinética y de la ley universal de los gases [32] se puede deducir una expresión para calcular la energía cinética promedio ( $E_k$ ) de una partícula en función de la temperatura.

$$E_k = 3/2 k_B T, \quad (2.10)$$

Finalmente, si la temperatura se mantiene constante, la energía promedio de las partículas que conforman una mezcla gaseosa que contenga partículas neutras, como átomos o moléculas, y partículas cargadas libres, como iones o electrones será tal que;

$$\frac{1}{2}mv_e^2 = \frac{1}{2}m_iv_{ie}^2 = \frac{1}{2}m_ev_{ee}^2 = \frac{3}{2}k_B T, \quad (2.11)$$

donde  $m, m_i$  y  $m_e$ , son las masas de los átomos o moléculas, de los iones y de los electrones respectivamente, mientras que  $v_e, v_{ie}$  y  $v_{ee}$  son sus velocidades respectivas.

### 2.1.3 Mezclas

Supóngase que un recipiente es llenado con una mezcla de dos gases. Si los átomos o moléculas que la conforman no interactúan entre sí, el sistema puede considerarse como una mezcla de gases ideales. Asumiendo además que la mezcla es homogénea en todo el espacio disponible ( $\nabla N = 0$ , donde  $N$  es la densidad del gas), el volumen total del recipiente  $V$  será llenado por una porción  $V_1$  del primer miembro de la mezcla y una porción  $V_2$  del segundo miembro; entonces;

$$V = V_1 + V_2, \quad (2.12)$$

de acuerdo con la ley del gas ideal, los volúmenes de cada uno de los miembros de la mezcla pueden expresarse en términos de sus concentraciones, de la presión y de la temperatura a la que se encuentra el recipiente;

$$V_1 = n_1 k_B T / P \quad V_2 = n_2 k_B T / P, \quad (2.13)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los números de átomos o moléculas de cada uno de los elementos gaseosos que forman a la mezcla y  $k_B$  es la constante de Boltzmann.

De esta forma, el volumen total será:

$$V = n_1 k_B T / P + n_2 k_B T / P, \quad (2.14)$$

A partir de la ecuación (2.12), la presión a la que se encuentra la mezcla puede presentarse en términos de las densidades volumétricas de partículas de cada uno de los gases que la conforman,  $N_1 = n_1/V$  y  $N_2 = n_2/V$ , así como de la temperatura a la que se encuentra el sistema;

$$P = N_1 k_B T + N_2 k_B T, \quad (2.15)$$

La expresión (2.15) es conocida como la ley de las presiones parciales [41] y en ella se establece que en una mezcla de gases ideales cada una de sus componentes se comporta como si las otras no estuvieran presentes en el recipiente. Así, la presión total producida por la mezcla es igual a la suma de las presiones que producirían cada uno de sus elementos si se encontraran solos en un recipiente a la misma temperatura que se encuentra la mezcla completa. En el caso de la mezcla binaria;

$$P = p_1 + p_2, \quad (2.16)$$

donde  $p_1$  y  $p_2$  son las presiones parciales producidas por cada uno de los dos miembros de la mezcla.

Con base en la expresión (2.16), el recipiente puede ser llenado hasta una presión  $P$  admitiendo primero un cierto porcentaje del primer gas y completando después el porcentaje restante con el segundo miembro de la mezcla. Este procedimiento permite variar controladamente la concentración

de cada uno de los gases que componen una mezcla, para obtener una mezcla en porcentajes  $x_1$  y  $x_2$ . Para una presión final de 100 torr se llena con  $x_1$  torr de la mezcla 1 y después se llena hasta 100 torr de la mezcla 2 [31].

## 2.2 Propiedades de transporte de electrones e iones en gases.

### 2.2.1 Velocidad de deriva y movilidad.

Si se aplica un campo eléctrico homogéneo a través de un gas, un flujo estable de iones y/o electrones a lo largo de las líneas de campo será desarrollado. La velocidad del centro de masa de la nube iónica, que es el equivalente de la velocidad promedio de los iones, es llamada velocidad de deriva o de arrastre  $V_d$ , la velocidad de deriva es constante a escala macroscópica y se define como [31];

$$V_d = iE \quad , \quad (2.17)$$

La movilidad  $i$  aparece en la ecuación (2.17), como una constante, pero esto es cierto solo para bajas energías. Es muy importante reportar la presión y la temperatura a la que se mide la movilidad de un enjambre de iones. Como la gran mayoría de los experimentos se hacen a temperatura ambiente, para comparar la movilidad obtenida a diferentes temperaturas y presiones, se reporta la movilidad normalizada a la densidad gaseosa  $N_0$ , en condiciones de presión (760 torr) y temperatura estándar (273 K);

$$K_0 = V_d / (N_0 [E/N]) \quad (2.18)$$

donde  $K_0$  es la movilidad reducida y  $N_0 = 2.69 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ . Como  $K_0$  depende de  $E/N$ , si variamos  $E$  o  $N$  manteniendo constante  $E/N$  entonces  $K_0$  es la misma, por ello las mediciones se reportan en unidades de E/N [31,33].

### 2.2.2 Difusión.

Se Considera una colección localizada de iones de un solo tipo en un gas de temperatura uniforme y suponga que el número de densidad  $N_i$  de los iones es demasiado bajo para ignorar las fuerzas de repulsión de Coulomb entre iones. El flujo de difusión toma lugar en la dirección opuesta a su gradiente de concentración y es directamente proporcional a su magnitud. La constante de proporcionalidad es llamada el coeficiente de difusión y es denotada por el símbolo  $D$ . La difusión conlleva la mezcla de las moléculas de las sustancias mediante colisiones y movimientos desordenados hasta que la mezcla alcanza una composición uniforme, así el flujo iónico de densidad  $J$  esta dado por;

$$J = -D\nabla n, \quad (2.19)$$

se conoce como la ley de Fick para difusión, la magnitud de  $J$  es igual a número de iones por unidad de tiempo que cruza a través de una unidad de área normal a la dirección del flujo, donde  $D$  es una propiedad del par ion-neutro. La velocidad del flujo de difusión  $v$  esta dado por:

$$v = -D/n\nabla n. \quad (2.20)$$

En la figura 2.2 se muestra el efecto de la difusión en el desplazamiento de iones a lo largo de un campo eléctrico, conforme avanza la nube de iones se va ensanchando por efecto de la difusión.

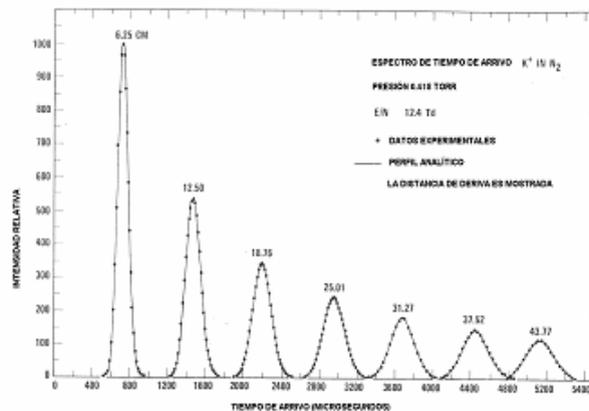


Figura 2.2 Efecto de la difusión en función de la distancia para el ion  $K^+$  en  $N_2$  en un experimento de tubo de deriva [33].

Si la intensidad del campo eléctrico es ahora aumentada a un nivel en la cual los iones adquieren una energía promedio apreciablemente mayor a la energía térmica de las moléculas de gas. La energía térmica viene ser menos importante, pero dos componentes del movimiento son producidos por el campo de eléctrico: una componente a lo largo de las líneas de campo y una componente perpendicular. De esta forma la difusión ya no es isotrópica por lo que ahora se tiene que  $D_T$  es el coeficiente de difusión transversal, que describe la razón de difusión en dirección perpendicular a  $E$  y  $D_L$  es el coeficiente de difusión longitudinal caracterizado por la difusión en la dirección de campo eléctrico [31]. El coeficiente de difusión será un tensor de la forma;

$$D = \begin{vmatrix} D_T & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_L \end{vmatrix}, \quad (2.21)$$

### 2.2.3 Camino libre medio y $E/N$

Definiendo el camino libre medio  $\mathbf{l}$ , la distancia que recorre un ión o electrón entre colisiones sucesivas con los neutros de un gas (véase la figura 2.3) [33];

$$\mathbf{l} = 1/NQ_s, \quad (2.22)$$

donde  $Q_s$  es la sección de dispersión elástica. Ahora bien, entre colisiones sucesivas, en la presencia de un campo eléctrico homogéneo  $E$ , el ion adquirirá una energía cinética;

$$W = e\Delta V = e\mathbf{l}E = [e/Q_s][E/N], \quad (2.23)$$

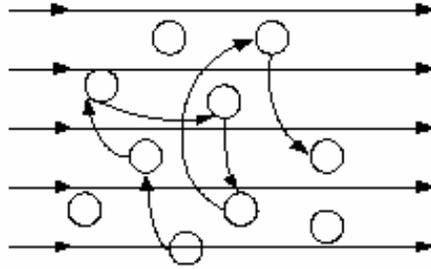


Figura 2.3 El movimiento de un ion positivo en un gas bajo el efecto del campo eléctrico  $E$  con una sola colisión elástica, las colisiones ocurren entre los iones y las moléculas [33].

Se observa que la energía cinética adquirida por el ion es proporcional al parámetro  $E/N$ . En los experimentos de enjambres  $E/N$  desempeña un papel similar al de la energía en los experimentos de haz, de hecho esta íntimamente ligado a la energía promedio del enjambre. Por esta razón,  $E/N$  se define como una sola variable, y todos los demás parámetros experimentales de iones o electrones en gases se miden en función de  $E/N$ , cuyas unidades son  $[Vm^2]$ .

Desde 1966 es común utilizar la unidad Townsend, donde  $1 Td = 10^{-21} Vm^2$

Tabla 2.1 Valores del camino libre medio  $\lambda$  de algunas moléculas gaseosas, su velocidad media  $\bar{v}$  y su frecuencia de colisiones  $\bar{\nu}_e$  calculadas a partir de la teoría cinética de los gases con  $T = 288 K$  y  $P = 760 torr$  [31].

Gas	Peso molecular	$\lambda$ $10^{-8} m$	$\bar{v}$ $m/s$	$\bar{\nu}_e$	Diámetro $\text{Å}$
$H_2$	2.016	11.77	1.740	14.8	2.74
$He$	4.002	18.62	1.230	6.6	2.18
$H_2O$	18.000	4.18	580	13.9	4.60
$Ne$	20.180	13.22	550	4.2	2.59
$N_2$	28.020	6.28	467	7.4	3.75
$O_2$	32.000	6.79	437	6.4	3.61
$A$	39.940	6.66	391	5.9	3.64
$CO_2$	44.000	4.19	372	8.8	4.59

## 2.3 Reacciones Electrón-Molécula

### 2.3.1 Ionización.

La ionización consiste en desprender un electrón de un átomo por medio de la colisión de éste con un electrón. Si una avalancha es producida a partir de un grupo inicial de fotoelectrones del cátodo de un capacitor de placas planas y paralelas, los electrones formaran una nube que será arrastrada a través del gas contenido en el interior del capacitor. Dependiendo de la energía que adquiera los electrones entre colisiones sucesivas y de las propiedades del gas, las colisiones podrían dar lugar a nuevos portadores de carga a partir de la ionización de los elementos del gas. Cada proceso de ionización tiene como consecuencia la adición de portadores de carga al plasma, entonces las densidades de los portadores de carga en el espacio interelectrónico dependerán tanto de la naturaleza del gas y de las partículas cargadas, como de la energía con las que estas últimas son arrastradas.

Las densidades de cada una de las especies cargadas que producen los electrones durante su tiempo del transitorio en una avalancha son una consecuencia de la energía con la que cada electrón cuenta al momento de cada choque; esta energía es el resultado del arrastre eléctrico del electrón en el camino libre que procede a la colisión; entonces, el promedio de la energía con la que los electrones golpean a los átomos o moléculas que constituyen el gas es proporcional al camino libre promedio [31,33] y a  $E/N$ . En la figura 2.4 se muestran algunos de los tipos de colisiones que pueden presentarse en un plasma.

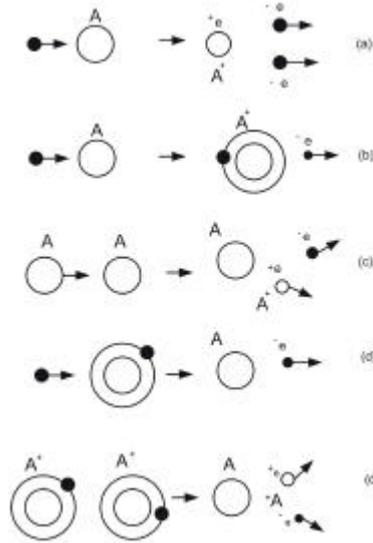


Figura 2.4 En una mezcla de dos gases A y B se pueden dar los siguientes casos a) colisión inelástica, b) por excitación de transferencia c) ionización de segundo orden, d) transferencia de carga, e) efecto Penning [31].

### 2.3.2 Captura Electrónica e Ionización efectiva.

La captura electrónica consiste en que el electrón es retenido por el neutro de tal forma que ahora se forma un ión negativo, en este caso no cambia en número de portadores de carga, solo el tipo de portador y con ello sus propiedades de transporte.

Si en el espacio comprendido entre las placas de un capacitor en donde se genera una avalancha se divide en secciones planas de ancho  $dx$  paralelas a los electrodos y se dice que en cada una de tales secciones se produce un cierto número de colisiones ionizantes y un cierto número de capturas electrónicas; entonces, el cambio en el número de electrones será igual al número de ionizaciones menos el número de capturas. De esta manera se tendrá que [31]:

- a) El coeficiente de ionización  $\alpha$  se define como el número de ionizaciones que se producen por cada electrón, por unidad de desplazamiento en dirección del campo.

- b) El coeficiente de captura electrónica  $h$  es definido como el número de electrones capturados por los átomos o moléculas del gas por electrón, por unidad de desplazamiento en la dirección del campo.
- c) El coeficiente de ionización efectiva  $a_e$ , es igual a la diferencia entre los coeficientes de ionización y captura electrónicas definidos.

$$a_e = a - h, \quad (2.24)$$

Los coeficientes de ionización y captura electrónica generalmente son proporcionales a la densidad del gas, tal como se hace con la intensidad del campo eléctrico, estos parámetros suelen ser reportados normalizados a la densidad del gas en donde fueron registrados:

$$a/N, h/N, a_e/N = (a - h)/N, \quad (2.25)$$

De esta manera, los parámetros reportados no dependerán de  $N$ , sino únicamente de  $E/N$ . Así mismo, el cociente entre los coeficientes de ionización y captura electrónica  $h/a$  es un parámetro importante en el análisis de una avalancha ya que representa una medida de la relación que existe entre la producción y a la desaparición de electrones en la descarga.

El coeficiente de ionización efectiva  $a_e$  y la razón  $h/a$  tienen una característica en común. En las gráficas correspondientes a cada uno de estos parámetros se puede distinguir el valor de  $E/N$  para el cual los procesos de ionización y captura se nivelan entre sí,  $a_e = 0$  y  $h/a = 1$ ; a este valor se le conoce como  $E/N$  crítico o  $E/N_{crit}$ .

### 2.3.3 Clusters

Se define a un cluster como un grupo de moléculas o átomos (desde 2 hasta  $n$  moléculas) que están unidos por una fuerza mucho más débil que la fuerza que une los átomos en una molécula.

## 2.4 Técnicas Experimentales.

### 2.4.1 Descargas de Townsend Pulsadas.

El experimento de Townsend [31,33] consiste en la observación de la corriente de desplazamiento total producida por el movimiento de los portadores de carga durante sus tiempos de tránsito respectivos, desde que el pulso inicial de fotoelectrones abandona el cátodo, hasta que el último ión alcanza el electrodo hacia el que es arrastrado. En un circuito externo, estas corrientes se convierten en voltajes que amplificados pueden ser registrados a través de un osciloscopio digital y almacenados en una computadora personal como archivos de datos.

La forma de los pulsos registrados es determinada por los parámetros de transporte y de reacción. Por tanto, el análisis de los pulsos obtenidos a partir del método de Townsend hace posible el cálculo de los parámetros de ionización y transporte electrónico propios del gas de estudio. Los parámetros de ionización y transporte dependen de la cantidad de energía que el campo eléctrico imprime a los portadores de carga. El campo eléctrico reducido a la densidad del gas  $E/N$  es proporcional a esta energía y sus unidad es el Townsend o abreviado  $Td$ , ( $1Td = 1 \times 10^{-17} Vcm^2$ ) [33].

En la figura 2.5 se presenta el circuito electrónico utilizado para detectar la corriente producida por el arrastre de los portadores de carga en el espacio inter-electrodo. La división propuesta en la figura será útil para comprender el funcionamiento de diseño.

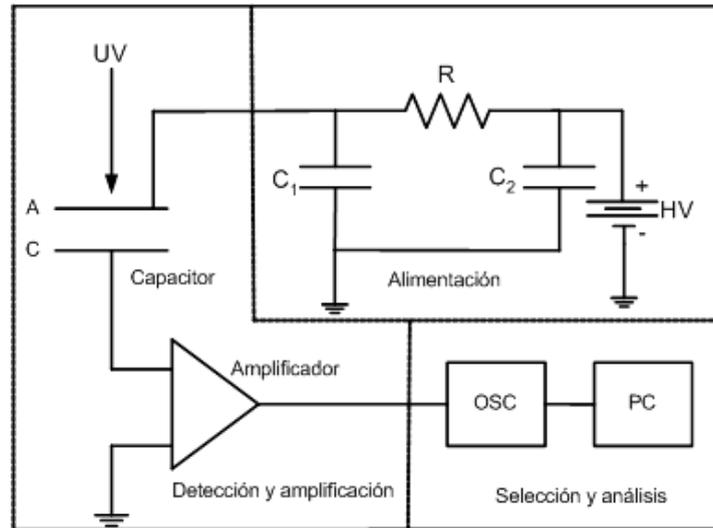


Figura 2.5 Diagrama simplificado para la cámara de Townsend

- Alimentación: La fuente de alto Voltaje HV es conectada al ánodo de la brecha (A) por medio de un filtro para disminuir el ruido. El filtro limita la entrada de señales de alta frecuencia y mantiene a los electrones de la brecha interelectodica a una diferencia de potencial constante.
- Detección y amplificación: Los fotoelectrones liberados del cátodo (K) por la acción del pulso de luz (UV) dan lugar a los procesos de avalancha, a causa del arrastre de los portadores de carga se producen corrientes de desplazamiento que se conectan a tierra por medio de una resistencia de carga. A la salida del amplificador se producirían pulsos de voltaje que serán directamente proporcionales a la corriente total producida por el arrastre de los portadores de carga en la brecha Ínter electrónica.
- Selección y análisis: A la salida del amplificador se conecta un osciloscopio digital (OSC que registra, promedia y despliega las formas de onda. En la pantalla del osciloscopio se realiza la selección de las formas de onda que son útiles para el análisis. Los pulsos serán transmitidos a una computadora personal (PC) como archivos de datos numerados que consistirán de una sola columna de amplitud de voltaje.

### 2.4.2 Tubo de Deriva

Un Tubo de Deriva (TD) es un aparato experimental que cuenta con un espacio donde existe un campo eléctrico constante y uniforme; dicho espacio se llena con un gas a presión constante, y por uno de sus extremos se introduce un enjambre de iones, mismos que derivan y reaccionan a través de este espacio bajo la acción del campo acelerador, y que son dispersados por los neutros. Los iones que han atravesado este espacio, son detectados en el extremo opuesto, como también las especies secundarias que pudieran haberse formado al paso de los iones primarios. Los TD han sido utilizados desde fines del siglo *XIX* [31,33], prácticamente en forma continua para la medición del transporte iónico y electrónico, los fenómenos de ionización, las reacciones ión molécula, la foto excitación, y muchos otros procesos.

Con la construcción de varios TD con análisis de masa en la década de 1960 comenzó un nuevo auge en la medición de la movilidad y las tasas de reacción, ya que se hizo posible la identificación del ion resultante de las reacciones ión molécula que ocurren durante la deriva del ion. Uno de los mejores diseños de TD fue realizado por McDaniel y colaboradores [34], y uno de los pocos tubos de deriva que se encuentra en operación actualmente es descrito por Basurto [11] (ver figura 2.6). El tubo de deriva es mucho más complejo y costoso que una cámara de Townsend, ya que incluye instrumentación muy especializada y un sistema de vacío para toda su estructura.

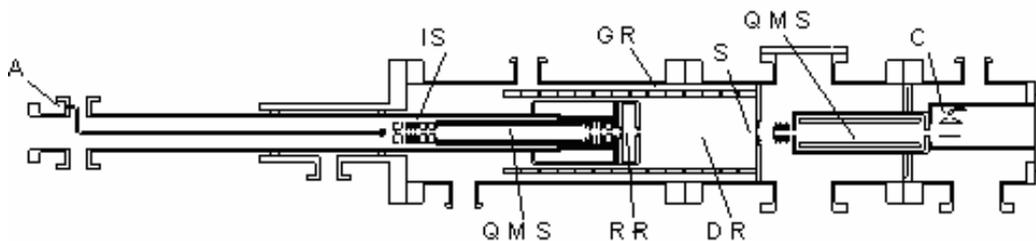


Figura 2.6 Corte transversal del tubo de deriva. A) entrada del gas a la fuente de iones, IS) región de ionización, QMS) analizador de masas cuadrupolar, GR) anillos de guarda, RR) región de termalización, DR) región de arrastre, S) orificio de muestreo de iones, C) channeltron.

## 2.5 PROPIEDADES BASICAS DEL SF<sub>6</sub>.

### 2.5.1 Breve historia

Fue sintetizado por primera vez en los laboratorios de *La Faculté de Pharmacie de Paris* en 1900 por Moissan y Lebeau: el flúor obtenido por electrólisis, sometido con sulfuro a una fuerte reacción exotérmica dando origen a un gas extremadamente estable. Las primeras investigaciones en el campo industrial fueron realizadas por el fabricante General Electric en 1933, quien determinó que el gas se puede usar en plantas eléctricas como aislamiento. En 1939 Thomson-Houston patentaron el principio para el uso del SF<sub>6</sub> como dieléctrico en cables y capacitores. Inmediatamente después de la segunda guerra mundial, publicaciones y aplicaciones en el uso del SF<sub>6</sub> empezaron a aparecer una tras otra. Desde 1947 tiene aplicación comercial en la industria eléctrica como medio aislante en transformadores. La aparición de un fabricante industrial de SF<sub>6</sub> en los Estados Unidos de Norte-América, Allied Chemical Corporation y Pennsalt en los años sesentas, propician la aparición en los Estados Unidos y Europa de los primeros interruptores y seccionadores en alta y extra alta tensión que utilizan SF<sub>6</sub>. En 1964, la primera subestación aislada con SF<sub>6</sub> se vendió a la compañía eléctrica de Francia "EDF" poniéndose en servicio en la región de Paris en 1966. En 1967 fue lanzado el interruptor FA por el fabricante Merlin Gerin, remplazando con ello en forma paulatina a los interruptores de aire comprimido tanto en Francia como en otras partes del mundo. En los años recientes, el SF<sub>6</sub>, se ha adoptado como medio aislante en: switches, seccionadores en anillo, contactores e interruptores, así como en las subestaciones aislados por SF<sub>6</sub> "GIS" cubriendo de esta forma, todas las necesidades en Media Tensión de la distribución eléctrica industrial, usado por los fabricantes de interruptores en alta y extra alta tensión [3]. Como todos los gases que actualmente se usan, el SF<sub>6</sub> se encuentra disponible en cilindros.

### 2.5.2 Propiedades químicas

Es un gas molecular poliatómico amplia y extensamente estudiado debido a sus variadas aplicaciones comerciales y de investigación [1]. Su estructura está formada por un átomo de azufre central, unido a seis átomos de fluor dispuestos en vértices de un octaedro mediante enlaces covalentes (Véase figura 2.7). La alta estabilidad del SF<sub>6</sub> se debe a la elevada energía de formación. En su estado base es químicamente inerte, no es tóxico, no es flamable, no es explosivo y es térmicamente estable (ya que no se descompone en sus fases gaseosas a temperaturas menores a los 500 °C) Dentro de sus principales características se tiene que [1]:

- Peso molecular: 146
- Temperatura de fusión: -50,8 °C
- Temperatura de ebullición: -64(s) °C
- Temperatura crítica: 45,5 °C,
- Densidad relativa: gas 5 (aire = 1)
- Densidad relativa, líquido: 1,4 (agua = 1) [1,48].

Así mismo, es químicamente compatible con la mayoría de los materiales sólidos utilizados para aislar y conducir energía eléctrica a temperaturas cercanas a 200 °C. Aunque con la presencia de la humedad y las impurezas produce un producto ácido que ataca al metal y los sellos de aislamiento. Un método eficiente para reducir los subproductos es la utilización de alúmina dentro de las cámaras que contienen el gas. Para aplicaciones a bajas temperaturas, debe calentarse o mezclarse con otros gases como el Nitrógeno o CF<sub>4</sub> [1,2].

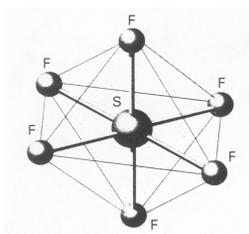


Figura 2.7 Molécula de SF<sub>6</sub>

### **2.5.3 Propiedades eléctricas**

El SF<sub>6</sub> es un gas con gran rigidez dieléctrica, ya que es muy electronegativo en un amplio rango de temperaturas, que abarca desde la temperatura ambiente hasta temperaturas muy por encima de ella [1,2]. Su voltaje de ruptura es casi tres veces mayor que el del aire, tiene buenas propiedades de calor y cuando es sometido a descargas o arqueo bajo condiciones de alta presión se reforma rápidamente, es decir, tiene una rápida recuperación y es auto restituible [1]. Es definitivamente un medio de excelente comportamiento en la extinción de arco. La mayoría de los subproductos de descomposición de este gas electronegativo no degradan su fuerza dieléctrica y pueden ser removidos por medio de filtrado. No produce polimerización, carbón u otros depósitos conductivos durante el arqueo.

### **2.6 Usos del SF<sub>6</sub> en Sistemas Eléctricos de Potencia.**

La utilización del SF<sub>6</sub> en procesos industriales es diversa, por ejemplo:

- Detección de fugas
- Desgasificación del aluminio
- Fusión de magnesio y sus aleaciones
- Aislamiento de equipos de distribución de energía eléctrica
- Procesos de plasma en la industria eléctrica.

Generalmente estas aplicaciones se dividen en cuatro grupos determinados por las propiedades del SF<sub>6</sub> que se emplean en cada caso ya sea para propósitos aislamiento o extinción [1, 2].

1. *Interruptores de circuito aislados por gas e instrumentos de interrupción de corriente:* La excelente conductividad térmica, la gran rigidez dieléctrica y la rápida recuperación térmica y dieléctrica del SF<sub>6</sub> (constante de tiempo muy pequeña para incremento en resistividad) le confieren una gran cantidad de interrupción eléctrica; estas características permiten que el gas realice

transiciones rápidas entre los estados de conducción y aislamiento del arco [9]. El hexafloruro de azufre ha probado ser un excelente disipador de arco y un medio excelente de aislamiento de los interruptores. Estos interruptores están disponibles en todos los rangos de voltajes 14.4 kV a 800 kV, de corriente continua hasta 4000 A e interrupción simétrica promedio hasta 63 kA [1,4]. Los interruptores de circuito tienen el diseño de un tanque muerto o implementación de un tanque activo y el diseño GIS (Subestaciones aisladas por gas) [4].

Su sistema cerrado completo de gas elimina cualquier fuga durante las operaciones de “switching” y por lo tanto se adapta a los requerimientos ambientales. Estos pueden ser instalados horizontalmente o verticalmente, de acuerdo a los requerimientos de las estructuras de las subestaciones. La regeneración dieléctrica rápida del arco eléctrico en el SF<sub>6</sub> no requiere resistencias de inserción, simplificando el aparato [3]. El diseño compacto reduce considerablemente el requerimiento de espacio y el costo de construcción e instalación. Adicionalmente requieren muy poco mantenimiento los interruptores de SF<sub>6</sub> [1].

2. *Transformadores aislados por gas*: La capacidad de enfriamiento, la compatibilidad con materiales sólidos y las características de las descargas parciales en SF<sub>6</sub>, además de sus propiedades dieléctricas, hacen de este gas sintético un medio muy útil en este tipo de aparatos. Más aún, el uso del SF<sub>6</sub> presenta importantes ventajas técnicas en relación con el uso del aceite como aislante en transformadores, tales como: bajo riesgo por incendio, requiere un mínimo mantenimiento, ofrece mayor tiempo en servicio en operación, entre otras [1].
  
3. *Líneas de transmisión aisladas por gas*: En esta aplicación es esencial la rigidez dieléctrica del gas utilizado en condiciones industriales; en particular es importante un buen desempeño del gas dieléctrico bajo la contaminación de partículas metálicas, de impulsos luminosos y de interrupción, así como en presencia de transitorios rápidos de tensión eléctrica. El gas también

debe tener una alta eficiencia para transferir calor desde el conductor hasta la envoltura y ser estable por largos periodos de tiempo (aproximadamente 40 años). Las líneas de transmisión aisladas en SF<sub>6</sub> ofrecen variadas ventajas [4]: costos eficaces, gran capacidad de transporte, bajas pérdidas, disponibilidad en todos los rangos de voltaje y bajo riesgo contra incendio.

4. *Subestaciones aisladas por gas (GIS)*: En este caso todas las propiedades mencionadas en las tres aplicaciones anteriores son requeridas ya que toda la subestación eléctrica es aislada con la ayuda del gas, interruptores de circuitos, conexiones a tierra, transformadores, etc. [1].

Se tiene estimado que el consumo de la industria eléctrica, es de aproximadamente un 80% del SF<sub>6</sub> producido a nivel mundial [8,50]. Además, en los últimos años, el precio del gas SF<sub>6</sub> ha incrementado su precio en un 600% [35].

## **2.6 Problemas en el Medio Ambiente**

Desgraciadamente el SF<sub>6</sub> tiene propiedades indeseables debido a que representa riesgos importantes para la salud y para el medio ambiente [1]. El SF<sub>6</sub> absorbe eficazmente radiación infrarroja, en especial a la longitudes de onda cercanas a los 10.5 μm [1]. A causa de esto, cuando se encuentra en al atmósfera se convierte en un gas de efecto invernadero, pues la porción de radiación infrarroja proveniente del sol y que ha sido reflejada por la superficie del planeta, es absorbida por las moléculas del hexafloruro de azufre y, tras un cierto tiempo, es emitida de regreso a la superficie. Este proceso tiene como resultado un aumento en la temperatura de la atmósfera [1]. El crecimiento de la proporción de gases invernadero que ha generado el ser humano en las últimas décadas ha dado lugar a un aumento en la temperatura de la atmósfera que se ve reflejado en una grave disminución del volumen de las zonas de los glaciares del planeta; esto a su vez es responsable del aumento del nivel de las aguas en los océanos y de la inundación correspondiente de las zonas

costeras [1]. El  $\text{SF}_6$  es prácticamente inmune a la degradación química y fotolítica, por lo que el impacto ambiental de éste genera debe ser considerado acumulativo y virtualmente permanente: Aunque el tiempo de vida de este gas en la atmósfera no se conoce con precisión su valor se estima en el rango comprendido entre los 800 y los 3,200 años, y los valores mas altos son los más probables [1,2]. Cuando se somete a descargas eléctricas en presencia de impurezas, este gas de efecto invernadero forma compuestos altamente tóxicos y corrosivos ( $\text{S}_2\text{F}_{10}$ ,  $\text{SOF}_2$ ) que representa un riesgo para cualquier persona que se encuentre cerca de los instrumentos que lo utilicen. También forman contaminantes no polares que no pueden ser removidos con facilidad de las zonas de descarga y que al crecer en proporción pueden modificar las propiedades dieléctricas y térmicas del  $\text{SF}_6$ , su voltaje de ruptura es sensible al vapor de agua, a partículas conductoras y a la rugosidad de superficies conductoras. Además, cuando es sometido a las condiciones climatológicas de las zonas mas frías del planeta su comportamiento se aleja del de un gas ideal y se licua a las presiones normales de operación (400 kPa a 500 kPa) [1].

Al combinar el efecto invernadero que produce el  $\text{SF}_6$  en la atmósfera y el largo tiempo que permanece en ella, se tiene un gas con un riesgo potencial de impacto global altísimo. El  $\text{SF}_6$  puede participar (como otros gases halogenados), en las reacciones que consumen el ozono estratosférico [2]. Para los próximos 100 años se estima que este impacto sea aproximadamente 24,000 veces mayor (por unidad de masa) que el de  $\text{CO}_2$ , hasta ahora el principal contribuyente al problema del calentamiento global. En algunas aplicaciones industriales, el  $\text{SF}_6$  no es fácilmente recuperable; en la industria eléctrica se libera hacia la atmósfera a causa de fugas, operaciones de mantenimiento y pruebas de instrumento [1]. En 1996, la razón de crecimiento de la proporción de este gas en la atmósfera fue del 6.9 % y aunque la extrapolación es imprecisa, se espera que para el año 2010 la concentración del  $\text{SF}_6$  en la atmósfera podría alcanzar los 10 ppm, (Véase figura 2.8).

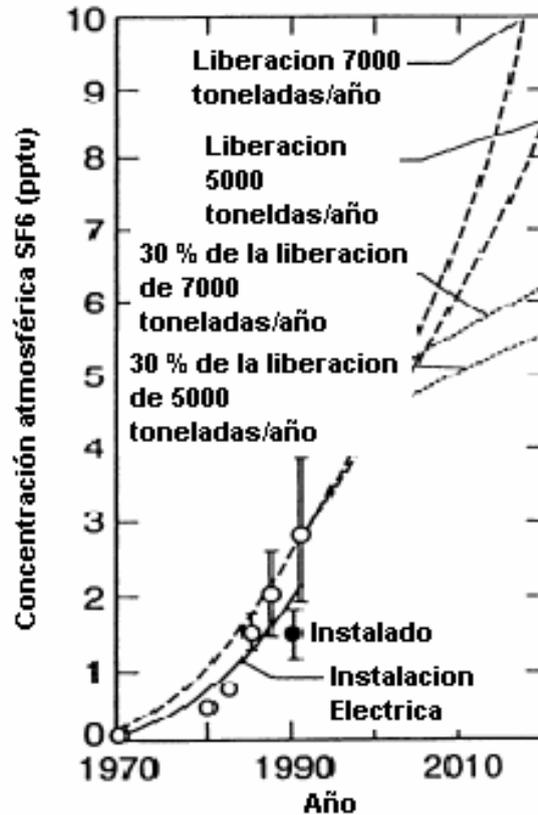


Figura 2.8 Concentración de  $SF_6$  en la atmósfera (ppm = partes por unidad de volumen) en función del tiempo. La curva continua representa la estimación de la acumulación total del  $SF_6$  de equipo eléctrico aislado por gas anterior a 1990, la curva segmentada es medición de la concentración atmosférica. Los puntos de la curva marcados como "instalado" es la estimación de la concentración supuesta del  $SF_6$  contenido en equipo eléctrico en el mundo hasta 1990 que ha sido liberado a la atmósfera, los segmentos de la recta punteada son proyección en los incrementos bajo suposiciones [1].

Actualmente se recomienda que se sigan las siguientes indicaciones [3]:

- Los equipos eléctricos de potencia que contengan Hexafluoruro de azufre serán mantenidos o reparados evitando su venteado. Si su remoción fuese necesaria, el gas será evacuado, comprimido y devuelto a su fabricante para su purificación (reciclado). Los operarios que efectúen reparaciones a equipo abierto serán protegidos de la inhalación de los derivados sólidos y gaseosos del Hexafluoruro de Azufre, por medio de abundante ventilación del recinto de trabajo y el uso de máscaras respiratorias.
- Los equipos aislados con  $SF_6$  son construidos de modo de mantener el gas bajo presión, a menos que el blindaje exterior, haya sido perforado, o que la

válvula de venteo de seguridad haya sido activada bajo condiciones extremas. En este caso el  $SF_6$  y sus subproductos pueden ser emitidos, y alcanzar niveles peligrosos en el caso de subestaciones subterráneas o interiores. En caso de una fuga de  $SF_6$  el espacio en donde se ha producido será ventilado en forma abundante, para evitar que el personal sea expuesto a concentraciones superiores a las permisibles (US NIOSH: 1000 ppm para  $SF_6$ , 0.025 ppm para  $S_2F_{10}$ ).

- Su venteo deliberado será evitado, en conformidad con los acuerdos internacionales concernientes al manejo de fluorocarburos. Cuando el mantenimiento requiera la apertura del blindaje del equipo, el gas debiera ser extraído por un compresor para así licuar el  $SF_6$  y facilitar su transporte, purificación y reciclado.

Por lo tanto, para el futuro se imponen como prioridades las siguientes acciones [3]:

- Minimizar las emisiones de  $SF_6$  por medio de métodos que cuantifiquen y detengan su fuga; del reemplazo gradual de equipos viejos susceptibles de fugas; de la implementación de políticas para su uso, su manejo y los métodos para rastrearlo; así mismo, se debe promover la mejora en los sistemas de bombeo y almacenamiento, el aumento en la eficiencia en los procesos de reciclado y el establecimiento de estándares para el reciclado y la destrucción de residuos.
- Reducir la cantidad de  $SF_6$  que se usa construyendo equipo mas compactos y ajustables, desarrollando aparatos sellados de por vida y reemplazarlo al  $SF_6$  por otros gases o mezclas gaseosas donde sea posible.

## 2.8 *Sustitutos del SF<sub>6</sub>*

Con el fin de limitar las emisiones de SF<sub>6</sub> a la atmósfera, la búsqueda de gases o mezclas gaseosas con propiedades similares a las del compuesto fluorinado y que a la vez representen un menor o nulo. Riesgo de deterioro ambiental es una tarea de investigación muy importante [1,3].

A causa del gran costo ambiental que representa el uso y al emisión de SF<sub>6</sub> a la atmósfera, los sustitutos deberán satisfacer los requerimientos de dicho gas (incluyendo sus propiedades físicas y químicas) [1].

Al reducir la proporción de SF<sub>6</sub> en alguna aplicación las mezclas de este y otros gases representa una buena alternativa al problema ambiental del que se ha hablado. Estas mezclas deberán de ser optimizadas de manera que satisfagan las propiedades (dieléctricas, térmicas ambientales, etc.) de una o varias aplicaciones de alto voltaje en las que se postula que esta sustituya al hexafloruro de azufre. Por lo que se ha concertado un esfuerzo internacional en esta área.

Datos confiables sugieren que las mezclas de Nitrógeno puro y mezclas con baja concentración de SF<sub>6</sub> en nitrógeno son apropiadas para muchas aplicaciones de aislamiento. También otros datos sugieren que la mezcla de SF<sub>6</sub>-He puede ser viable par el uso de interruptores de circuito aislados por gas [1].

## CAPITULO 3

### ARREGLO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Arreglo experimental

La muestra de gas que se pretende estudiar se inyecta en una cámara de vacío previamente evacuada. En el interior de la misma se encuentra un capacitor de placas paralelas entre cuyos electrodos se produce una diferencia de potencial constante, la cual da lugar a un campo eléctrico homogéneo y uniforme en el espacio comprendido entre los electrodos (ver figura 3.1). En esta condición, un pulso de luz ultravioleta que incide en el cátodo de aluminio libera fotoelectrones del cátodo, los cuales bajo la acción del campo eléctrico son arrastrados en la dirección del ánodo del capacitor. En su movimiento hacia el ánodo, los electrones interactúan con los átomos y/o moléculas que constituyen el gas mediante colisiones elásticas o inelásticas.

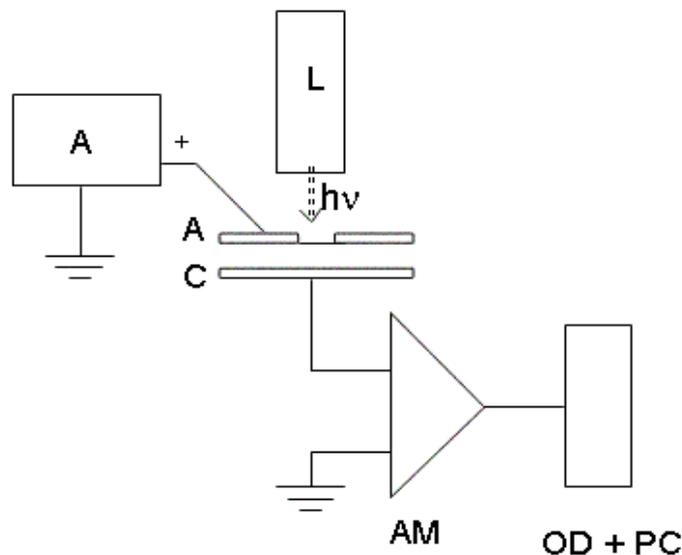


Figura 3.1 Cámara de Townsend pulsada A ánodo, C cátodo, L UV laser, AMP amplificador de transimpedancia, OD osciloscopio digital, PC Computadora personal, HV fuente de alto voltaje.

Las colisiones elásticas tienen como consecuencia la transferencia de momento, dando lugar a procesos de difusión y de arrastre de los electrones de los electrones; en cambio, las colisiones inelásticas son responsables de la excitación de los componentes del gas y de la aparición de nuevos portadores

de carga a través de la ionización de neutros y la captura de los electrones en caso que el gas sea electronegativo. Los portadores de carga que se producen a partir de los procesos de ionización y captura son arrastrados, al igual que el pulso inicial de fotoelectrones, en la dirección del campo eléctrico.

Debido a que se trata de un régimen multicolisional, el conjunto de portadores de carga adquiere una determinada distribución de energía que, cuando es cercana a la energía térmica ambiental (300 K), es Maxwelliana pero se sesga a energías mayores.

El experimento de Townsend consiste [20] en la observación de la corriente de desplazamiento total producida por el movimiento de los portadores de carga durante sus tiempos de tránsito respectivos, desde que el pulso inicial de fotoelectrones abandona el cátodo, hasta que el último ión alcanza el electrodo hacia el que es arrastrado. En un circuito externo, estas corrientes se convierten en pulsos de voltaje que amplificados pueden ser registrados a través de un osciloscopio digital y almacenados en una computadora personal como archivo de datos.

La forma de los pulsos registrados es determinada por la densidad de los portadores de carga en la brecha interelectródica. Dicha evolución espacio-temporal, a su vez es consecuencia de las propiedades eléctricas del gas admitido en la cámara. Por lo tanto, el análisis de los pulsos de corriente obtenidos a partir del método de Townsend pulsado hacen posible el cálculo de los parámetros de ionización y transporte electrónicos e iónicos propios del gas de estudio.

### **3.2 Diseño y modificación de la Cámara de Townsend**

En esta sección se describe el diseño y la construcción de la CDT que debe de operar a presiones de hasta 1500 torr. Como se menciono anteriormente esta consta principalmente de un capacitor al cual se le aplica un campo eléctrico constante, para el diseño se tomaron en cuenta las propiedades mecánicas y eléctricas del acero inoxidable, se uso teflón para aislar eléctricamente el ánodo y el cátodo, en las figuras 3.2, 3.3, 3.4 y 3.5 se muestra el dibujo

isométrico de la vista frontal, la vista superior y el diseño terminado, los acotamientos están en milímetros. El cátodo contiene un pequeño inserto de cobre en su centro, en el cual incide el haz de luz ultravioleta de un láser de nitrógeno figura 3.6.

En la figura 3.7 se muestra el capacitor colocado sobre una base de acero inoxidable, esta es la configuración de trabajo, solo que se omitió la cámara de acero inoxidable para poder observar ésta configuración. La base tiene dos puertos para el montaje de los sensores (véase la figura 3.7), uno de los cuales se ocupó para el sensor de presión y un puerto en donde se conecta la bomba turbo molecular por medio de una válvula de mariposa. El diseño de la base inferior se muestra en las vistas de las figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 todas las acotaciones están en milímetros. El cuerpo principal que cubre al capacitor es la cámara de acero inoxidable con capacidad para 5 litros, esta posee cuatro puertos para acoplamiento de sensores, de los cuales se enlistan a continuación: el primero es para el atravesador donde se inyecta el alto voltaje, el segundo una válvula que conecta a un tubo para recibir las mezclas, el tercero el medidor de vacío por ionización y el cuarto la salida para la señal del amplificador. En las figuras 3.12, 3.13, 3.14 se muestran las vistas de los diseños y en la figura 3.15 la cámara. Finalmente se muestra el diseño del montaje de la ventana en donde se coloca una ventana de cuarzo por donde penetra el haz de laser ultravioleta, se muestran las vistas del diseño en las figuras 3.16, 3.17, 3.18 y en la figura 3.19 la ventana superior. La construcción tardó más de un año por la precisión requerida y fue realizada con el apoyo del personal de centro de Ciencias Físicas de la UNAM.

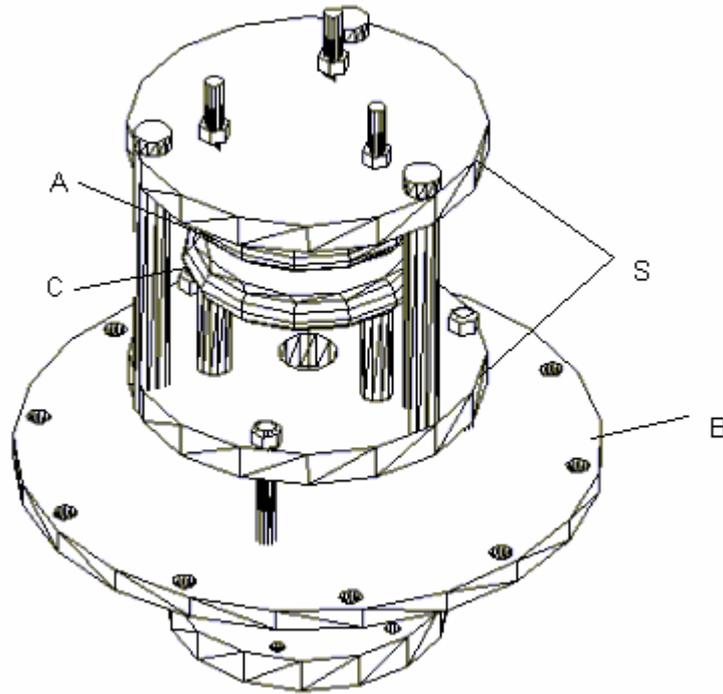


Figura 3.2 Diseño del capacitor en isométrico A ánodo, C cátodo, Soporte Aislante, B base.

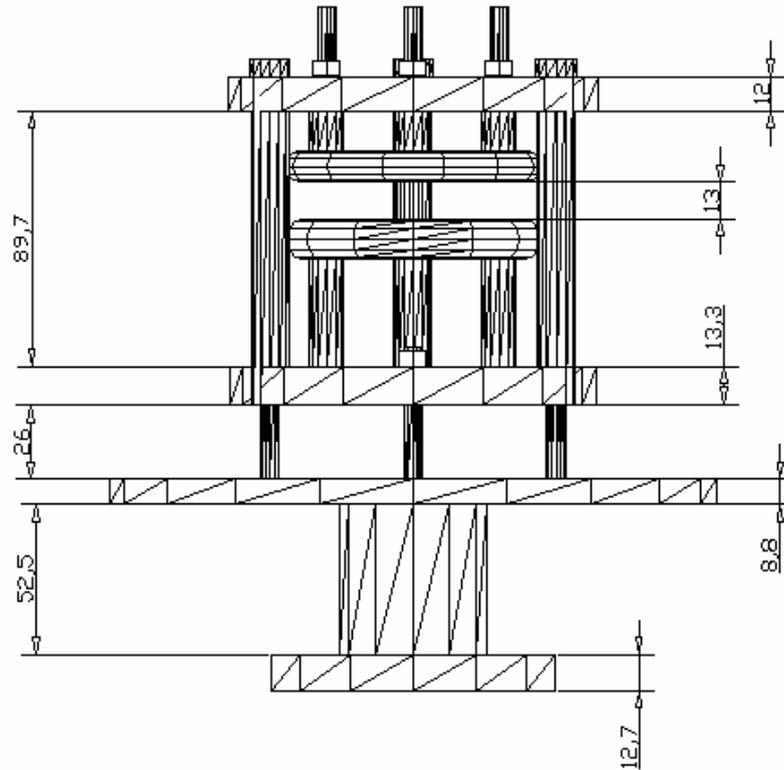


Figura 3.3 Diseño del capacitor vista frontal las acotaciones están en milímetros.

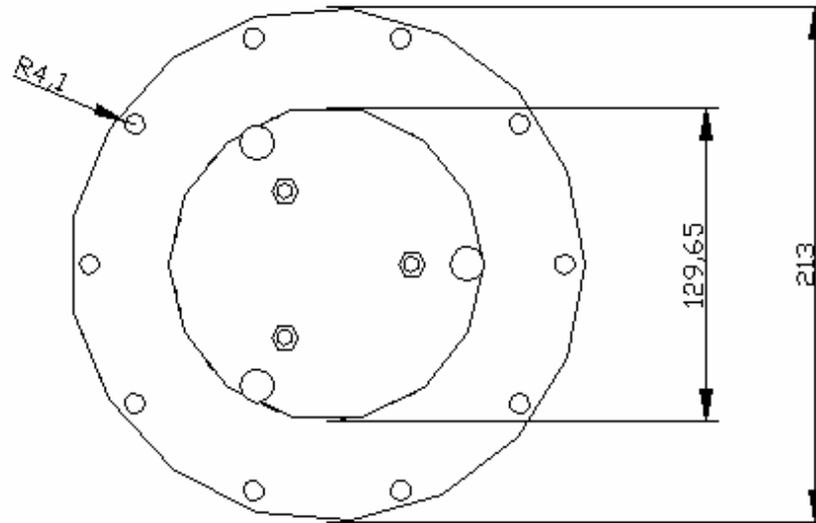


Figura 3.4 Diseño del capacitor vista superior.

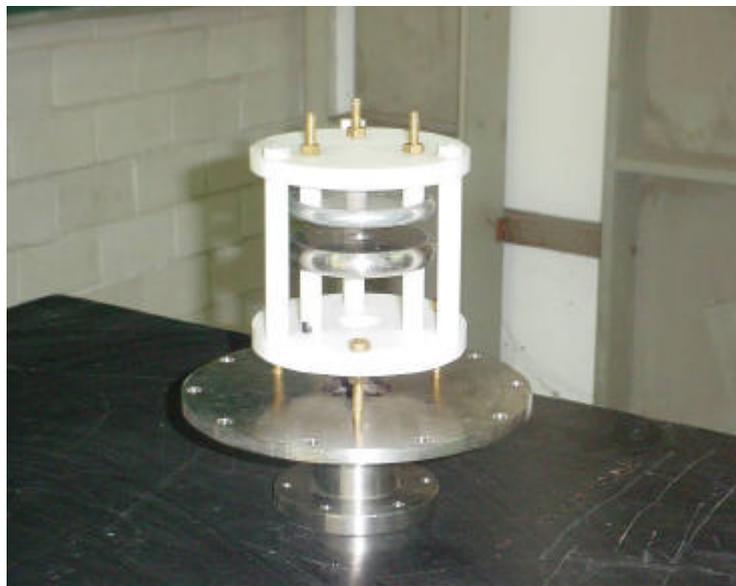


Figura 3.5 Capacitor de la cámara de Townsend.

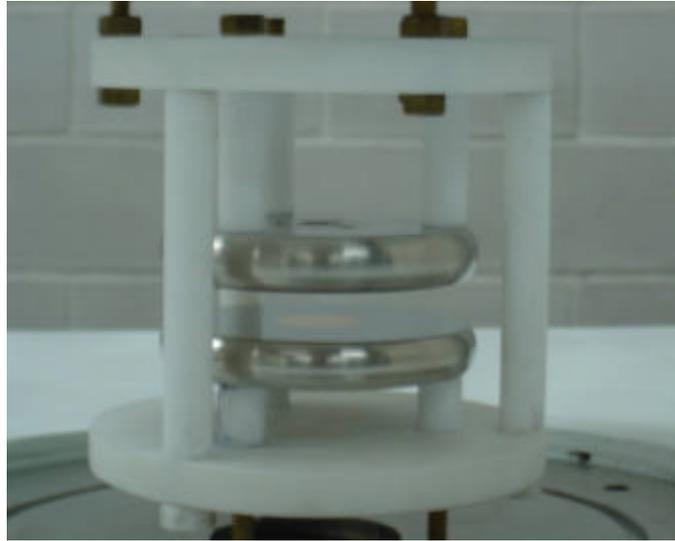


Figura 3.6 Detalle del capacitor.

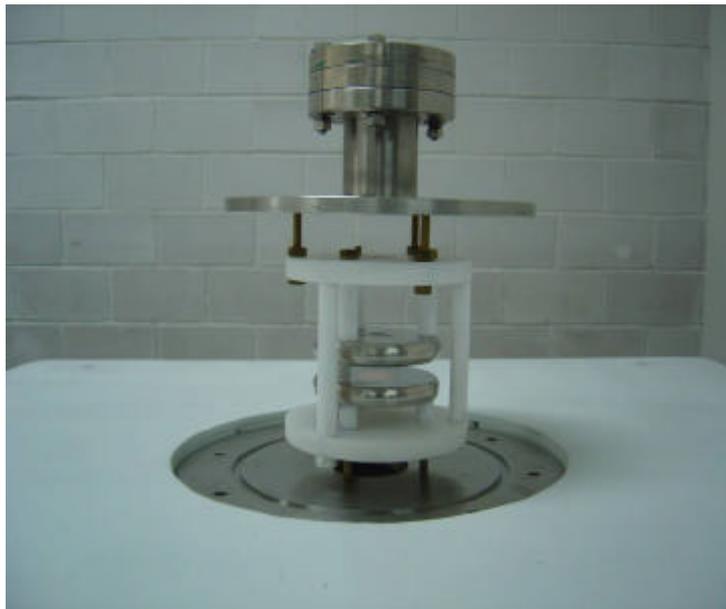


Figura 3.7 Montaje del capacitor sobre la base.

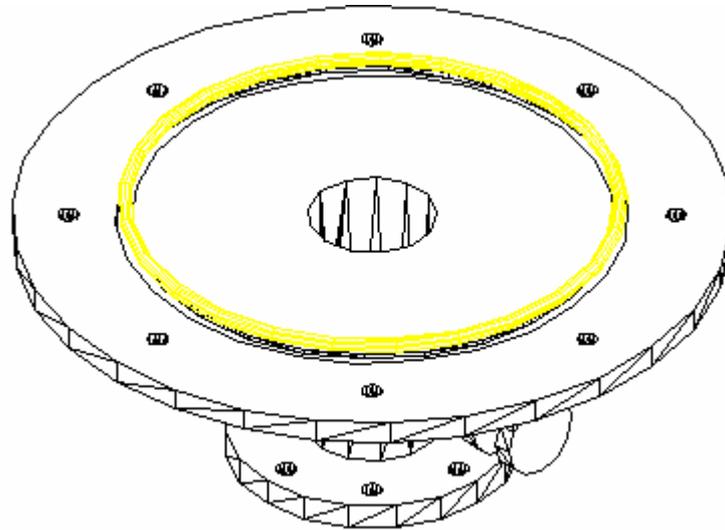


Figura 3.8 Diseño de la base inferior vista en isométrico.

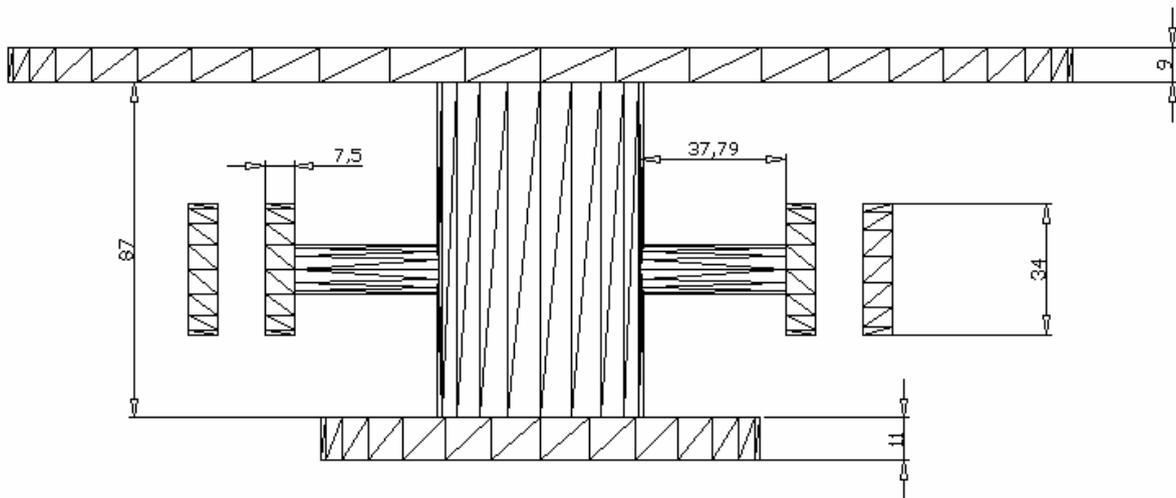


Figura 3.9 Diseño de la base inferior vista frontal las acotaciones están en milímetros.

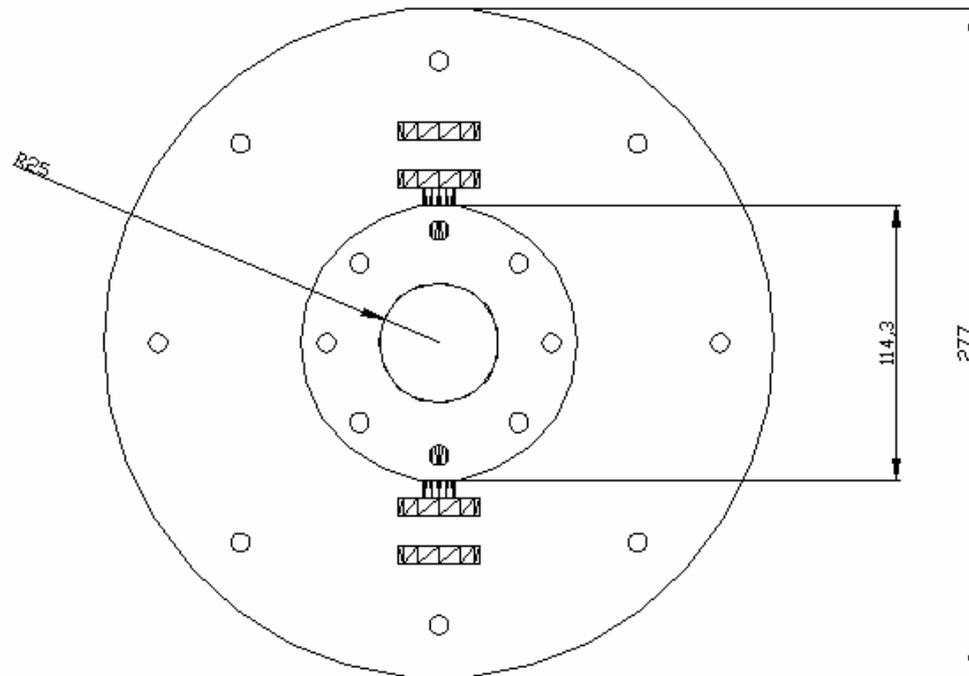


Figura 3.10 Diseño de la base vista frontal las acotaciones están en milímetros.

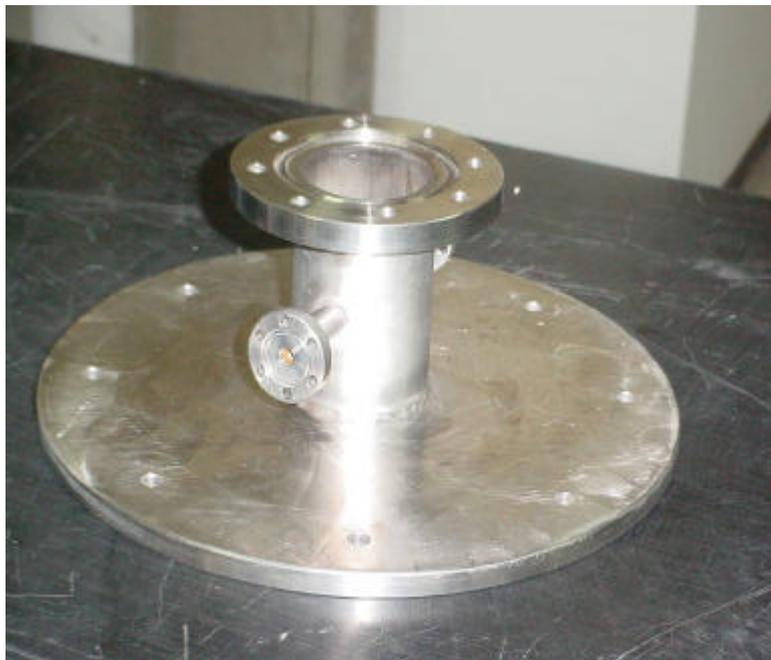


Figura 3.11 Base inferior puerto nótese los puertos.

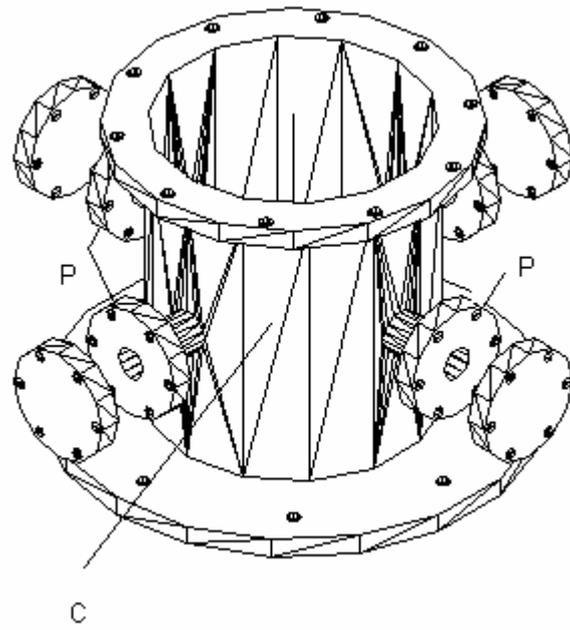


Figura 3.12 Diseño de la cámara principal isométrico puertos P, cubierta de la cámara C.

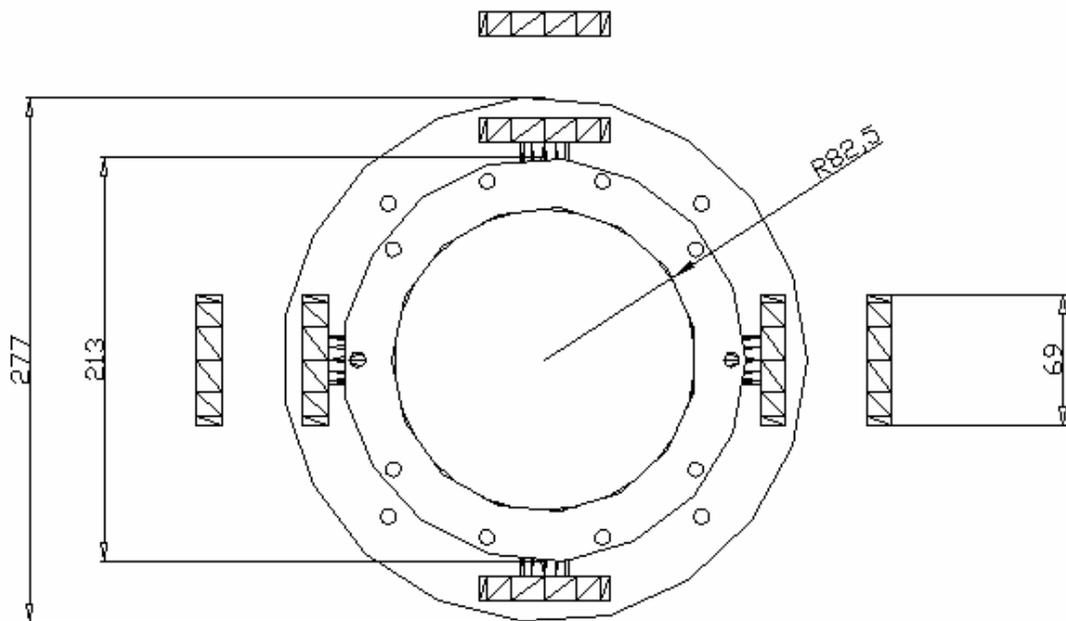


Figura 3.13 Diseño de la cámara principal mostrando los puertos las acotaciones están en milímetros.

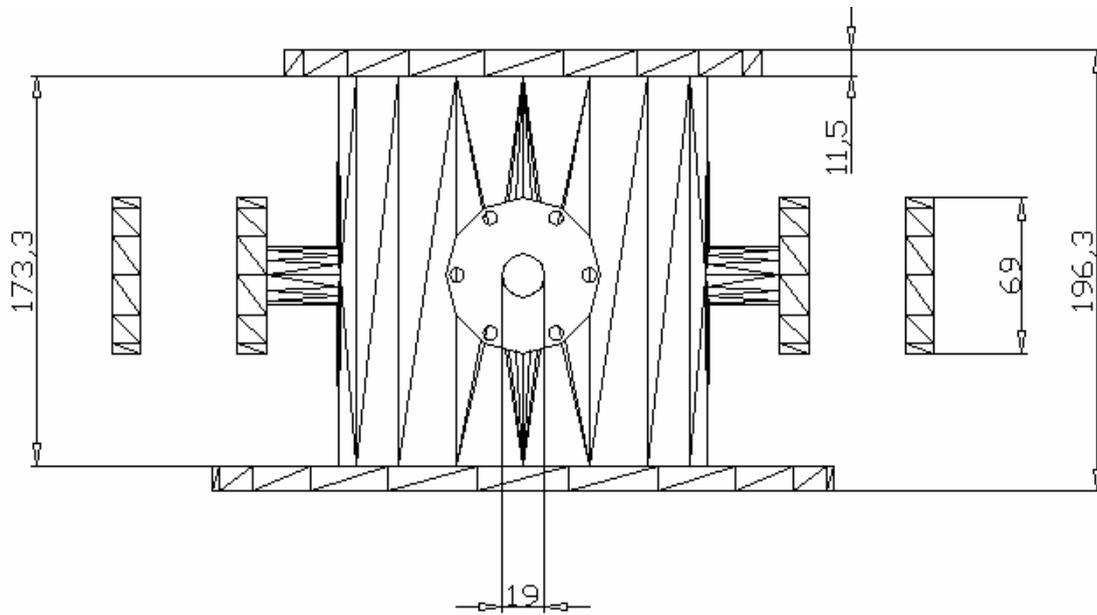


Figura 3.14 Diseño de la cámara principal vista frontal las acotaciones están en milímetros.



Figura 3.15 Cámara principal realizada en acero inoxidable.

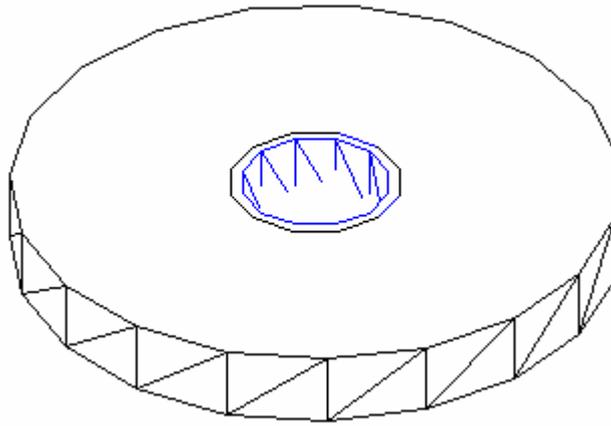


Figura 3.16 Diseño de la ventana vista isométrico soporte del cristal de cuarzo

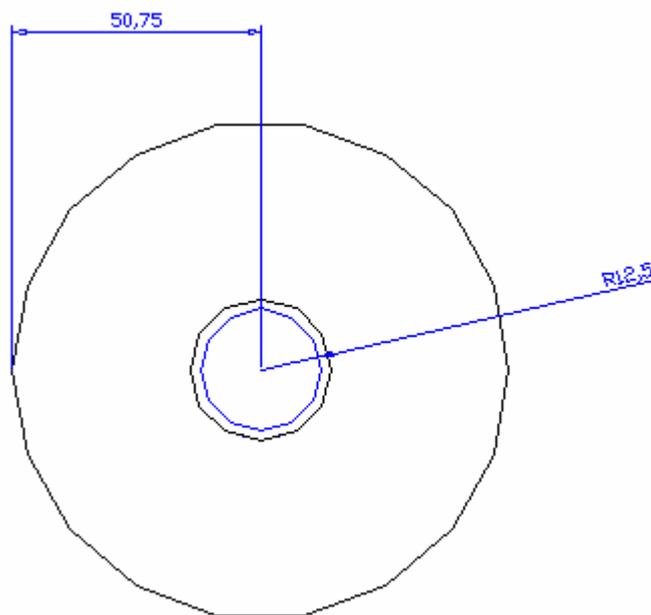


Figura 3.17 Diseño de la ventana vista superior las acotaciones están en milímetros.

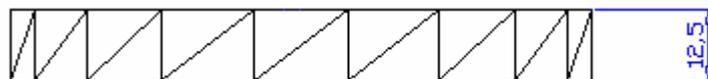


Figura 3.18 Diseño de la ventana vista frontal las acotación está en milímetros.



Figura 3.19 Ventana, sellos y atravesador

### 3.3 Instrumentación y sistema de adquisición de datos.

Para el sistema de adquisición de datos e instrumentación de la cámara de descargas tipos Townsend se utilizó el equipo de cómputo con las siguientes características: procesador intel Pentium III ® a 800 MHz, 256 Mb de memoria RAM. Se eligió el lenguaje de programación Visual Basic, ya que ofrece desarrollo de aplicaciones gráficas y es amigable para el usuario entre otras muchas características.

Se desarrollo un sistema maestro de control y adquisición de datos, el cual funciona a base de subprogramas encargados de funciones específicas, a continuación se detallan estos subprogramas, y finalmente se muestra la interfaz gráfica del programa maestro.

#### 3.3.1 Control del módulo de alto voltaje

Se cuenta con una fuente de alto Voltaje BERTAN modelo 602C-100P, de 0-10kV y 1 mA, que se controla con un voltaje de 0 a 5 VDC, el cual será suministrado por una tarjeta PCL812PG de Advantech® con puertos digital/analógico de 12 bits. Con una resolución de 12 bits se cuenta con 4096 valores en el intervalo de salida de la tarjeta, siendo 0 el valor mínimo y 4095 el valor máximo.

Debido a que la tarjeta es de 12 bits y el diseño de la tarjeta es de 8 bits, se divide en dos partes la palabra de 12 bits, en un byte alto y byte bajo de acuerdo a la relación

$$4095 = \underbrace{1111}_{\text{bit alto}} \underbrace{11111111}_{\text{bit bajo}} \quad (3.1)$$

15                      255

La figura 3.20 muestra la relación del valor máximo de la resolución en equivalente decimal y la adecuación para Visual Basic.

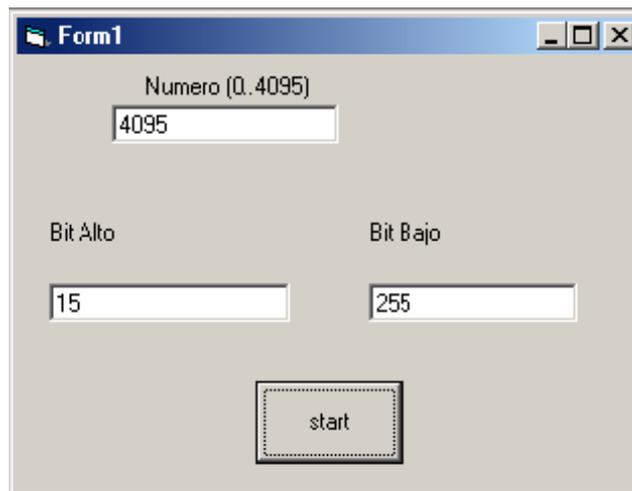


Figura 3.20 relación decimal a binaria en la adecuación de la programación para Visual Basic

Si definimos el incremento mínimo de voltaje como  $\Delta V_m$  y teniendo que el voltaje máximo de la tarjeta es 4.96548 V, se tiene

$$\Delta V_m = 4.96548/4096 = 0.00121 \text{ V} , \quad (3.2)$$

por lo que solo podemos variar el voltaje en múltiplos de 0.00121 V.

Una vez diseñado el programa de control para el modulo de alta voltaje se procedió a calibrar el sistema, para ello se realiza la medición de dato de control en función del voltaje de la fuente de alta tensión. Los datos obtenidos y la regresión lineal se muestran en la figura 3.21 .

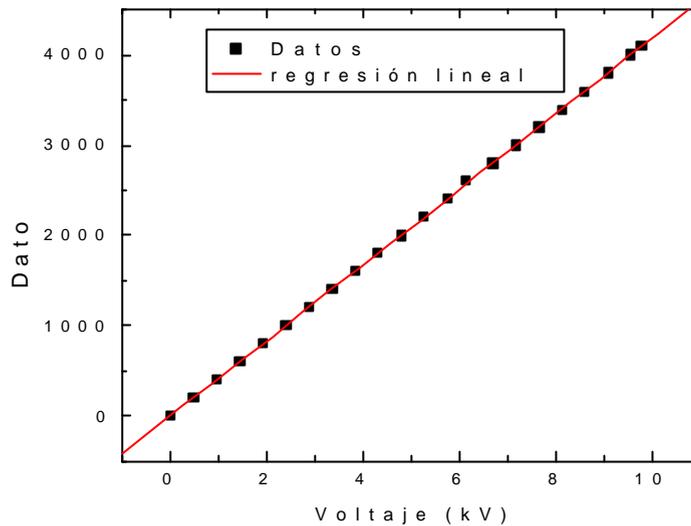


Figura 3.21 Gráfica de datos de control en función del voltaje de la fuente. La línea representa la regresión lineal.

Con la regresión lineal obtenemos la ecuación que relaciona el voltaje de control con el voltaje de la fuente

$$Dato = 0.41889V - 2.8052 \quad (3.3)$$

Así si por ejemplo si se necesita un voltaje de 8600 V por medio de la ecuación (3.3) el voltaje de control del programa enviara el dato 3600 (dato debe de ser un número entero), en su forma binaria a la tarjeta. Este programa se integro en el programa general de monitoreo que se muestra en el apéndice A.

### 3.3.2 Lectura de la temperatura en 4 puntos

Se utilizaron los circuitos integrados LM35 para medir la temperatura de la cámara que contiene el gas bajo estudio, estos sensores proporcionan una salida de 10 (mv/°C). Se diseño de una fuente de alimentación para los 4 circuitos LM35 (S1-S4) que se decidió colocar para tomar la temperatura en diferentes puntos de la cámara y tomar un promedio. La temperatura de cada

sensor es enviada como un dato analógico a los canales A/D de la tarjeta PCL-718PG tal y como se muestra en la figura 3.22.

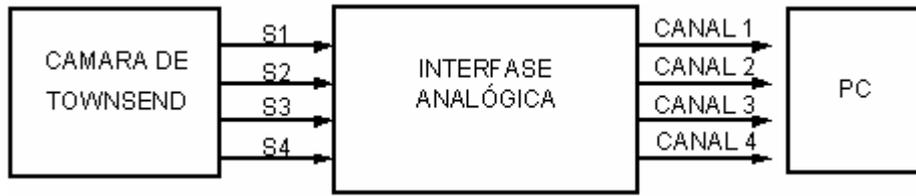


Figura 3.22 Interfase para obtener temperatura.

Para la lectura correcta de la temperatura se procede hacer una calibración de los 4 sensores para ello se utiliza un termopar tipo K y un multímetro Fluke 45 con precisión de una décima de grado, los sensores y el termopar se sumergieron en un baño de aceite al cual se le varió lentamente la temperatura. Se realizó una regresión lineal para obtener la calibración de cada sensor y la cual será incluida en el programa general. Las gráficas obtenidas se muestran en las figuras 3.23, 3.24, 3.25, 3.26. Los resultados de la regresión lineal en la tabla 3.1.

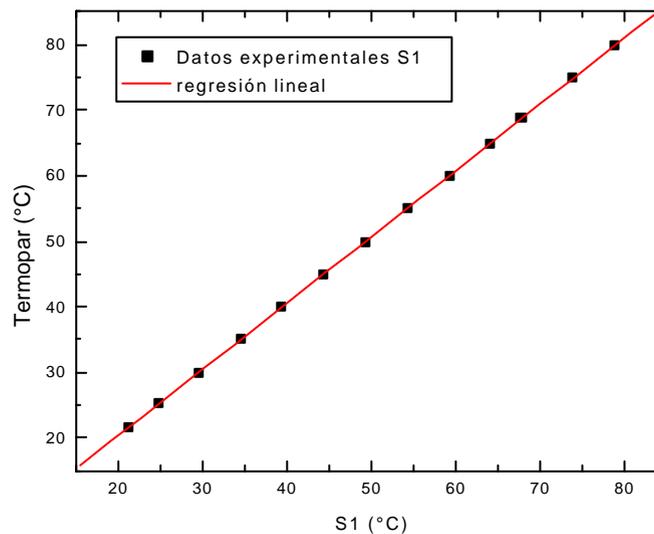


Figura 3.23 regresión lineal para el termistor LM35 (S1).

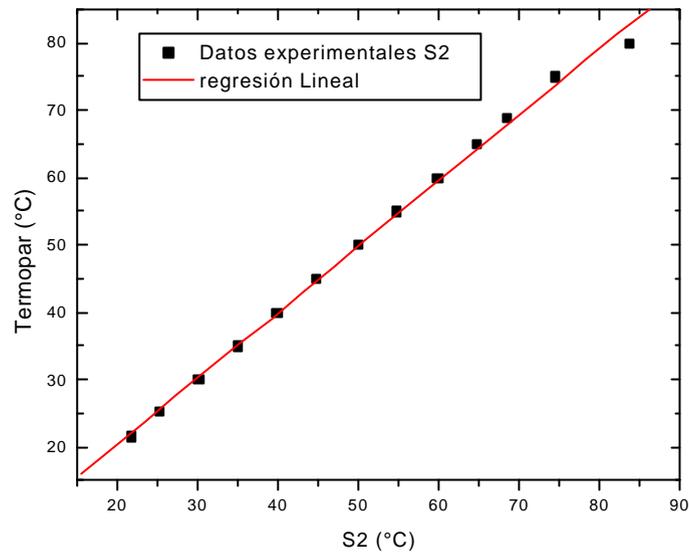


Figura 3.24 regresión lineal para el termistor LM35 (S2).

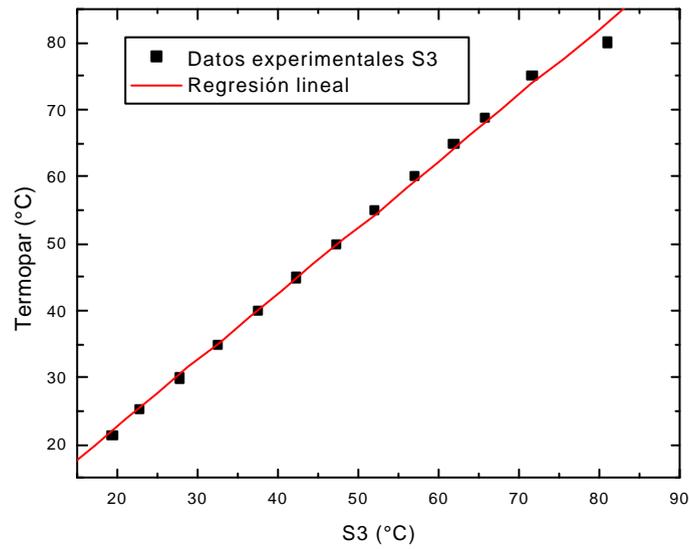


Figura 3.25 regresión lineal para el termistor LM35 (S3).

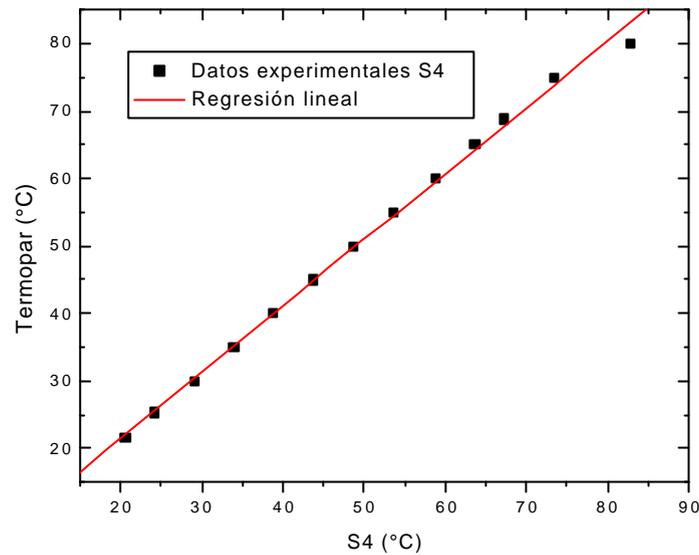


Figura 3.26 regresión lineal para el termistor LM35 (S4).

Tabla 3.1 Resultados obtenidos en la regresión lineal para el factor de corrección en el programa para medir la temperatura en los cuatro puntos en la cámara de Townsend.

Sensor	Factor de corrección (sin unidades)	Error (sin unidades)	Ordenada al origen (°C)	Error (°C)
S1	1.01005	$\pm 0.00167$	0.21131	$\pm 0.08767$
S2	1.00417	$\pm 0.85637$	0.97801	$\pm 0.01599$
S3	0.98675	$\pm 0.01672$	3.16133	$\pm 0.8533$
S4	0.97835	$\pm 0.01628$	2.0038	$\pm 0.85588$

Una vez realizado lo anterior se procedió al diseño del programa para medir la temperatura, para ello se debe ejecutar la conversión analógico/digital de la tarjeta PCL-812PG de Avantech® de acuerdo a las instrucciones del manual de usuario de la tarjeta. Se muestra en la figura 3.27 la ventana del programa para el monitoreo en los cuatro puntos de la cámara de Townsend. En la figura 3.28 se muestra el programa para medir la temperatura en los cuatro puntos obteniendo la temperatura promedio.

Canal(0..3)	Temperatura 1 (°C)	Temperatura 2 (°C)
0	26.67	27.13
	Temperatura 3 (°C)	Temperatura 4 (°C)
	24.69	26.15

Inicio

Figura 3.27 Ventana del programa para medir la temperatura en los 4 puntos.

Canal(0..3)	Temperatura 1 (°C)	Temperatura 2 (°C)
0	24.67	25.27
	Temperatura 3 (°C)	Temperatura 4 (°C)
	25.08	25.18
	Temperatura Promedio	25.06

Inicio

Figura 3.28 Ventana del programa para medir la temperatura mostrando la temperatura promedio.

### 3.3.2 Programa general de control y monitoreo

En la figura 3.29 se muestra la interfaz gráfica del programa principal de adquisición de datos en Visual Basic. Este se diseño facilita la visualización al usuario de los parámetros involucrados en estudio de los tránsitos iónicos o electrónicos, las funciones se describirán a continuación. Como ya se menciona se programaron por separado y al final se concentraron en un programa general (vease el listado del programa en el apéndice A). Es

importante en la operación del programa de adquisición de datos que los instrumentos que componen al sistema estén encendidos, de lo contrario enviará un mensaje de error y no operará.

Debido a que Visual Basic opera en base a eventos, no sigue un flujo lineal como en los programas tradicionales, de esta forma no se puede establecer un diagrama de flujo en el que se indique la operación global, solo dentro de cada subrutina podría darse un diagrama de flujo, pero es impracticable debido al gran número de subrutinas que tiene el programa.

La ventana principal consta de un osciloscopio virtual, en el cual se pueden variar las escalas de voltaje por división y escala de tiempo por división, a continuación se describen brevemente los comandos que aparecen en la ventana del programa.

El comando "0 *torr*" toma la lectura de la presión en el Baratron y la guarda para restarla a las lecturas subsecuentes

El comando "Grafica" captura la señal del osciloscopio.

En el menú "Parámetros de corrida" se visualiza el campo normalizado a la densidad del gas  $E/N$  (Td), La presión en la cámara (torr), el promedio de la temperatura [°C] en cuatro puntos arbitrarios.

El comando "Fuente HV\_envia voltaje" es el programa descrito en la sección anterior, este comando utiliza los siguientes parámetros  $E/N$  [Td], la distancia  $d$  en [cm], la temperatura  $T$  en [°C] y la presión  $P$  en [torr], para calcular el voltaje necesario en la fuente de alto voltaje para producir el valor de  $E/N$  deseado, para ello usamos la relación (3.4) y se envía este valor a la subrutina de control de la fuente que opera en el rango de 0-9999 V.

$$V = 96.56 * P * d / (T + 273.15) * (E/N) \quad [V] \quad (3.4)$$

El comando "Guardar" crea un archivo de datos en un directorio de trabajo con el nombre de la mezcla propuesta con la extensión "\*. dat" con las siguientes variables; Disparo, E/N, presión, distancia, voltaje, temperatura, base tiempo, volts/div para su posterior análisis.

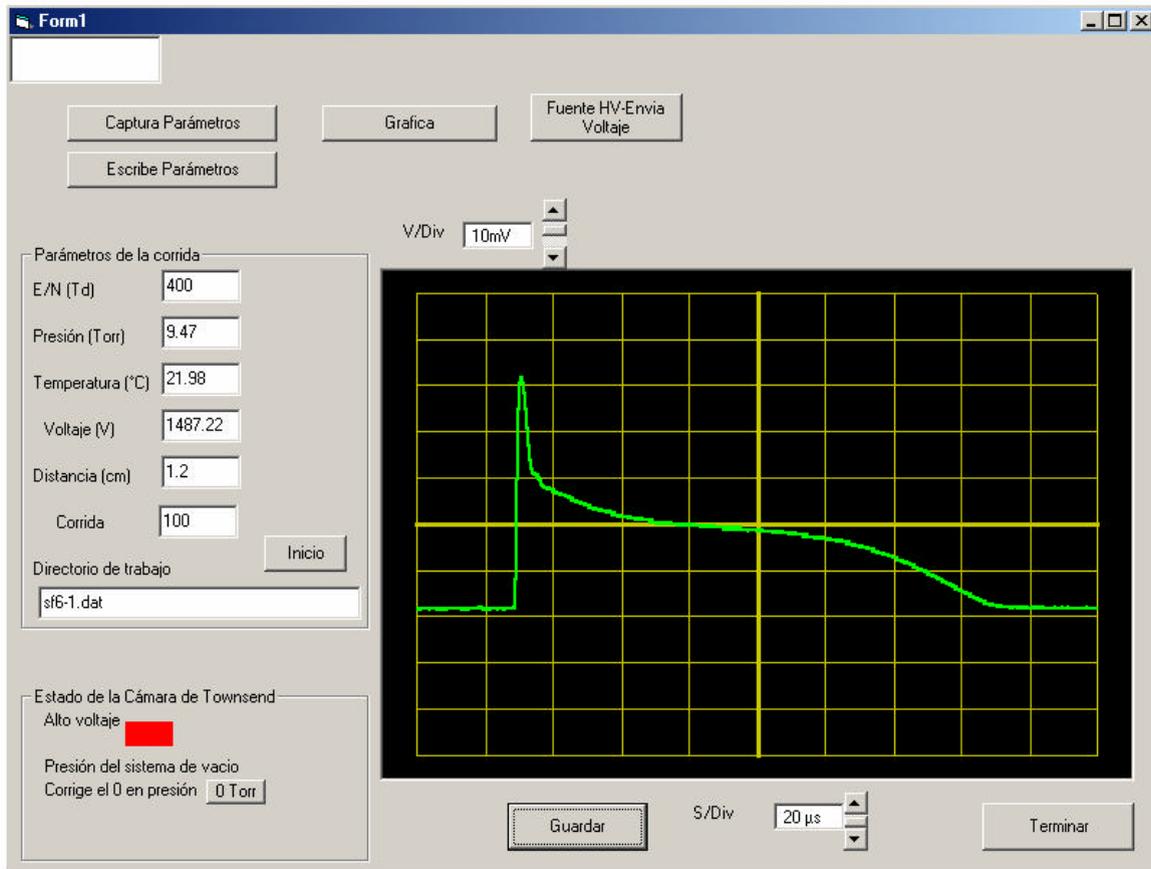


Figura 3.29 Interfase del programa de adquisición de datos para la captura de la medición del transitorio iónico  $SF_6$  puro condiciones,  $400 Td$ , presión  $9.47 torr$ , temperatura  $22^\circ C$ , distancia  $1.2 cm$ .

### 3.4 Uso de amplificadores corriente-voltaje

Para poder registrar los transitorios iónicos y electrónicos hay que utilizar amplificadores corriente-voltaje, en el mercado un amplificador de estas características vacía cuesta aproximadamente 1500 USD, por lo que se buscaron otras alternativas al inicio de las operaciones de la Cámara de Townsend. Se recurrió al CCF-UNAM en donde se han diseñado algunos amplificadores, los cuales se detallan a continuación. Así como las pruebas básicas de su desempeño.

### 3.4.1 Amplificador FET

Se utilizó el amplificador corriente voltaje cuyo diagrama se encuentra en la figura 3.30. Este amplificador consta de tres etapas, en la etapa de entrada se convierte la corriente a voltaje por medio de una resistencia de  $1\text{ G}\Omega$ , este voltaje se pasa a la siguiente etapa que amplifica el voltaje por medio de tres transistores FET que presentan una alta impedancia a la entrada, finalmente la señal se pasa a la etapa de potencia en donde se conecta la salida del amplificador. En la parte inferior de la figura 3.30 se muestra la fuente de alimentación de  $\pm 12\text{ Vdc}$  que utiliza dos circuitos integrados para regular el voltaje.

Este amplificador fue diseñado en el CCF-UNAM, en las primeras etapas se utilizó uno ya construido, pero en este trabajo se construyó uno propio, al cual se le realizaron algunas modificaciones, tal es el caso de separar la fuente de alimentación del circuito del amplificador, ya que se inducía ruido de  $60\text{ Hz}$ .

Se realizaron los pruebas de ganancia en  $dB$ , frecuencia de corte y de linealidad del amplificador con un acoplamiento de  $50\ \Omega$  de acuerdo al diagrama de la figura 3.31

Para la primera prueba se hizo un barrido de frecuencia desde  $1\text{ kHz}$  hasta  $30\text{ MHz}$  manteniendo constante una amplitud de  $10\text{ mV}$ . Los resultados se muestran en la figura 3.32.

La frecuencia de corte se define como la frecuencia la cual la señal de salida se reduce por  $3\text{ dB}$  (un factor de  $0.7$ ) [36] de acuerdo a la ecuación (3.5), para hallarla se obtuvo la curva de ganancia en  $dB$  véase la figura 3.33.

$$G = 20\log_{10}(v_{out}/v_{in}) \quad (3.5)$$

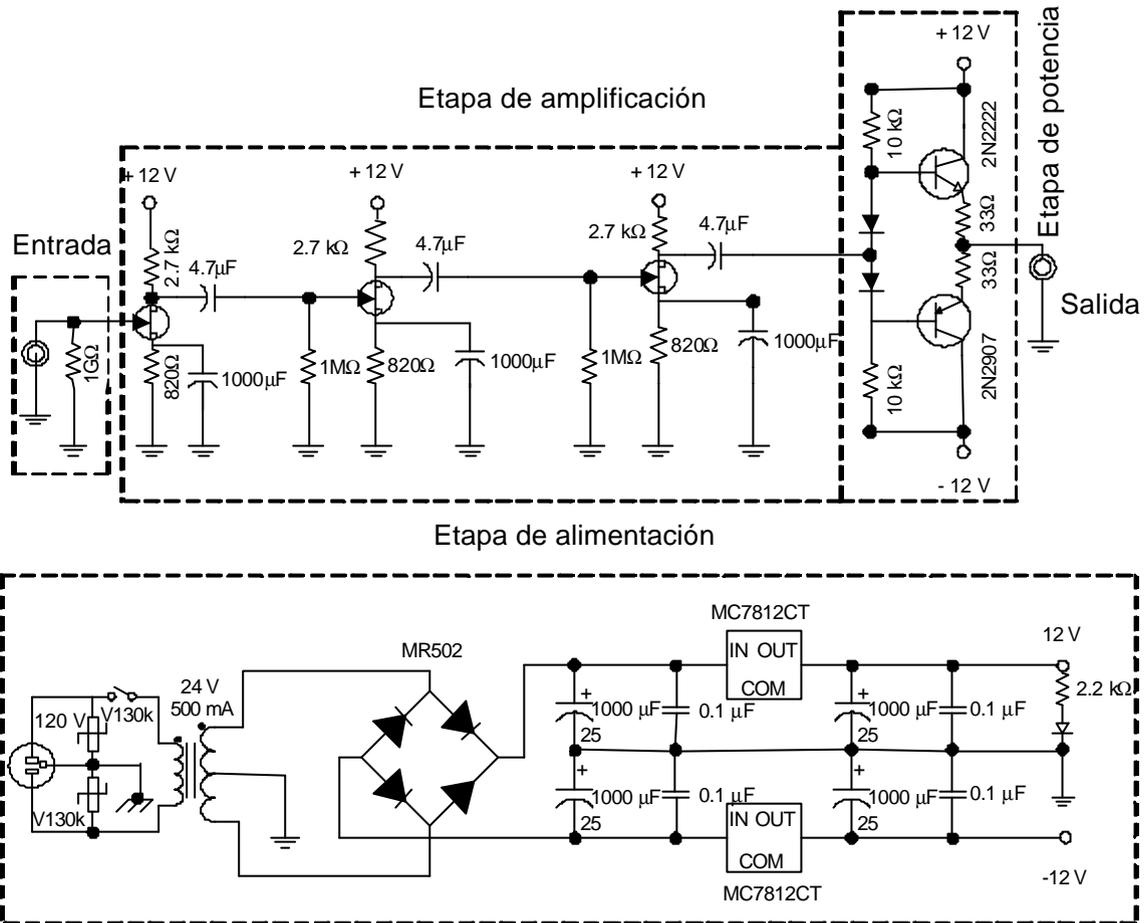


Figura 3.30 Amplificador FET para la cámara de Townsend.

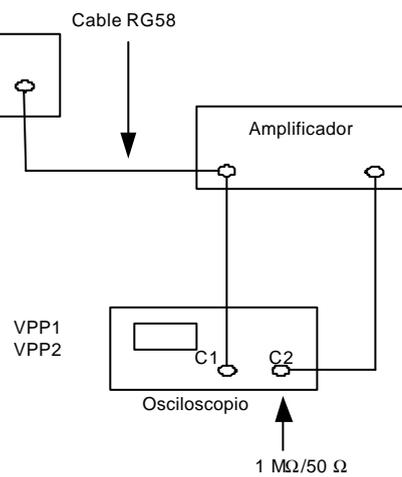


Figura 3.31 Diagrama de conexiones para pruebas de ganancia del el amplificador FET.

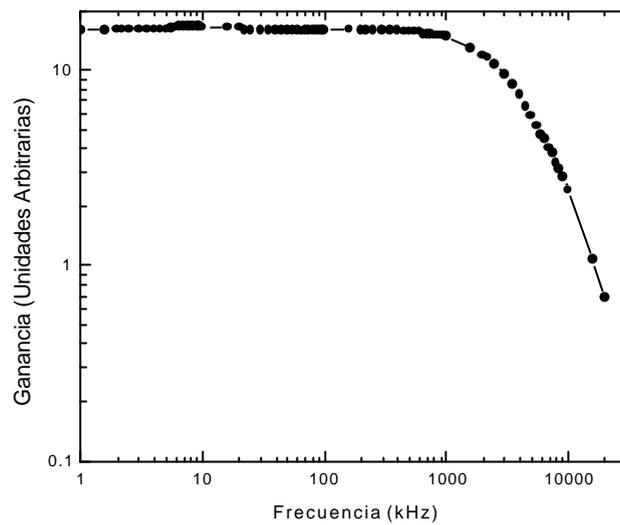


Figura 3.32 Curva de ganancia para el amplificador FET

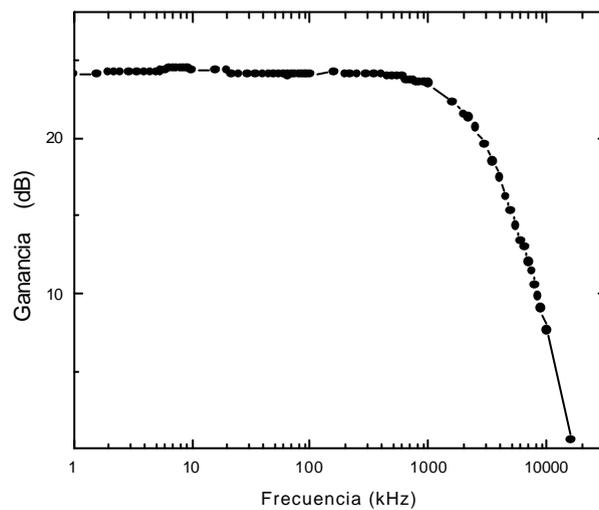


Figura 3.33 Curva de ganancia para el amplificador FET en  $dB$ .

De acuerdo a la ecuación (3.5) se determinó la frecuencia de corte para este amplificador correspondiendo un valor de  $2.3 \text{ MHz}$ .

Para determinar la linealidad del amplificador se aplicó una señal senoidal con una frecuencia de  $50 \text{ kHz}$ , se varió la amplitud empezando en  $10 \text{ mV}$  en incrementos de  $5 \text{ mV}$ , los resultados se muestran en la figura 3.34, la cual se

ajusto por el método de mínimos cuadrados obteniendo la pendiente la cual corresponde a la ganancia del amplificador de 17.6.

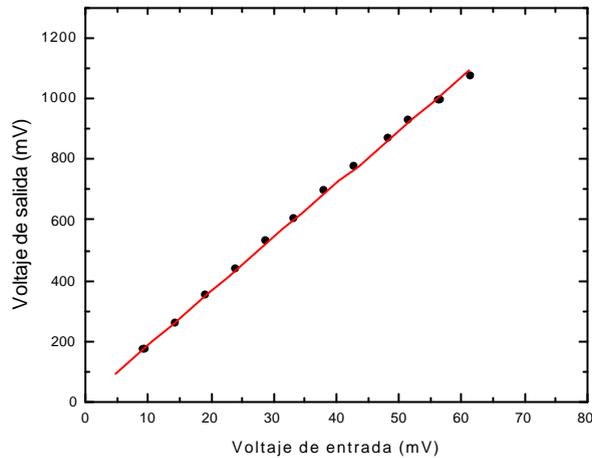


Figura 3.34 Gráfica de linealidad del amplificador FET

Para analizar la influencia para de este amplificador sobre los transitorios electrónicos e iónicos, considere una onda senoidal como la mostrada en la figura 3.35

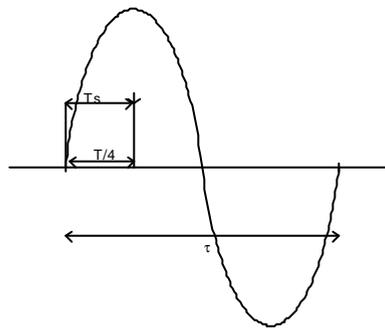


Figura 3.35 tiempos para una señal senoidal.

La frecuencia mínima necesaria esta dada por la ecuación (3.6);

$$f = 1/t = 1/4T_s, \quad (3.6)$$

Despejando  $T_s$  se tiene

$$T_s = 1/4f, \quad (3.7)$$

Para el amplificador FET la frecuencia de corte de  $2.3 \text{ MHz}$  da un tiempo de subida

$$T_s = 1/(4 \times 2.3 \times 10^6) = 0.11 \text{ ns} \quad (3.8)$$

### 3.4.2 Amplificador rápido de ganancia 10

También se utilizó un amplificador basado en el circuito integrado NE5539, véase el diagrama de la figura 3.37. Este circuito es mucho más sencillo en componentes, ya que todas las etapas se incluyen en el circuito integrado.

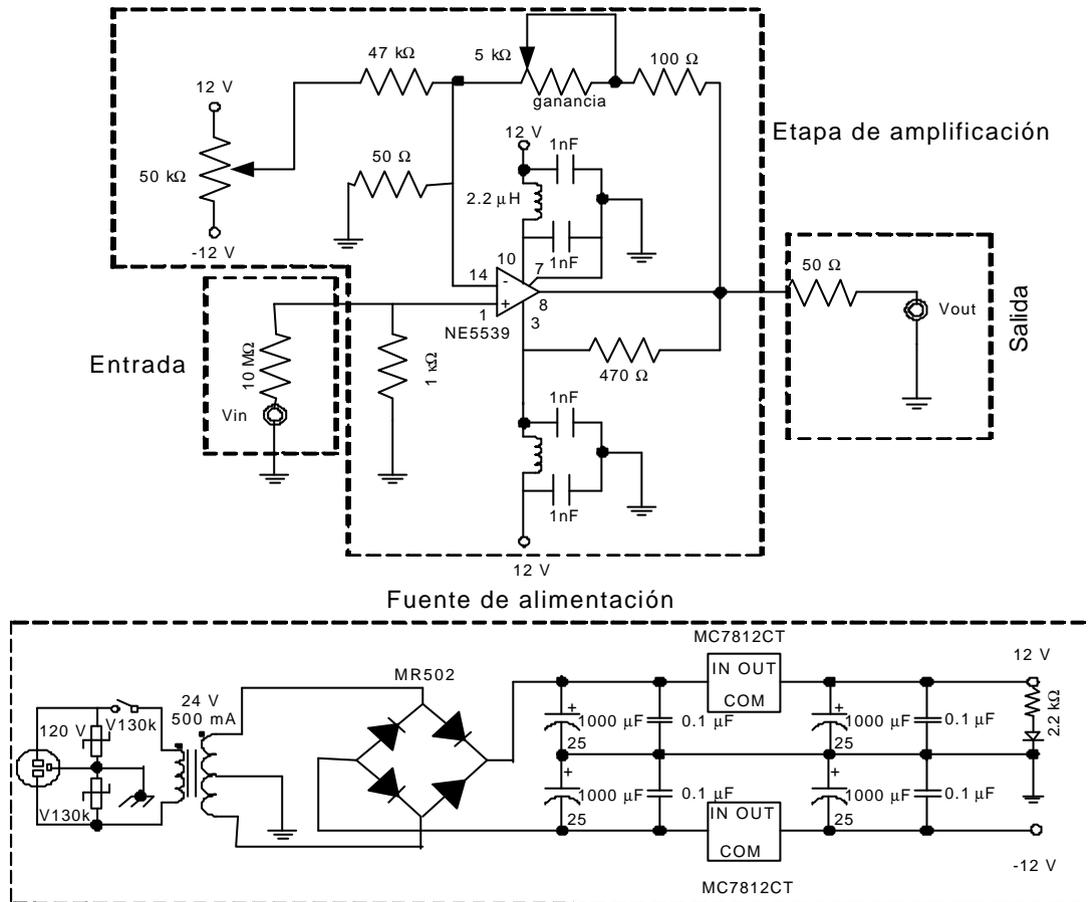


Figura 3.36 Amplificador rápido de ganancia para la cámara de Townsend.

En las figuras 3.37 a 3.39 se muestra la salida del amplificador de ganancia rápida, para frecuencias cercanas al  $1\text{ MHz}$ , la señal de salida se deforma, debido a ello no se utilizó pues su respuesta no es confiable a altas frecuencias como puede verse en la curva ganancia de la figura 3.40.

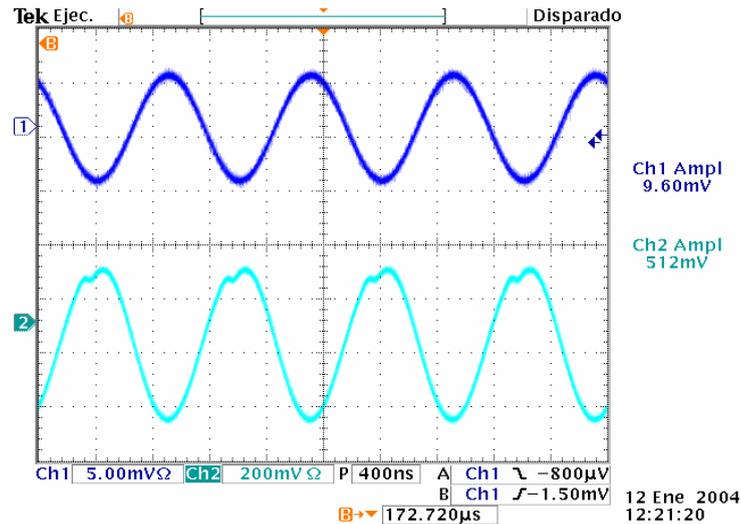


Figura 3.37 Histograma del osciloscopio para la señal de salida senoidal del amplificador rápido de ganancia a la frecuencia  $998\text{ kHz}$ .

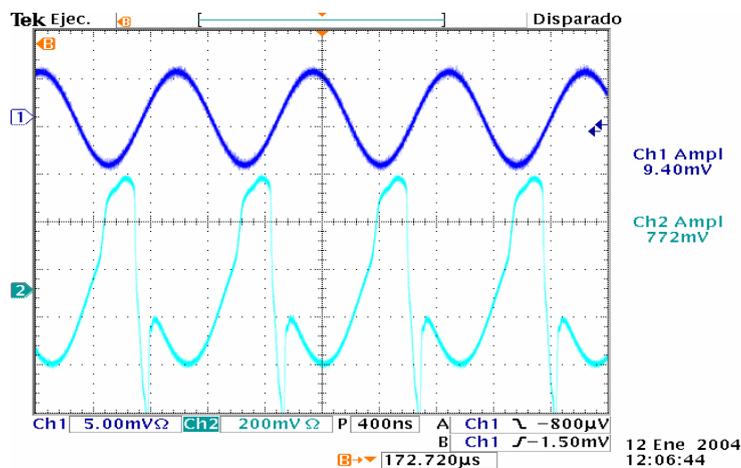


Figura 3.38 Histograma del osciloscopio para la señal de salida senoidal del amplificador rápido de ganancia a la frecuencia  $1050\text{ kHz}$ .

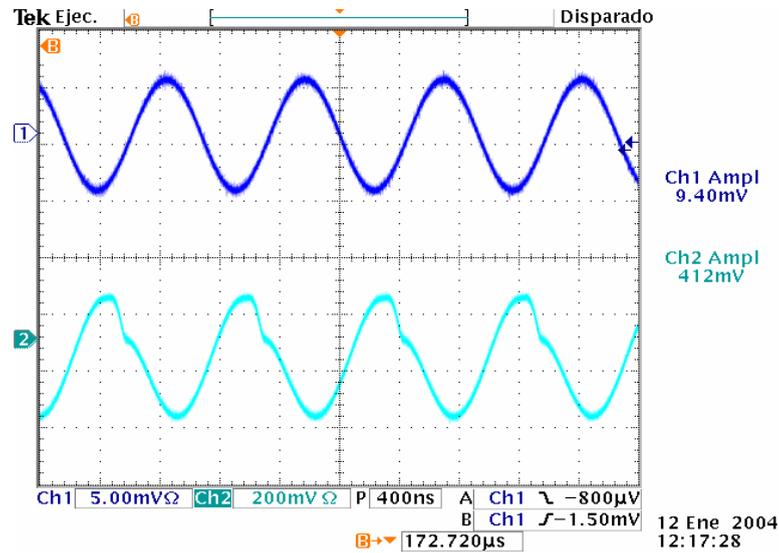


Figura 3.39 Histograma del osciloscopio para la señal de salida senoidal del amplificador rápido de ganancia a la frecuencia 1080 kHz

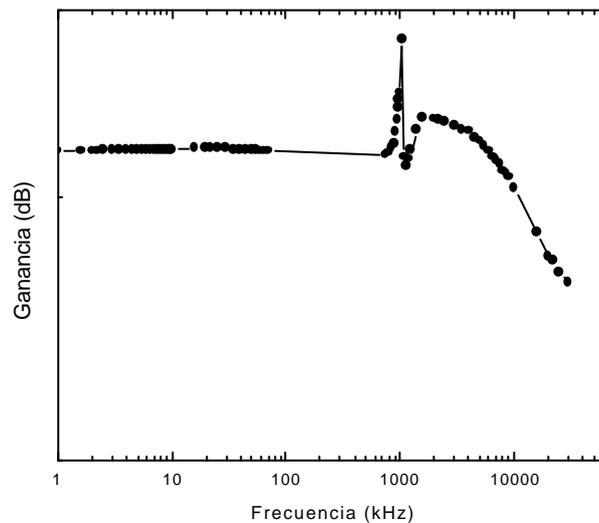


Figura 3.40 Curva de ganancia para el amplificador rápido de ganancia en  $dB$ . En este caso la respuesta en frecuencia no resultó ser plana se decidió no utilizarlo hasta revisar si el problema se debe a una falla o es un problema del diseño del circuito integrado.

### 3.5 Ensamblaje de la cámara de Townsend

La CDT se ensambló y se instaló en el Laboratorio de Fenómenos Críticos y Fluidos Complejos del Departamento de Ciencias Básicas de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

A continuación se muestra la secuencia de ensamblaje de la cámara de Townsend con los instrumentos de medición, accesorios y software detallados previamente en las secciones anteriores. Como primera etapa del montaje se necesitaba una mesa resistente y móvil en donde montar la cámara y los instrumentos de medición se diseñó la mesa que se muestra en la figura 3.41, posteriormente se le adicionaron dos repisas para contener a los instrumentos véase figura 3.42.



Figura 3.41 Mesa diseñada para la cámara de Townsend M mesa, BC base de la cámara, BM bomba mecánica.

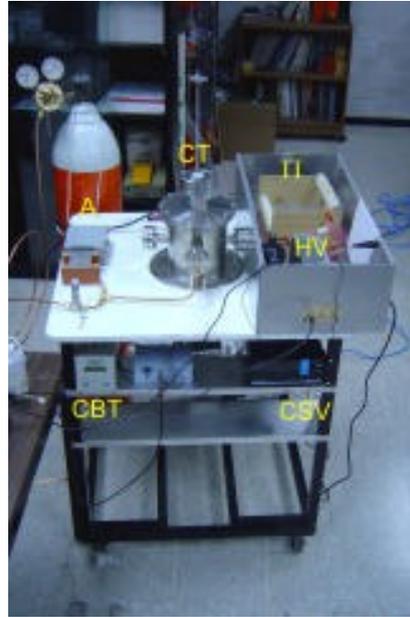


Figura 3.42 Montaje parcial de la cámara de Townsend CT, A amplificador, II filtro, HV fuente de alto voltaje, CBT controlador de la bomba turbo molecular, CSV control del sensor de vacío.

En la figura 3.43 se muestra en detalle la bomba turbo molecular y en la figura 3.44 el montaje en la parte inferior de la mesa con la bomba turbo molecular operando.

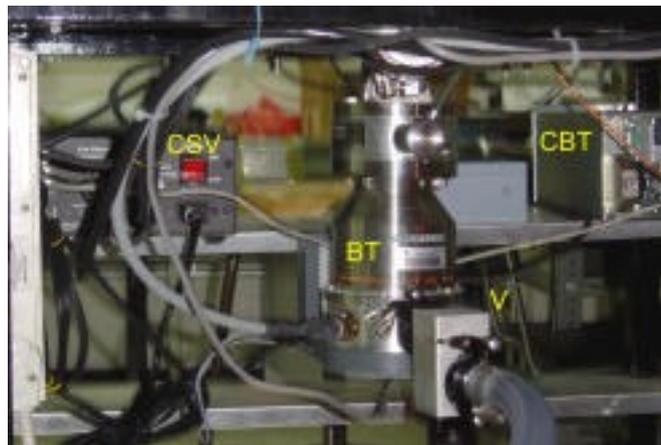


Figura 3.43 Bomba turbo molecular BT a la derecha se observa su controlador CBT a la izquierda se observa el controlador del medidor de vacío por ionización CVS, se aprecia la conexión de la válvula de seguridad V la cual protege a la bomba turbo molecular del aceite de la bomba mecánica a formarse el vacío.



Figura 3.44 Prueba en vacío de la cámara Townsend obsérvese el sensor por ionización encendido MI, este solo funciona en presiones menores a  $1 \times 10^{-4}$  torr , BM bomba mecánica.

Se muestra en la figura 3.45 la fuente de alto voltaje HV conectada al atravesador por medio de un filtro tipo “**p**”.



Figura 3.45 Detalle de la fuente de alto voltaje HV con un filtro “**p**” para proteger de un corto circuito en caso de ruptura del dieléctrico en la cámara de Townsend.



Figura 3.46 Detalle de la fuente de alimentación y control de disparo para el laser de nitrógeno.

En la figura 3.46 se muestra el control para el laser de nitrógeno éste cuenta con una fuente de 24 VDC y la perilla de frecuencia del disparo, opción de disparo externo y salida para sincronizado al disparo del laser.

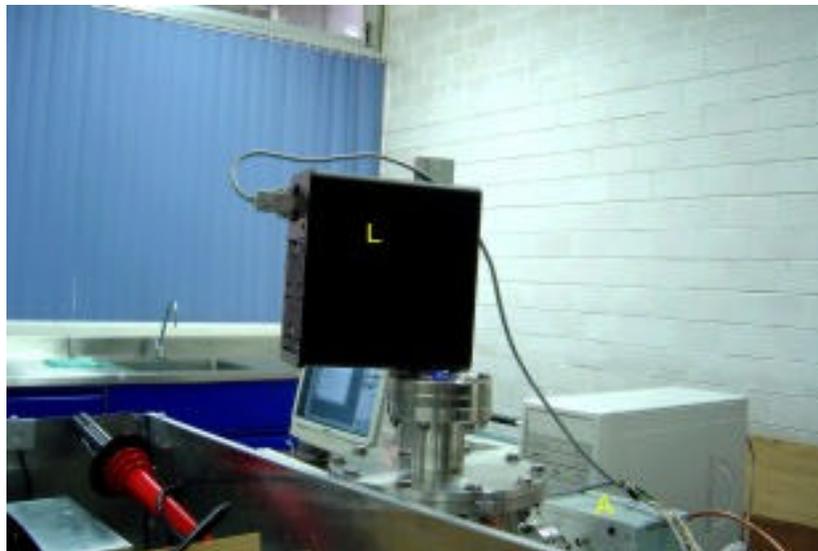


Figura 3.47 Láser de nitrógeno L en el instante del disparo sobre el cristal de cuarzo en la cámara de Townsend para ionizar al gas.

En la figura 3.47 se muestra el laser funcionando como el haz emitido es ultra violeta

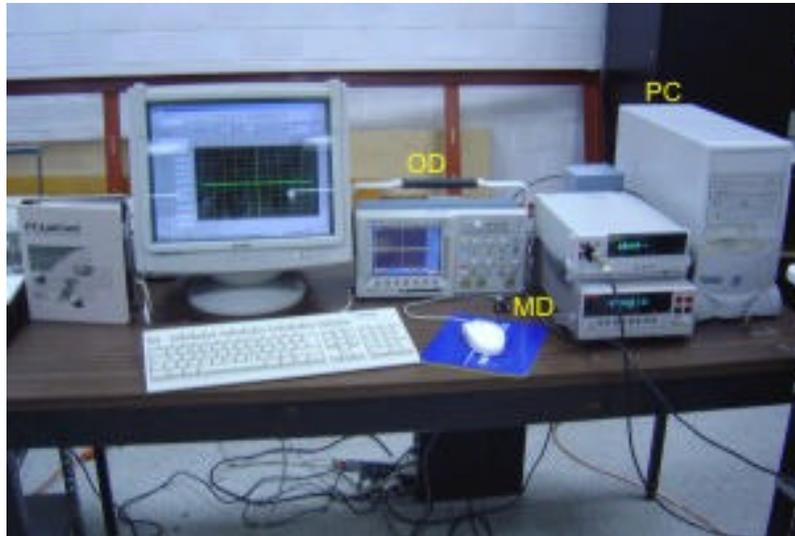


Figura 3.48 sistema de adquisición de datos el cual consta de la PC, tarjeta de adquisición de datos, tarjeta GPIB, osciloscopio OD, multímetros digitales MD.

En la figuras 3.48, 3.49 y 3.50 muestran el sistema de adquisición de datos que consta de una PC, tarjeta de adquisición de datos, tarjeta analógica digital y software.



Figura 3.49 Detalle del diseño de la entrada de la tarjeta analógica digital Avantech ®TA, mostrando cuatro canales para el sensado de los 4 puntos de temperatura en la cámara de Townsend.



Figura 3.50 Detalle de las conexiones para la comunicación de los instrumentos con la tarjeta GPIB.

En la figura 3.51 se muestra la cámara de Townsend completa y lista para entrar en operación.



Figura 3.51 La cámara de descargas tipo Townsend completa.

## CAPITULO 4

### ANÁLISIS DE LOS TRANSITORIOS EXPERIMENTALES

#### 4.1 Análisis de transitorios electrónicos

En esta sección se deducirán las expresiones para las distintas componentes de corriente que determinan la forma de onda de los pulsos en la CDT [16].

##### 4.1.1 Análisis sin difusión

Se considera a los electrones mucho más rápidos que los iones, por lo que durante el tiempo que los primeros se mueven los iones permanecen en reposo, gracias a esta suposición podemos separar el análisis en dos partes; la electrónica y la iónica.

Si se considera que la nube de electrones se desplaza una distancia  $dx$ , tenemos que el cambio en la población de electrones debido a las colisiones ionizantes o de captura esta dada por

$$dn_e/dx = \mathbf{a}n_e - \mathbf{h}n_e, \quad (4.1)$$

donde

$$\begin{cases} \mathbf{a} \rightarrow \text{Coeficiente de ionización} \\ \mathbf{h} \rightarrow \text{Coeficiente de captura} \end{cases}$$

Si la corriente es producida por los electrones en movimiento, se puede igualar el trabajo eléctrico y mecánico, obteniendo;

$$VI dt = nF_e dx, \quad (4.2)$$

Donde  $n_e$  es número de electrones que hay en el espacio interelectródico. Utilizando la definición de  $E = V/d$  para un capacitor de placas planas, paralelas e infinitas y la fuerza eléctrica se obtiene;

$$I = \frac{v_e e}{d} n_e, \quad (4.3)$$

Al rescribir la ecuación (4.1) y utilizando la ecuación (4.3), se tiene

$$dn_e/dx = (\mathbf{a} - \mathbf{h})n_e, \quad (4.4)$$

Al aplicar la regla de la cadena se obtiene una ecuación diferencial de primer orden de variables separables;

$$[dn_e/dt][dt/dx] = (\mathbf{a} - \mathbf{h})n_e \quad (4.5)$$

Integrando ambos miembros y utilizando la condición inicial  $n_e(t=0) = n_0$ , se obtiene la solución;

$$n_e(t) = n_0 e^{v_e(\mathbf{a}-\mathbf{h})t} \quad (4.6)$$

Como los electrones se mueven en forma de una lámina, el número de electrones en el gap esta dado por  $n_e$  de esta forma sustituyendo (4.6) en (4.3) se obtiene la corriente;

$$I = \frac{n_0 e v_e}{d} e^{v_e(\mathbf{a}-\mathbf{h})t} \quad (4.7)$$

Para poder observar los cambios en la forma de los transitorios electrónicos se graficó la expresión (4.7) para diferentes parámetros tales como distancia  $d$ , Presión  $P$ , Temperatura  $T$ , coeficiente efectivo de ionización  $\mathbf{a} - \mathbf{h}$ , velocidad electrónica  $V_e$ . Para todas las simulaciones que se presentan a continuación, se mantuvieron constantes los siguientes datos  $T = 300 K$ ,  $v_e = 1 * 10^7 m/s$ ,  $d = 3 cm$ ,  $P = 1 torr$ ,  $(\mathbf{a} - \mathbf{h}) = 0.1 * 10^{-16} cm^{-1}$  [31].

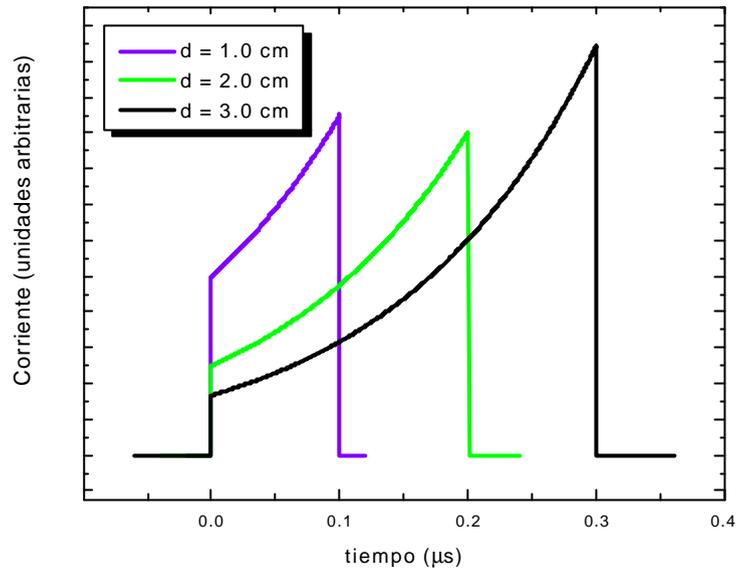


Figura 4.1 Simulación del transitorio electrónico para distancias entre cátodo y ánodo del capacitor de 1, 2, 3 *cm* para la cámara de descargas pulsadas tipo Townsend.

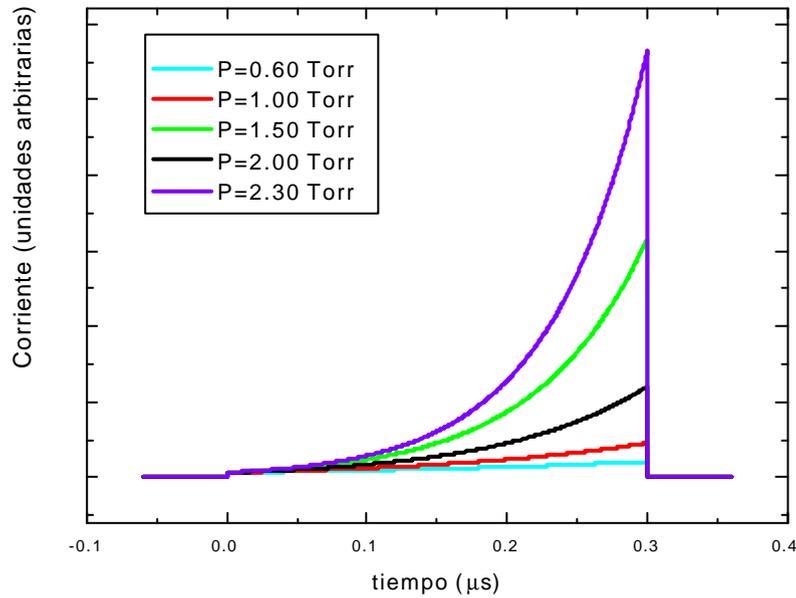


Figura 4.2 Simulación de un transitorio electrónico para un rango de presión variable en un rango comprendido de 0.6 a 2.3 *torr* nótese que la magnitud de corriente  $I$  esta en función de la presión.

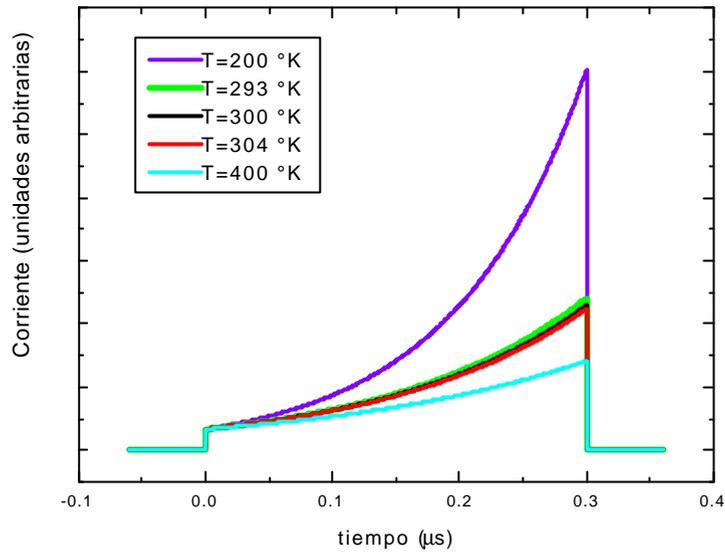


Figura 4.3 Simulación del transitorio electrónico a temperatura variable el efecto de temperatura en la magnitud de corriente apreciable a temperaturas ambiente, sin embargo el efecto se aprecia cuando entre temperaturas extrema de trabajo como 200 y 400 K.

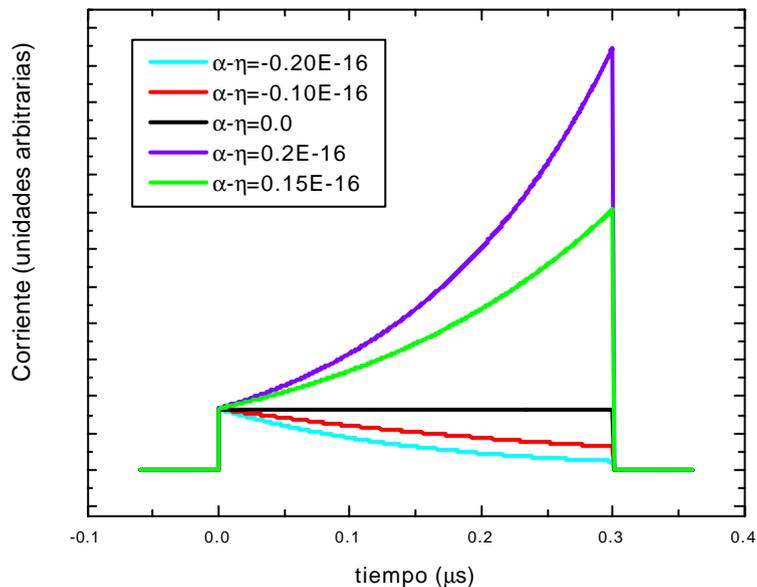


Figura 4.4 Simulación de corrientes  $I$  para el coeficientes efectivo de ionización variable en este caso se presenta cuando el coeficiente de ionización efectivo es cero, esto, es  $\alpha = \eta$  entonces se tiene el valor limite o (crítico) de  $E/N$  Un parámetro importante, de interés técnico y ampliamente usado en aplicaciones de descargas gaseosas.

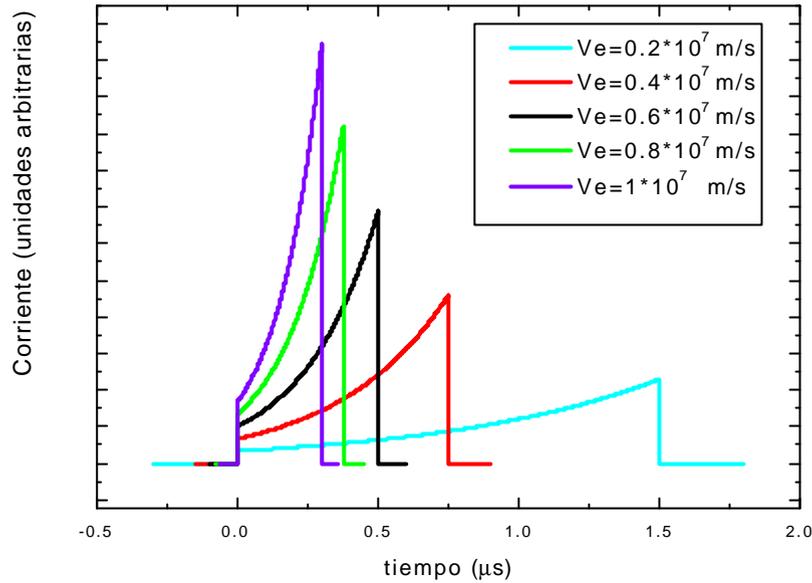


Figura 4.5 Simulación de corrientes  $I$  para la velocidad electrónica en  $v_e$  en un rango de  $0.2 \cdot 10^7$  a  $1 \cdot 10^7$  m/s .

#### 4.1.2 Análisis con difusión

En 1964 Brambling realizó un estudio sobre la difusión electrónica, partiendo de la ecuación de continuidad [37], véase figura 4.6 que muestra el efecto de la difusión.

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{r}(\vec{r}, t) + \nabla \cdot \vec{j}(\vec{r}, t) = \mathbf{a}_e \cdot \vec{j}(\vec{r}, t) \quad (4.8)$$

donde

$$\vec{j}(\vec{r}, t) = -D \nabla \mathbf{r}(\vec{r}, t) + \bar{v}_e \mathbf{r}(\vec{r}, t) \quad (4.9)$$

obteniendo la expresión final (4.10)

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

donde

$$\mathbf{f}(x) = \frac{2}{\sqrt{\mathbf{p}}} \int_0^x \exp(-u^2) du \quad (4.11)$$

es la función error

En el caso de  $D = 0$ , la ecuación de  $i(t)$  se reduce a

$$i(t) = \begin{cases} \frac{n_0 e v_e}{d} \exp(\mathbf{a}_e v_e t) & 0 \leq t \leq T_e \\ 0 & t > T_e \end{cases} \quad (4.12)$$

En la figura 4.6 se muestra el efecto de ensanchamiento de la nube electrónica debido al efecto de la difusión al moverse en presencia del gas.

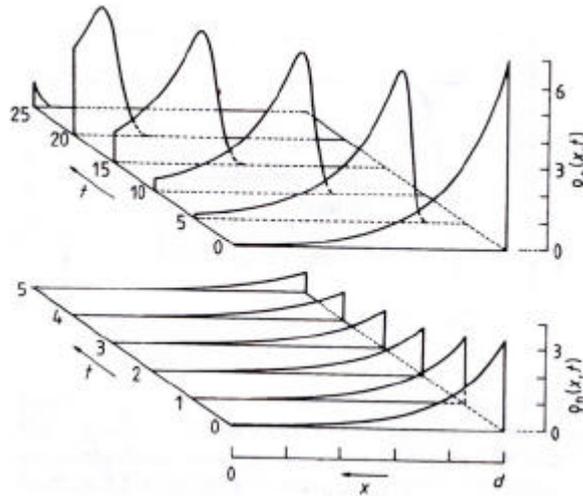


Figura 4.6 variación espacio temporal de los portadores de densidad para iones positivos  $n_+ = r_+(x, t)$  y para iones negativos  $r_-(x, t)$ . Ambos ejes están normalizados por el mismo factor están dados en unidades arbitrarias. Los efectos de la difusión son claramente vistos en  $r_+(x, t)$ . 0, cátodo; d, ánodo; la escala de tiempo son  $m$ .

## 4.2 Análisis de tránsitos iónicos

### 4.2.1 Análisis sin difusión

Cuando los electrones pasan por el espacio entre los electrodos dejan tras de si una densidad inicial de iones repartidos espacialmente de la forma

$$n_+(x) = e^{\mathbf{a}_e x} - 1 \approx e^{\mathbf{a}_e x} \quad (4.13)$$

donde  $n_+(x)$  es el número de iones en función de la posición.

Usando la expresión de la corriente para  $n$  cargas moviéndose en el espacio Inter electródico tenemos;

$$I = \frac{v_e e}{d} n, \quad (4.14)$$

La ecuación (4.13) nos da la población de iones que dejaron los electrones la pasar por el gas, siendo esta la condición inicial para el movimiento de los iones.

Para  $t_e < t < t_n$  se considera que la nube de iones positivos dada por (4.13) se desplaza hacia el cátodo con una velocidad  $v_+$ , por lo que el número de iones disminuye conforme se acercan al cátodo. De esta forma;

$$n = \int_{x=v_+t}^d n_+(x) dx, \quad (4.15)$$

evaluando la integral se obtiene;

$$n = \frac{1}{a_e} (e^{a_e d} - e^{a_e v_+ t}), \quad (4.16)$$

y al sustituir (4.16) en (4.14) se obtiene la expresión para la corriente iónica;

$$I = \frac{e v_+}{a_e d} (e^{a_e d} - e^{a_e v_+ t}), \quad (4.17)$$

Definiendo  $t_+ = d/v_+$ , se rescribe (4.20) como;

$$I = \frac{e}{a_e T_+} (e^{a_e d} - e^{a_e v_+ t}), \quad (4.18)$$

De acuerdo a la expresión (4.18) se presentan las simulaciones para el caso de los transitorios iónicos que de igual forma en la sección 4.1 se mantienen todos los parámetros constantes. Las condiciones de la simulación son  $T = 300K$ ,  $v_n = 1 * 10^4 \text{ m/s}$ ,  $d = 3 \text{ cm}$ ,  $P = 1 \text{ torr}$ .

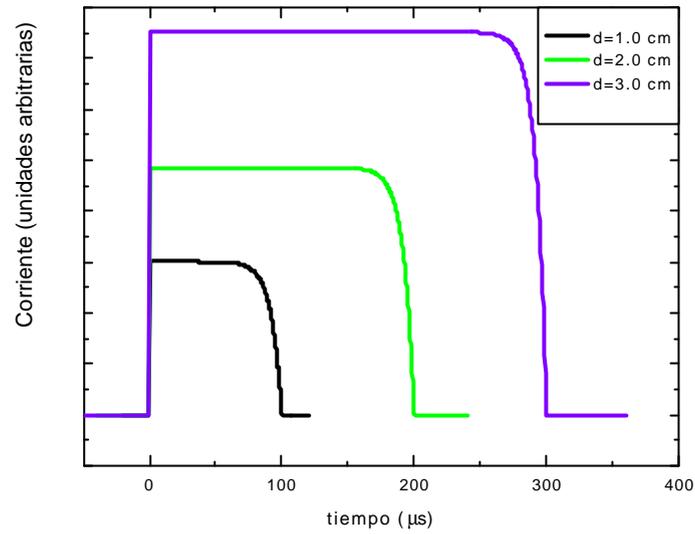


Figura 4.7 Simulación para el transitorio de corriente iónica con distancia variable entre el ánodo y cátodo del capacitor para tres distancias 1, 2, 3  $cm$ .

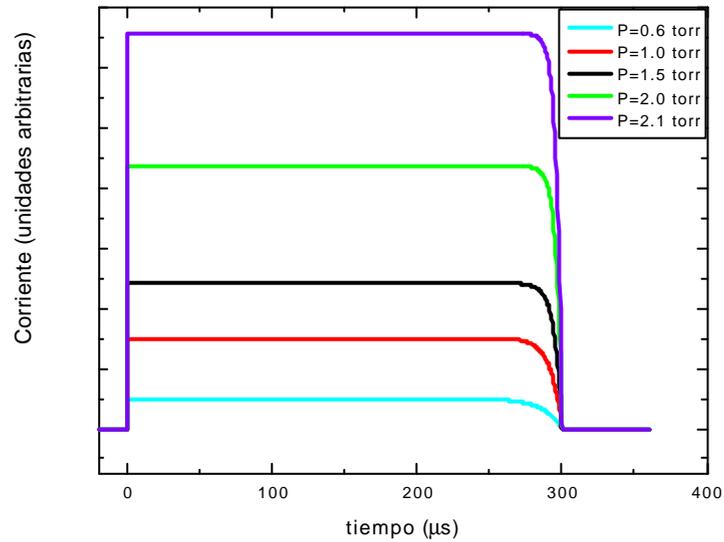


Figura 4.8 Simulación para el transitorio de corriente iónica a presión variable.

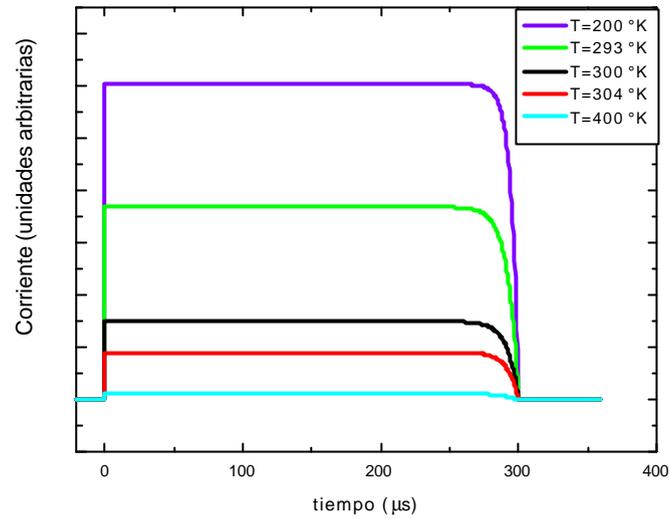


Figura 4.9 Simulación para el transitorio de corriente iónica para temperatura variable.

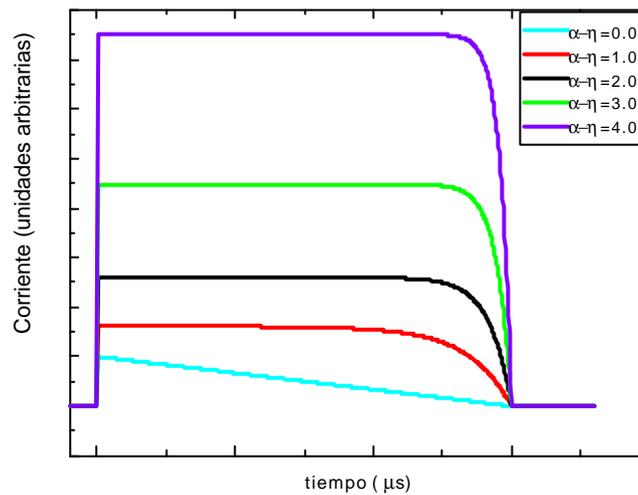


Figura 4.10 Simulación para el transitorio de corriente iónica con coeficiente efectivos de ionización variable.

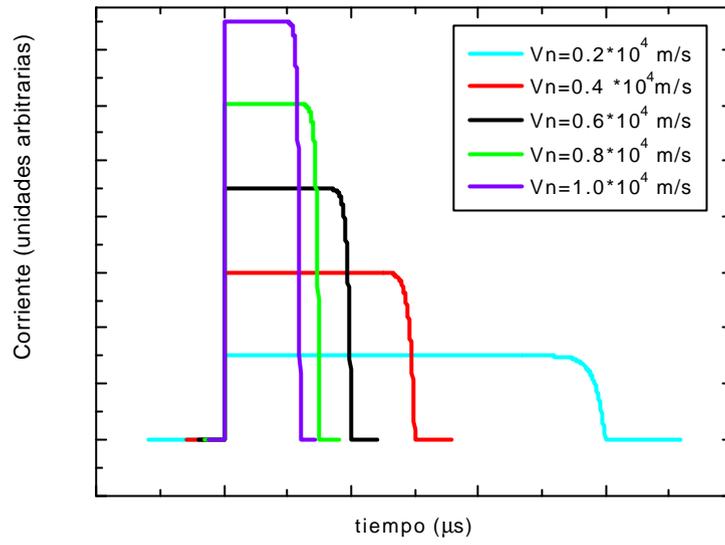


Figura 4.11 Simulación para el transitorio de corriente iónica velocidad iónica  $v_n$  variable.

## CAPITULO 5

### MEDICIONES EN SF<sub>6</sub> PURO Y MEZCLAS

#### 5.1 Uso de los programas para análisis de transitorios

Una vez que se han efectuado las mediciones, se analizan los pulsos de corriente, primero se obtiene una medida preliminar estimado los tiempos de ascenso y descenso de los pulsos e indicando la región en donde se encuentra el crecimiento por ionización. Posteriormente se utiliza otro programa “Análisis de Difusión” escrito en Visual Basic, con el cual se ajusta cada uno de los pulsos, tomando como parámetros iniciales los obtenidos en el análisis previo. A continuación se muestra una secuencia en la que se ajusta un transitorio iónico. Hay que hacer notar que el procedimiento es manual ya que la forma de onda es bastante complicada y puede tener ruido, por lo que un ajuste numérico minimizando errores no siempre funciona, en consecuencia depende de la habilidad que desarrolla el usuario (véase la figura 5.1).

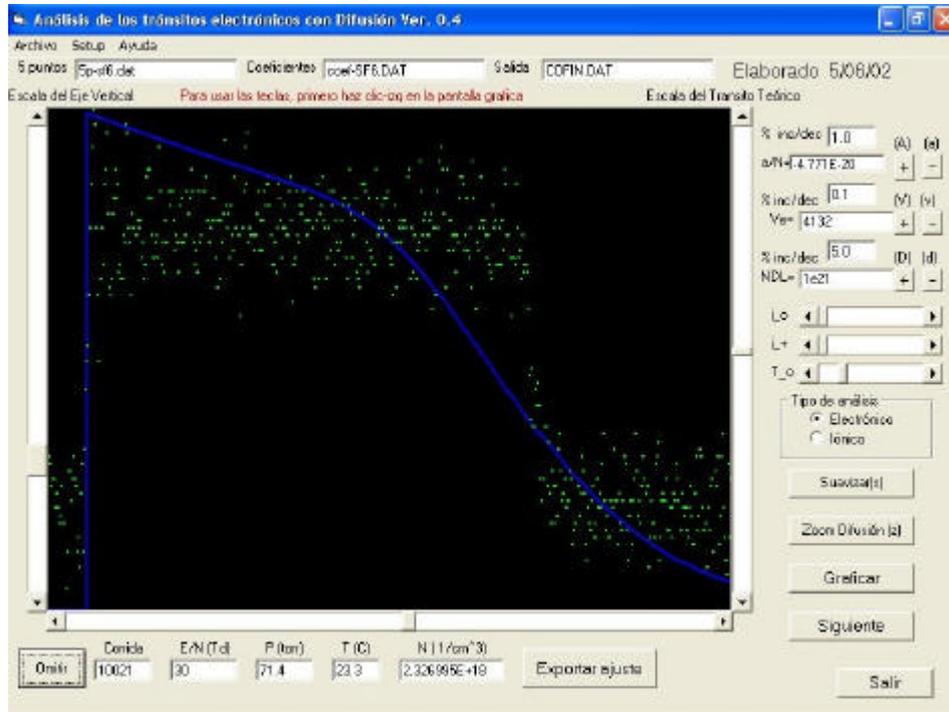


Figura 5.1 Programa de análisis de transitorios, se visualiza el transitorio tal cual es capturado en el osciloscopio para este caso se trata de un transitorio iónico a baja presión.

### Cambios en los parámetros de ajuste

En la parte derecha de la gráfica (figura 5.2) la barra deslizadora cambia la escala del transitorio teórico, y no afecta al transitorio experimental.

Hay tres barras deslizadoras debajo de los parámetros de transporte (extrema derecha), estos controles modifican los siguientes parámetros

$i_o$  Es el valor del fondo constante (inicio del tránsito)

$i_+$  Es el valor de la corriente positiva (final del tránsito)

$t_0$  Es el valor al que inicia el transitorio teórico

Con los valores de  $i_+$  e  $i_o$  se resta la corriente que no corresponde a los electrones, esta se aproxima por una recta del inicio al final del tránsito electrónico.

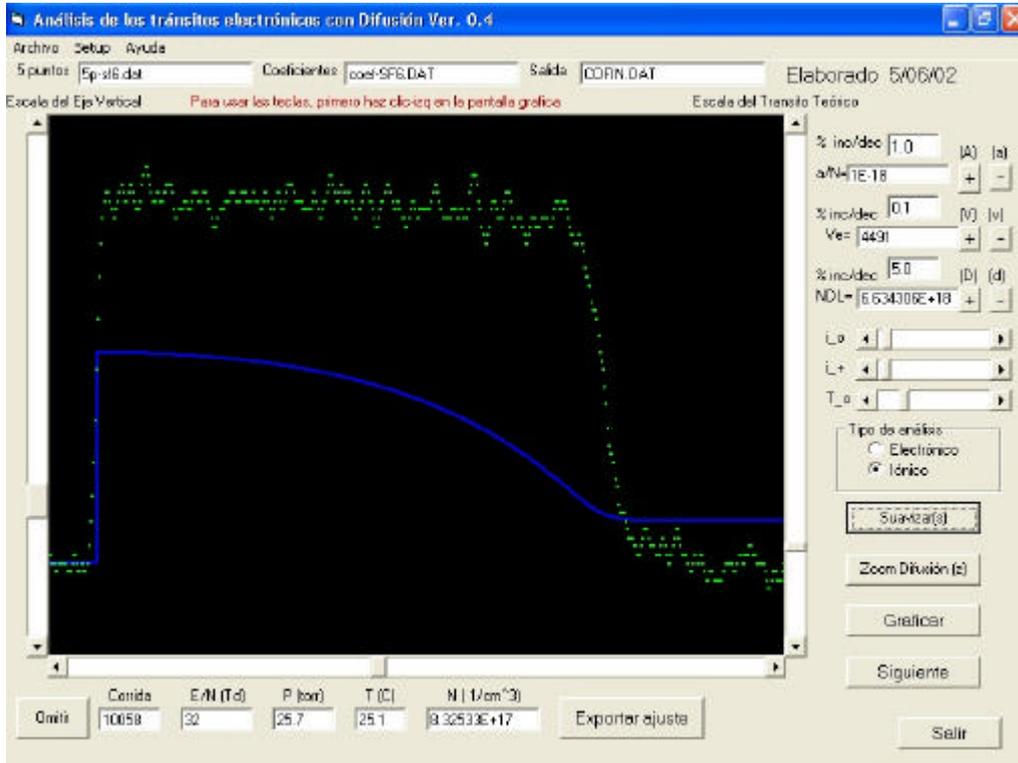


Figura 5.2 En esta etapa se suaviza el transitorio así se puede ajustar a la curva azul la cual es el modelo teórico de la difusión.

### Cambios en la escala y presentación de gráficas

Si la grafica esta muy pequeña o grande, dentro de la ventana, en la parte izquierda de la grafica se puede cambiar la escala del eje y si el transitorio esta

muy comprimido o expandido en el eje del tiempo (horizontal), entonces se puede cambiar la escala del tiempo con la barra deslizadora en la parte inferior del gráfico ver figura 5.3.

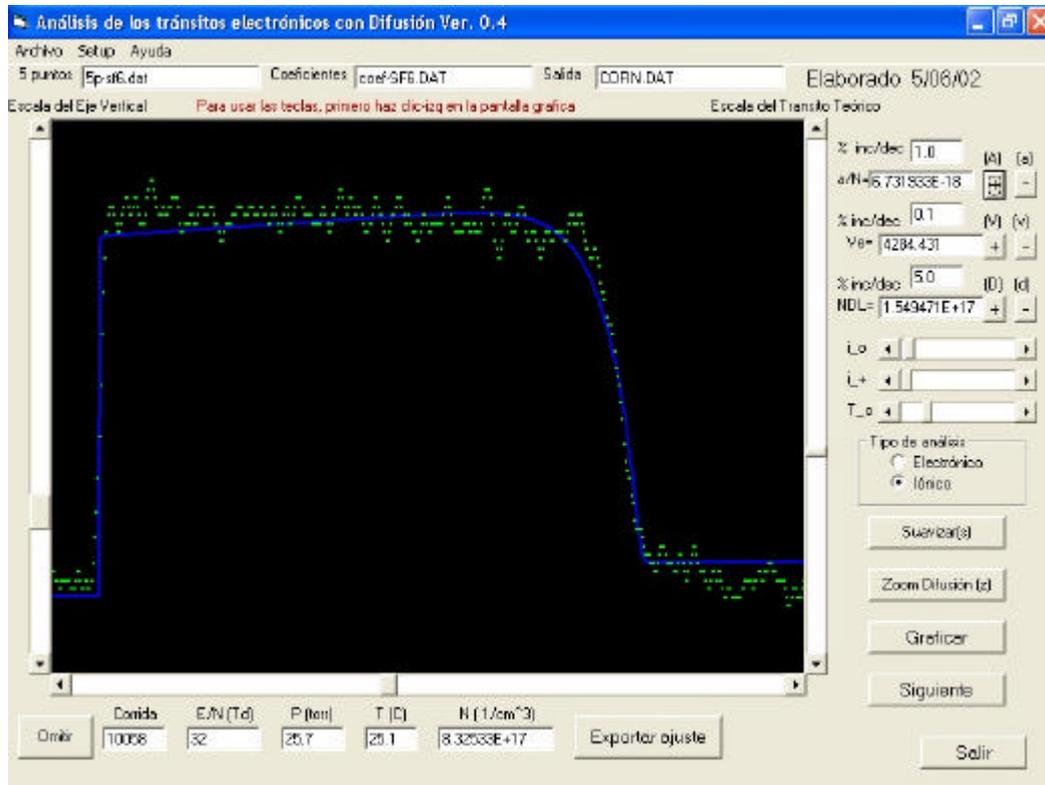


Figura 5.3 Se presenta el transitorio iónico ya ajustado al modelo teórico de la difusión.

## 5.2 Mediciones de SF<sub>6</sub> puro.

Se presentan dos ejemplos de transitorios iónicos para SF<sub>6</sub> puro en las figuras 5.4 y 5.5. En la figura 5.4 se presenta un transitorio en el que el pico a la izquierda representa el pulso electrónico, posteriormente se presenta un decaimiento casi lineal, esto sucede cuando los coeficientes de ionización y captura electrónica son iguales. En el transitorio presentado en la figura 5.5 se presenta una forma “rectangular”, en este caso el valor de E/N disminuye, por lo que los electrones son capturados en las primeras colisiones, por lo que solo se mueven los iones en el espacio inter-electrónico.

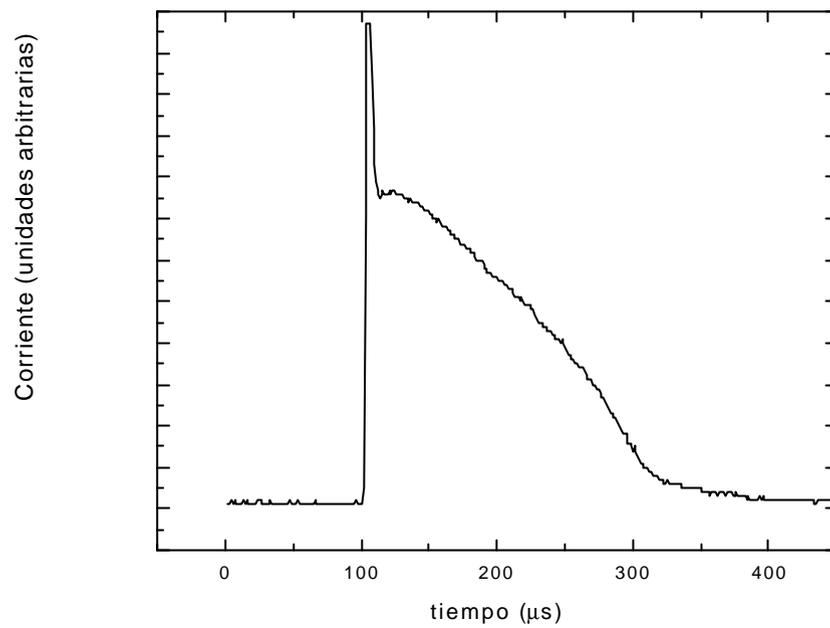


Figura 5.4 Transitorio iónico 100 % SF<sub>6</sub> con  $E/N = 400 \text{ Td}$ ,  $P = 3.25 \text{ torr}$ ,  $d = 3 \text{ cm}$ .

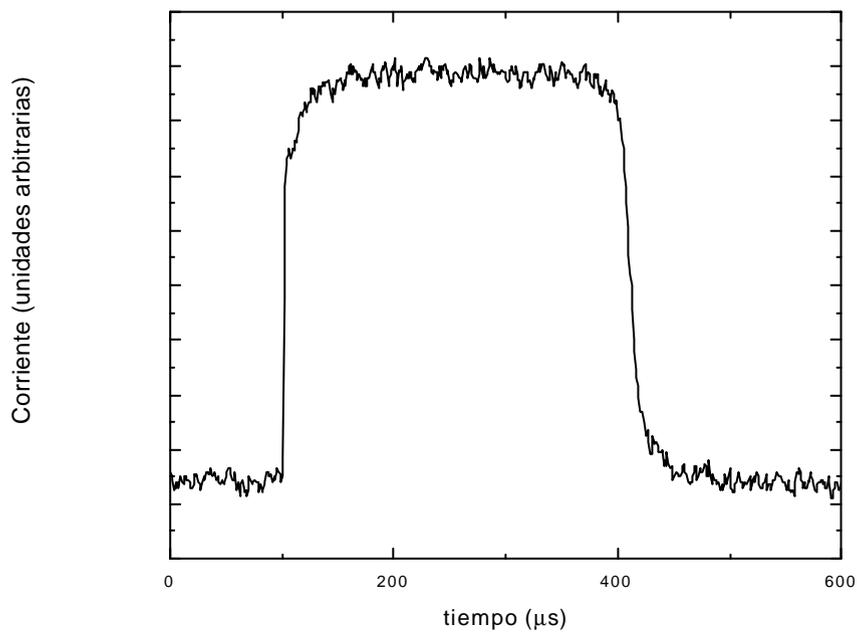


Figura 5.5 Transitorio iónico 100 % SF<sub>6</sub> con  $E/N = 104 \text{ Td}$ ,  $P = 7.82 \text{ torr}$ ,  $d = 3 \text{ cm}$ .

En las figuras 5.6 se presenta la velocidad iónica para SF<sub>6</sub> puro. En cuadrados se presentan las mediciones realizadas con la CDT construida en este trabajo, teniendo un acuerdo excelente con mediciones previas [24], mostrando el buen funcionamiento del sistema construido.

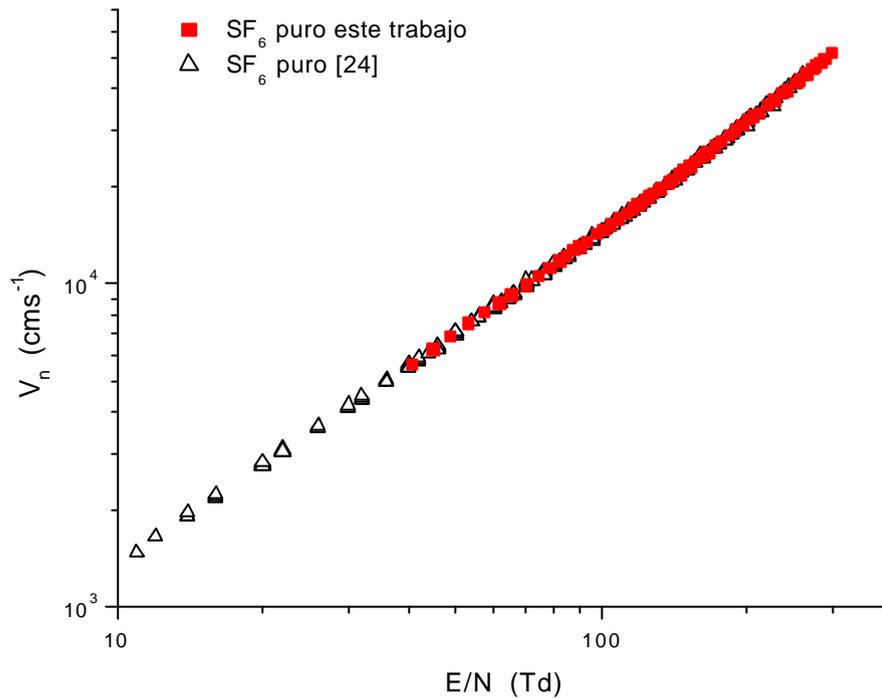


Figura 5.6 Velocidad iónica para SF<sub>6</sub> puro. Los rectángulos sólidos representan las mediciones realizadas con la CDT construida en este trabajo.

### 5.2.1 MEZCLA SF<sub>6</sub>-AIRE

Se presentan las mediciones de velocidad electrónica y coeficiente de ionización [38], los datos son el promedio de varias mediciones (normalmente tres) para un mismo  $E/N$  y diferentes presiones. Todos los gases poseen una pureza superior al 99% y fueron inyectados a la cámara de pruebas sin ninguna purificación previa para el análisis de la mezcla SF<sub>6</sub> - Aire se presentan las comparaciones al 1%, 5%, 10% y 100%.

En la figura 5.7 se observa que la velocidad electrónica está dominada por el SF<sub>6</sub>, y ésta aumenta para un valor de  $E/N$  fijo conforme aumenta el contenido

de aire en la mezcla. En la figura 5.8 se observa que el coeficiente de ionización efectiva se abanica en función de la concentración de aire en la mezcla, y se vuelve más electronegativo conforme aumenta la concentración de SF<sub>6</sub> en la mezcla.

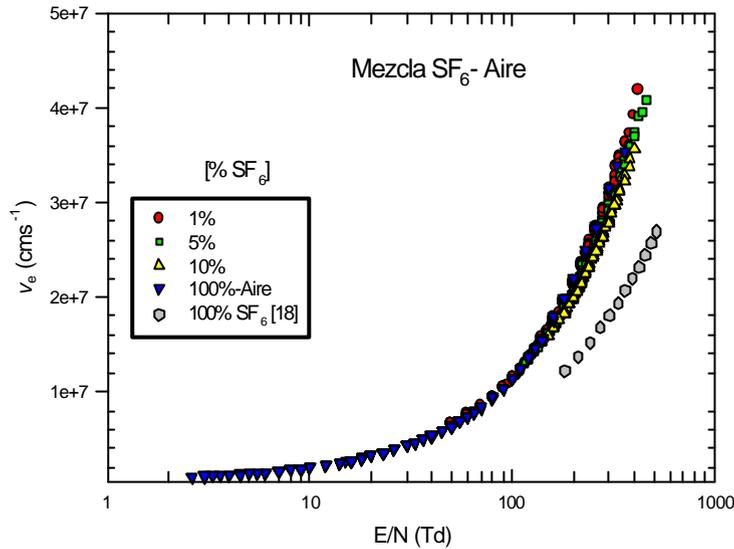


Figura 5.7 Comparación entre diferentes concentraciones para la velocidad electrónica mezcla SF<sub>6</sub>-Aire.

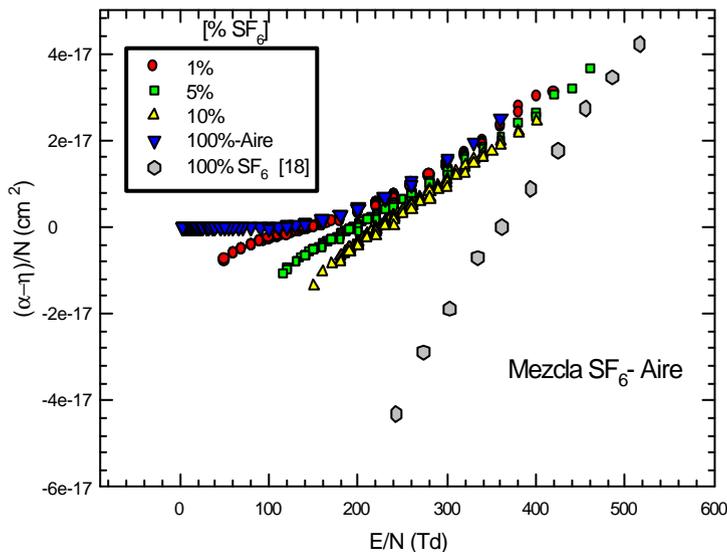


Figura 5.8 Coeficiente de ionización entre diferentes concentraciones SF<sub>6</sub>-Aire.

### 5.2.2 Mezclas SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> y SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>

En esta sección se presentan parámetros electrónicos las mezclas SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> y SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, los datos son el promedio de varias mediciones (normalmente tres) para un mismo E/N y diferentes presiones respectivamente. Todos los gases poseen una pureza superior al 99% y fueron inyectados a la cámara de pruebas sin ninguna purificación previa. Las presiones de gas dentro de la cámara fueron desde 1 a 300 torr y las temperaturas variaron entre 290 K y 300 K.

#### 5.2.2.1 Velocidades electrónicas

Los resultados de la velocidad electrónica de deriva en función de E/N son mostrados en la figura 5.9 para la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> y para la mezcla de SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> en la figura 5.10

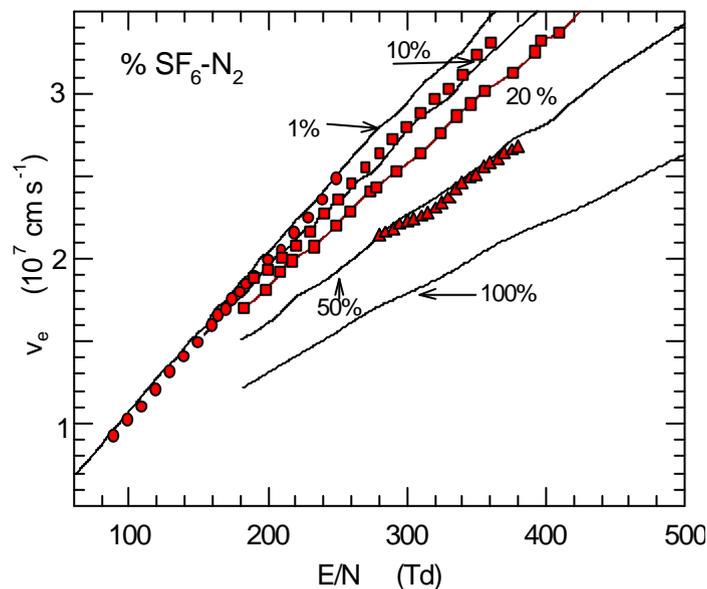


Figura 5.9 Resultados de la velocidad electrónica de la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> (símbolos) y una comparación con los resultados previos de Aschwanden (líneas sólidas) [18].

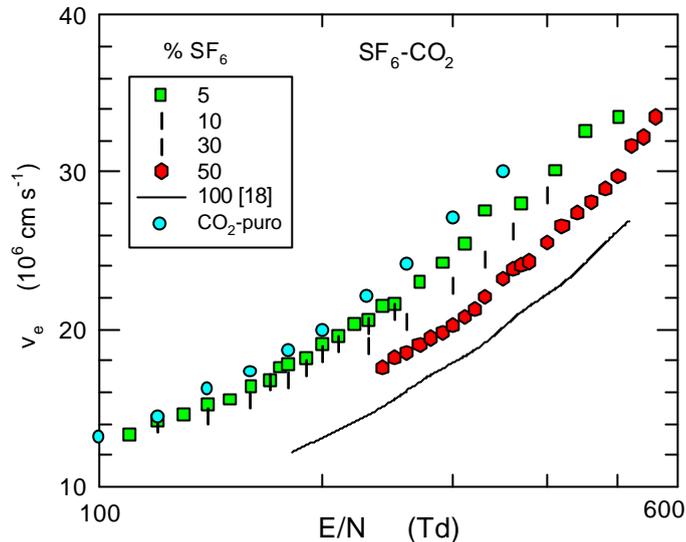


Figura 5.10 Resultados de la velocidad electrónica de la mezcla  $SF_6-CO_2$  (símbolos).

En el caso de la mezcla  $SF_6-CO_2$  (ver figura 5.10) y para bajas concentraciones de  $SF_6$  (hasta 10%) no se aprecia grandes variaciones en  $v_e$ . Sin embargo a partir de concentraciones de 30% de  $SF_6$ , se perciben una atenuación importante en la velocidad debido al carácter electronegativo que posee la mezcla para esas concentraciones de  $SF_6$ , respecto de la cantidad de  $CO_2$ .

### 5.2.2.2 Coeficientes efectivos de ionización

Los coeficientes efectivos de ionización normalizados en densidad  $(a-h)/N$ , se muestran en las figuras 5.11 y 5.12 para el  $SF_6-N_2$  y  $SF_6-CO_2$ , respectivamente, en función de  $E/N$ . Un punto remarcable que muestran estas curvas es el carácter electronegativo de los gases al incrementar la proporción del  $SF_6$  en la mezcla; esto se aprecia claramente por la superposición de curvas para concentraciones diferentes de mezclas. Para el  $SF_6-N_2$ , se puede observar el buen acuerdo en tendencia y magnitud, entre nuestros datos y los de la referencia [18] marcadas por las líneas continuas. En la figura 5.12, los valores de  $(a-h)/N$  para la mezcla de  $SF_6-CO_2$  exhiben una tendencia que muestra la influencia del  $CO_2$  a bajas concentraciones de  $SF_6$ . Esta dependencia cambia a partir de valores de 50% de  $SF_6$  en la mezcla, pues la

curva de  $(a-h)/N$ , a esta concentración, se asemeja a la curva del SF<sub>6</sub> puro. Para un  $E/N$  constante los valores de  $(a-h)/N$  disminuyen a medida que la concentración aumenta y en consecuencia el coeficiente de captura electrónica ( $h$ ) aumenta.

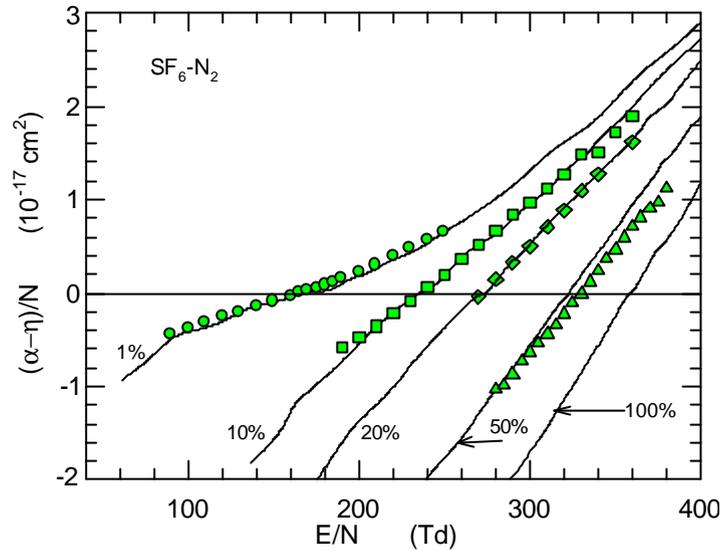


Figura 5.11 Coeficientes efectivos de ionización (símbolos), comparados con los resultados experimentales de Aschwanden (líneas sólidas) para SF<sub>6</sub> - N<sub>2</sub> [18].

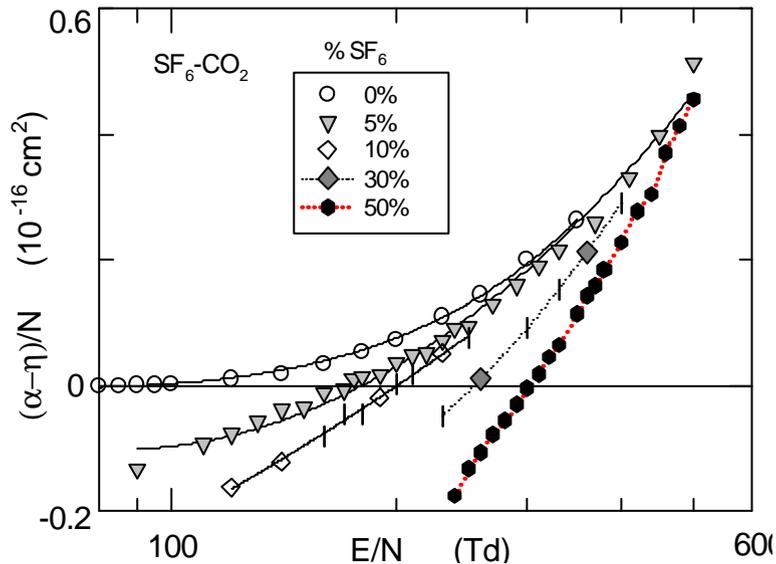


Figura 5.12. Coeficientes efectivos de ionización para SF<sub>6</sub> - CO<sub>2</sub>. Las líneas son solo indicativas.

### 5.2.2.3 Valor límite de E/N

Un parámetro importante, de interés técnico y ampliamente usado en aplicaciones de descargas gaseosas, es el valor límite (o crítico) de  $E/N$ ; que se define como el valor de  $E/N$  al cual el coeficiente efectivo de ionización es cero, esto es, cuando  $\mathbf{a} = \mathbf{h}$  ver figura 5.13.

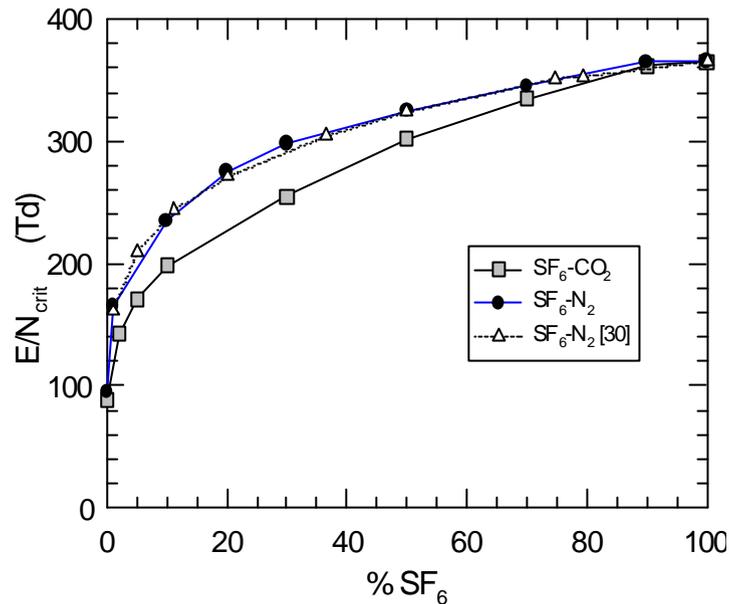


Figura 5.13. Variación de valor límite de  $E/N$  para las dos mezclas en función de la concentración de  $SF_6$ . Para comparación se presenta los datos experimentales de  $E/N_{crit}$  determinados por Aschwanden [18].

A partir de los valores de  $(\mathbf{a}-\mathbf{h})/N$  para las mezclas gaseosas se deducen los valores para  $E/N_{crit}$  en función del contenido porcentual de  $SF_6$ . La figura 6.15 muestra la variación de estos  $E/N_{crit}$  para las dos mezclas gaseosas. Se comparan nuestros datos experimentales con los de la referencia [18] en el caso de  $SF_6-N_2$ . Donde se aprecia el excelente acuerdo en las concentraciones comunes, exhibiendo la misma tendencia. En todo caso los valores de  $E/N_{crit}$  para la mezcla  $SF_6-N_2$  son de 7% a 30% superiores a los de la mezcla de  $SF_6-CO_2$ , sobre un rango de valores de 5% a 30% de contenido de  $SF_6$ .

### 5.3. AIRE PURO

Se presentan las mediciones de velocidad electrónica y del coeficiente de ionización efectiva [38]. En la figuras 5.14 se presentan los datos obtenidos para la velocidad de deriva electrónica y se comparan con los reportados por Dutton [39], a lo largo del intervalo de traslape los datos de Dutton están por encima de los nuestros, siendo mayor ésta diferencia en el intervalo de 20 a 100 Td. En el caso del coeficiente de ionización efectiva (ver figura 5.15) se tiene un acuerdo excelente con los datos de Dutton, mostrando que el aire no tiene carácter electronegativo, por ello es que no es un muy buen aislante dieléctrico.

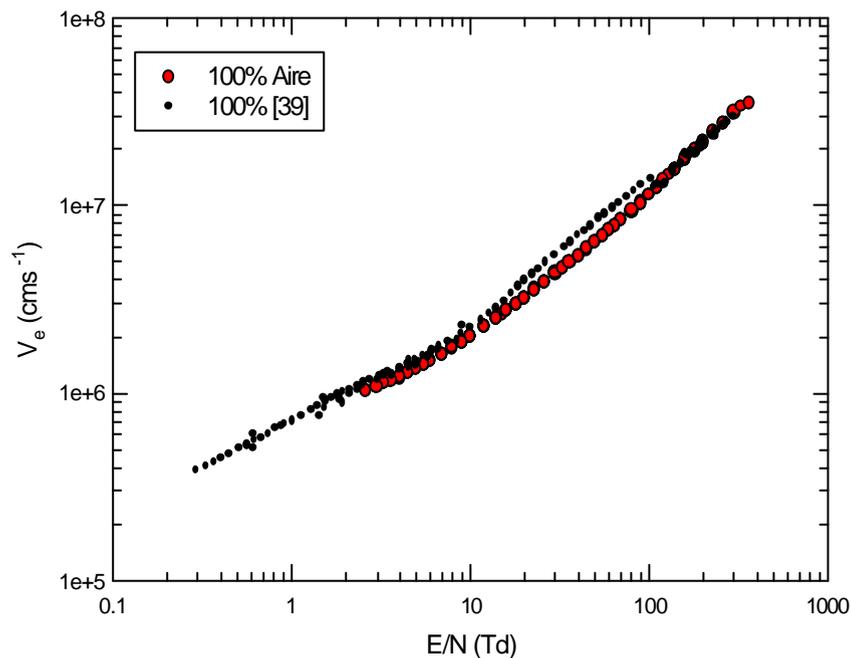


Figura 5.14 Velocidad electrónica aire 100 % puro comparación con el trabajo de Dutton [39].

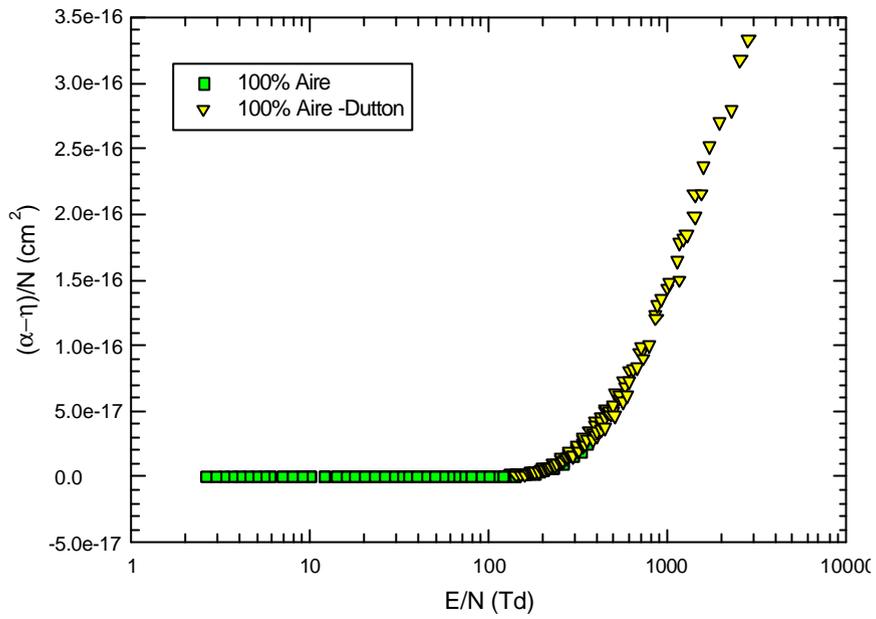


Figura 5.15 Coeficiente de ionización para el aire 100 % puro [39].

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSIONES

- La Cámara de Descargas Tipo Townsend que se construyó en éste trabajo permite trabajar con gases a presiones mayores a 1 atmósfera, y las mediciones preliminares que se han realizado, muestran que trabaja de forma eficiente.
- En el proceso de construcción de la Cámara de Descargas Tipo Townsend se logró la integración de sistemas y partes con diferentes normas de ensamble por medio del diseño y construcción de adaptadores y partes mecánicas.
- El sistema de adquisición de datos basado en el lenguaje de programación Visual Basic® resultó muy útil y conveniente para el funcionamiento eficiente del sistema. El programa controla la fuente de alto voltaje, captura la presión, la temperatura, y los transitorios electrónicos. Siendo de gran utilidad las interfases serie RS-232 y GPIB, así como la tarjeta de adquisición de datos.
- De las mediciones en  $SF_6$  puro se comprobó que el sistema esta calibrado, ya que los resultados obtenidos concuerdan con los de Aschwanden [22] que son ampliamente reconocidos.
- De las mezclas de  $SF_6 - CO_2$ ,  $SF_6 - Aire$  y  $SF_6 - N_2$  se obtuvo la velocidad de deriva electrónica y el coeficiente de ionización efectiva, de estos datos se puede concluir que el SF6 puro es mejor que las tres mezclas, La mezcla con Aire no presenta carácter electronegativo, por lo que es la menos indicada para su uso como extinguidor de descargas. Las otras dos mezclas muestran cierta electronegatividad por lo que son más aptas para su uso en la industria eléctrica, siendo la mezcla con  $N_2$  la más adecuada ya que para la mezcla de 10% de  $N_2$  se obtiene un valor de  $E/N_{crit}$  similar al del  $SF_6$  puro, esto permite reducir en un 10% el uso de  $SF_6$  sin sacrificar sus propiedades.

## APORTACIONES

- Diseño y construcción de una cámara de descargas tipo Townsend, diseñada para volúmenes pequeños de gas (5 lts.) y altas presiones. Que servirá para realización de trabajos enfocados al estudio de las propiedades de transporte y de reacción de mezclas que puedan ayudar a disminuir el uso de  $\text{SF}_6$  en los sistemas de alto voltaje, y con ello disminuir o evitar deterioros ambientales, en particular el calentamiento global de nuestra atmósfera.
- Desarrollo de un sistema de adquisición de datos y de control, el cual puede ser adaptado para diferentes experimentos relacionados con el área de descargas eléctricas, por ejemplo: Descargas tipo Corona, de resplandor y medición de voltajes de ruptura en gases puros y mezclas diversas.
- Se sentaron las bases de un laboratorio que se dedica a estudiar las propiedades físicas y químicas de los plasmas de baja temperatura, los cuales están presentes en una gran variedad de descargas eléctricas.
- Con la infraestructura desarrollada se logrará incorporar nuevos estudiantes al estudio de los plasmas de baja temperatura, por lo que se contribuirá al desarrollo de recursos humanos orientados a la parte experimental de ésta área.

## SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Se hacen las siguientes recomendaciones para continuar el trabajo o mejorar algunos de los resultados obtenidos:

- Se propone iniciar el estudio de mezclas en alta presión para obtener un nuevo grupo de datos que sea de utilidad en el diseño de interruptores de arco y así como de otras técnicas que utilicen el SF<sub>6</sub> a alta presión.
- En la CDT la distancia en el capacitor es fija por lo que se necesita desarrollar un dispositivo para variar dicha distancia. Se sugiere un mecanismo controlado por un motor a pasos.
- Se propone el desarrollo de aditamentos para realizar las siguientes mediciones:
  - Voltaje de ruptura en gases
  - Descarga tipo Corona en la producción de Ozono para esterilización de agua.
  - Descargas de resplandor

Todos los trabajos que se plantean están orientados al estudio de propiedades básicas de los plasmas de baja temperatura. Los conocimientos generados en el desarrollo de éstos, pueden ser aplicados en problemas de ingeniería vinculados con la mejora del medio ambiente.

**REFERENCIAS**

- [1] Christophorou L G and Olthoff J K, *NIST Technical Note 1425* (1999).
- [2] Castonguay J. and Gauthier J-M, "Study of the decomposition of traces of SF<sub>6</sub> in the lower atmosphere: the kinetic results", in *Gaseous Dielectrics IX*, L. G. Christophorou and J.K. Olthoff, Ed., Plenum-Kluwer, pp.413-418, (2001).
- [3] Christophorou L G, Olthoff J K and Green D S, in "*Gaseous Dielectrics VIII*", L G Christophorou and J K Olthoff, Eds., Plenum Press, NY, pp. 361-7, (1998).
- [4] Koch, H, and A. Schuette. Gas Insulated Transmission Lines for High Power Transmission Over Long Distances. *Electric Power Systems Research*; 44 (1):69. January 1, (1998). Cookson A H, "Gas-Insulated Cables," *IEEE Trans. Electr. Insul.* Vol. EI-20, pp. 859–890, (1985).
- [5] Christophorou L G and Van Brunt R J, *IEEE Trans. Dielectrics and Electr. Insulation* 2 952, (1995).
- [6] Vial L, Casanovas A-M, Coll I, and Casanovas J, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32 1681, (1999).
- [7] Rao M V S and Olthoff J K, in "*Gaseous Dielectrics VIII*", L G Christophorou and J K Olthoff, Eds., Plenum Press, NY, pp. 31-38, (1998).
- [8] de Urquijo J, Alvarez I, Cisneros C and Martínez H, in "*Nonequilibrium effects in ion and electron transport*", J. W. Gallagher et al, Eds. Plenum Press: New York, pp. 211, (1990).
- [9] Siddagangappa M C and Van Brunt R J, *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Gas Discharges and Their Appl.*, Leeds Univ. Press:UK, pp.247-50, (1985).
- [10] Frees L C, Sauers I, Ellis H W and Christophorou LG, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 14 1629, (1981).
- [11] Basurto E., "Propiedades de transporte y de reacción de iones en gases puros y en mezclas de interés atmosférico e industrial", tesis de doctorado, ESFM-IPN, (2000).

- [12] Lanvegin, *Ann Chim.Phys.*, 5, 245 (1905).
- [13] Tyndall A M, "The mobility of positive ions in gases", Cambridge University Press, Cambridge (1938).
- [14] Biondi and Chanin [14] *Phys. Rev.* 94, 910(1954).
- [15] Monsley, Snuggs, Martin, and McDaniel *Phys. Rev.* 178,234(1969).
- [16] de Urquijo-Carmona J, Álvarez I, Cisneros, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 18 29-40, (1984).
- [17] Th Aschwanden, "Gaseous dielectrics IV", New York: Pergamon, (1984).
- [18] Th Aschwanden, Ph. D. thesis, ETH Zurich, 1985.
- [19] James, DR, et al Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE) (1993).
- [20] Xiao D M, Zhu L and Chen Y, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32 L18-L19 (1998).
- [21] de Urquijo J, Alvarez I, Cisneros C and Martinez H, *J. Phys. E: Appl. Phys.* 60 4, (1999).
- [22] U.S. EPA "Catalog of guidelines and Standards for the handling and Management of Sulphur Hexafluoride  $SF_6$  (2002).
- [23] Xiao D M, Zhu L and Li X G, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 L145-L147 (2000).
- [24] Urquijo J and Basurto E, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 1352-1354, (2001).
- [25] Xiao D M, Li X G and Xu X, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 34 L133-135 (2001).
- [26] Urquijo J and Basurto E, *Phys Rev E.64* 026412 (2001).
- [27] Urquijo J and Basurto E, *J. Phys. Appl. Phys.* 91 1, (2001).
- [28] Pinheiro M J and Loureiro J, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35 1-8, (2002).
- [29] Hernández-Avila J L, Urquijo J and Basurto E, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35 2264-2269, (2002).
- [30] Urquijo J, Hernández-Ávila J L, and Basurto E, and Ramírez F, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 36 1489-1494, (2003).
- [31] Essam Nasser, "Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics", Willey-Interscience, (1994).
- [32] Moring V. Faires, Clifford S Max,"Thermodynamics", Macmillan (1994).

- [33] Earl W. McDaniel and Edward A. Mason, "The mobility and diffusion of ions in gases", John Wiley and Sons, USA, (1973).
- [34] Miller T M, Martin D W, and MCDaniel E W, *Phys.Rev.*171, 94(1968).
- [35] "Sales of Sulfur Hexafluoride (SF<sub>6</sub>) by End-Use Applications," Science & Policy Services, Inc., The West Tower, Suite 400, 1333 H Street NW, Washington, D.C. 20005, (1997).
- [36] Savant C J, Roden M S, Carpenter G L, "Electronic Design Circuit and Systems Prentice Hall" The Benjamin/ Cummings Publishing, Inc U.S.A (1991).
- [37] de Urquijo-Carmona J, Alvarez I, and Cisneros C, "Transient analysis of the drift and longitudinal difusión of ions in a uniform-Field discharge gap" *J. Phys. D: Appl.Phys*, 18 29-40 (1985).
- [38] En colaboración con el Dr. José Luis Hernández Ávila Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, 02200, México D.F., México
- [39] Dutton J. A "Survey of Electron Swarm Data" *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 4, No 3 (1995).

## Listado del programa de adquisición de datos en Visual Basic ®

```

Const TDS3012B = 2 ' direccion GPIB del osciloscopio
Const GPIB0 = 0 ' direccion de la tarjeta GPIB en la PC
Const Fluke45 = 1 ' direccion GPIB Fluke45
Dim indice_barrido As Integer
Dim Y(10100) As Long
Dim t(10100) As Integer
Dim gpibactiva As Integer
Dim Fluke45activo As Integer

```

```
Private Sub envia_voltaje_fuente(voltaje As Double)
```

```

Dim dato As Integer
Dim datobajo As Byte
Dim datoalto As Byte

```

```

'conversion de voltaje a dato usando la calibración
' dato=0.41889*V-2.8052
dato = (0.41889 * voltaje - 2.8052)
If dato > 4095 Then
dato = 4095
End If
If dato < 0 Then
dato = 0
End If
datobajo = dato And &HFF
datoalto = dato \ 2 ^ 8
Out &H304, datobajo
Out &H305, datoalto

```

```
End Sub
```

```

Private Sub parametros_de_disparo()
Dim p As Double
Dim t As Double
Dim EN As Double
Dim V_fuente As Double

```

```

RTB_temperatura.Text = Round(Tprom(), 2)
RTB_presion.Text = Round(presion_baratron, 2)

```

```

'Para el voltaje de la fuente de alta tension segun la expresion
t = Val(RTB_temperatura.Text)
p = Val(RTB_presion.Text)
EN = Val(RTB_EN.Text)
d = Val(RTB_d.Text)
V_fuente = EN * (96 * p * d) / (t + 273.15)
RTB_VF.Text = Round(V_fuente, 2)
envia_voltaje_fuente (V_fuente)
End Sub

```

```

Private Function presion_baratron()
Dim lectura As Single

```

```

If Fluke45activo = 1 Then
lectura = Val(PreguntaGPIB$(Fluke45, "MEAS?"))
presion_baratron = lectura * 100#
Else
    Call iniciaFluke45
End If
End Function
Private Function temperatura(canal As Byte)
Dim dato As Integer
Dim datobajo As Byte
Dim datoalto As Byte
Dim rango As Byte
Dim voltaje As Single
Dim ganancia As Integer

' escoger el canal de la lectura

Out &H30A, canal

' escoger el rango 8 ver pag 28 del manual
' rango de +- 0.625 V
'rango  ganancia  voltaje (V)
' 0      1  +- 5
' 1      2  +- 2.5
' 2      4  +- 1.25
' 3      8  +-0.625
' 4      16 +-0.3125
' *Nota la tarjeta esta configurada para entrada de +-10V
' y la tabla superior es para una configuracion
' de +-5V

rango = 0
ganancia = 1

Out &H309, rango
' captura un valor del puerto

voltaje = 0#

'tomamos 100 medidas del voltaje y lo promediamos

For i = 1 To 50
Out &H30C, 1
'espera hasta que termine la conversion
Do
datoalto = Inp(&H305)
datobajo = Inp(&H304)
DoEvents
Loop Until (datoalto \ 16 = 0)
datoalto = &HF And Inp(&H305)
datobajo = Inp(&H304)
dato = datoalto * 2 ^ 8 + datobajo
voltaje = voltaje + (-10# + 20# / 4095# * dato) / ganancia

```

DoEvents  
Next i

```
'dividimos entre el numero de puntos
voltaje = voltaje / 50#
temperatura = voltaje * 100#
If canal = 0 Then
temperatura = (temperatura * 1.01005 + 0.21131)
End If
If canal = 1 Then
temperatura = (temperatura * 1.00417 + 0.97801)
End If
If canal = 2 Then
temperatura = (temperatura * 0.98675 + 3.16133)
End If
If canal = 3 Then
temperatura = (temperatura * 0.97835 + 2.0038)
End If
End Function
```

```
Private Function Tprom()
Tprom = (temperatura(0) + temperatura(1) + temperatura(2) + temperatura(3)) / 4#
End Function
```

```
Private Sub IniciaTarjetaGPIB()
```

```
' =====
'
' SECCION DE INICIALIZACION
'
' =====
```

```
Call SendIFC(GPIB0)
If (ibsta And EERR) Then
    GpibErr ("Error Inicializando La Tarjeta GPIB.")
End If
```

```
gpibactiva = 1 ' 1 indica que la tarjeta esta activa
End Sub
```

```
Private Sub TerminaTarjetaGPIB()
```

```
    ilonl GPIB0, 0
    If (ibsta And EERR) Then
        GpibErr ("Error desactivando la tarjeta GPIB.")
    End If
    gpibactiva = 0
End Sub
```

```
Private Sub EscribeComandoGPIB(DireccionGPIB%, comando$)
```

```
    Call Send(GPIB0, DireccionGPIB%, comando$, DABend)
    If (ibsta And EERR) Then
        GpibErr ("Error enviando el comando " + Text1.Text)
```

```

End If

End Sub

Private Function PreguntaGPIB$(DireccionGPIB%, comando$)

Call EscribeComandoGPIB(DireccionGPIB%, comando$)
' ASI SE LEE EL RESULTADO DE UN PREGUNTA DE UN INSTRUMENTO GPIB

    reading$ = Space$(20100)
    'Call Receive(GPIB0, DireccionGPIB%, Reading$, STOPend)
    Call Receive(GPIB0, DireccionGPIB%, reading$, STOPend)
    If (ibsta And EERR) Then
        GpibErr ("Error esperando la respuesta. ")
    End If

PreguntaGPIB$ = reading$
End Function

Private Sub CapturaCurva()

' ancho de datos en bits
Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:WIDth 1")
'coloca el osciloscopio en modo binario
Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:ENCdg RPBinary")
'CAPTURE LA CURVA
cadena$ = PreguntaGPIB$(TDS3012B, "CURVE?")
'coloca el osciloscopio en modo ASCii
Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:ENCdg ASCII")
' linea de prueba temporal
'RichTextBox1.Text = cadena$
DatoInicial = 1
DatoFinal = 10000
For i = DatoInicial To DatoFinal
Y(i) = Asc(Mid$(cadena$, i, 1))
Next i

Call traza_curva
End Sub

Private Function Addlbcnt() As String
    Addlbcnt = Chr$(13) + Chr$(10) + "ibcnt = 0x" + Hex$(ibcnt)
End Function

Private Function Addlberr() As String

    If (ibsta And EERR) Then
        If (iberr = EDVR) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EDVR <DOS Error>"
        If (iberr = ECIC) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ECIC <Not CIC>"
        If (iberr = ENOL) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ENOL <No Listener>"
        If (iberr = EADR) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EADR <Address Error>"
        If (iberr = EARG) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EARG <Invalid
argument>"
    End If
End Function

```

```

If (iberr = ESAC) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ESAC <Not Sys Ctrlr>"
If (iberr = EABO) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EABO <Op. aborted>"
If (iberr = ENEB) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ENEB <No GPIB board>"
If (iberr = EOIP) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EOIP <Async I/O in prg>"
If (iberr = ECAP) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ECAP <No capability>"
If (iberr = EFSO) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EFSO <File sys. error>"
If (iberr = EBUS) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = EBUS <Command
error>"
If (iberr = ESTB) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ESTB <Status byte lost>"
If (iberr = ESRQ) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ESRQ <SRQ stuck
high>"
If (iberr = ETAB) Then Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "iberr = ETAB <Table overflow>"
Else
Addlberr = Chr$(13) + Chr$(10) + "No error, iberr = " + Str$(iberr)
End If
End Function

```

Private Function Addlbsta() As String

```

sta$ = Chr$(13) + Chr$(10) + "ibsta = &H" + Hex$(ibsta) + " <"
If (ibsta And EERR) Then sta$ = sta$ + " ERR"
If (ibsta And TIMO) Then sta$ = sta$ + " TIMO"
If (ibsta And EEND) Then sta$ = sta$ + " END"
If (ibsta And SRQI) Then sta$ = sta$ + " SRQI"
If (ibsta And RQS) Then sta$ = sta$ + " RQS"
If (ibsta And CMPL) Then sta$ = sta$ + " CMPL"
If (ibsta And LOK) Then sta$ = sta$ + " LOK"
If (ibsta And RREM) Then sta$ = sta$ + " REM"
If (ibsta And CIC) Then sta$ = sta$ + " CIC"
If (ibsta And AATN) Then sta$ = sta$ + " ATN"
If (ibsta And TACS) Then sta$ = sta$ + " TACS"
If (ibsta And LACS) Then sta$ = sta$ + " LACS"
If (ibsta And DTAS) Then sta$ = sta$ + " DTAS"
If (ibsta And DCAS) Then sta$ = sta$ + " DCAS"
sta$ = sta$ + ">"
Addlbsta = sta$
End Function

```

Private Sub GpibErr(msg\$)

```

msg$ = msg$ + Addlbsta() + Addlberr() + Addlbcnt() + Chr(13) + Chr(13) + "I'm quitting!"
MsgBox msg$, vbOKOnly + vbExclamation, "Error"

```

' Take the board offline.

```

ilOnI GPIB0, 0

```

End

End Sub

Private Sub Command1\_Click()

```

Call parametros_de_disparo

```

End Sub

Private Sub command2\_click()

RichTextBox1.Text = PreguntaGPIB\$(TDS3012B, Text1.Text)

End Sub

Private Sub CommandEscribeParametros\_Click()

' preguntamos el formato de transferencia, binario o ascii

Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:ENCDG " + RichTextBox2Formato.Text)

' preguntamos de que canal se obtendran los datos

Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:SOURCE " + RichTextBox2Canal.Text)

' preguntamos el numero de puntos en X

Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "HORIZONTAL:RECORDLENGTH " + RichTextBox2NUMX.Text)

' preguntamos donde empieza la Curva

Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:START " + RichTextBox2empcurva.Text)

' preguntamos donde termina la Curva

Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, "DATA:STOP " + RichTextBox2altocurva.Text)

RichTextBox2altocurva.Text = Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "DATA:STOP?"))

' Preguntamos por el Coupling

RichTextBox2coupling.Text = PreguntaGPIB(TDS3012B, "CH1:COUPLING?")

End Sub

Private Sub CommandGrafica\_Click()

Call CapturaCurva

End Sub

Private Sub CommandParametros\_Click()

' preguntamos el formato de transferencia, binario o ascii

RichTextBox2Formato.Text = PreguntaGPIB(TDS3012B, "DATA:ENCDG?")

' preguntamos de que canal se obtendran los datos

RichTextBox2Canal.Text = PreguntaGPIB(TDS3012B, "DATA:SOURCE?")

' preguntamos Volts/div

RichTextBox2VoltDiv.Text = 25 \* Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "WFMPRE:YMULT?"))

' preguntamos la escala de tiempo s/Div

RichTextBox2sDiv.Text = Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "HORIZONTAL:MAIN:SECDIV?"))

' preguntamos el numero de puntos en X

RichTextBox2NUMX.Text = Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "HORIZONTAL:RECORDLENGTH?"))

' preguntamos el numero de bytes

RichTextBox2anchodato.Text = Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "DATA:WIDTH?"))

' preguntamos donde empieza la Curva

RichTextBox2empcurva.Text = Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "DATA:START?"))

' preguntamos donde termina la Curva

RichTextBox2altocurva.Text = Val(PreguntaGPIB(TDS3012B, "DATA:STOP?"))

' Preguntamos por el Coupling

RichTextBox2coupling.Text = PreguntaGPIB(TDS3012B, "CH1:COUPLING?")

End Sub

Private Sub CommandStop\_Click()

Call TerminaTarjetaGPIB

End

Unload (Form1)

End Sub

```
Private Sub Form_Load()
'activa los valores de s/div
VScroll_barrido.Value = 18
'activa los valores de V/div
VScroll1_volt.Value = 4
gpibactiva = 0
Fluke45activo = 0
Call IniciaTarjetaGPIB
Call iniciaFluke45
```

End Sub

```
Private Sub iniciaFluke45()
If gpibactiva = 0 Then
    Call IniciaTarjetaGPIB
End If
If Fluke45activo = 0 Then
    Call EscribeComandoGPIB(Fluke45, "*RST")
    Call EscribeComandoGPIB(Fluke45, "VDC")
    Call EscribeComandoGPIB(Fluke45, "RANGE 3")
    Call EscribeComandoGPIB(Fluke45, "RATE S")
    Call EscribeComandoGPIB(Fluke45, "FORMAT 1")
    Fluke45activo = 1
End If
End Sub
```

```
Private Sub traza_curva()
Dim dato_xmin, dato_ymax, dato_xmax, dato_ymin As Integer
Dim deltax, deltay As Integer
Dim i, j, K As Integer
```

```
dato_xmin = -500
dato_ymax = 268
dato_xmax = 10500
dato_ymin = -13
```

```
'borra la pantalla
DSO.Cls
```

```
' escala la pantalla con los puntos superior izquierdo y el inferior derecho
DSO.Scale (dato_xmin, dato_ymax)-(dato_xmax, dato_ymin)
```

```
'traza la cuadrícula del osciloscopio
DSO.ForeColor = RGB(200, 200, 0) ' color de los ejes
DSO.DrawWidth = 11
```

```
For j = 0 To 256 Step 25.6
    If j = 128 Then
        DSO.DrawWidth = 3
    Else
        DSO.DrawWidth = 1
```

```
End If

DSO.Line (0, j)-(10000, j)
Next j

For j = 0 To 10000 Step 1000
  If j = 5000 Then
    DSO.DrawWidth = 3
  Else
    DSO.DrawWidth = 1
  End If
  DSO.Line (j, 0)-(j, 256)

Next j

DSO.DrawWidth = 1.5
DSO.ForeColor = RGB(0, 255, 0) ' color de los puntos

'traza los datos
For i = 10 To 10000 - 10
  DSO.Line (i - 1, Y(i - 1))-(i, Y(i))
Next i

'DSO.DrawWidth = 2
'DSO.ForeColor = RGB(0, 255, 0) ' color de los puntos
End Sub

Private Function tiempo_barrido(indice As Integer)
Dim valores(29) As Single
'se tienen 29 valores del barrido
If indice < 1 Then indice = 1
If indice > 29 Then indice = 29
valores(1) = 10
valores(2) = 4
valores(3) = 2
valores(4) = 1
valores(5) = 0.4
valores(6) = 0.2
valores(7) = 0.1
valores(8) = 0.04
valores(9) = 0.02
valores(10) = 0.01
valores(11) = 0.004
valores(12) = 0.002
valores(13) = 0.001
valores(14) = 0.0004
valores(15) = 0.0002
valores(16) = 0.0001
valores(17) = 0.00004
valores(18) = 0.00002
valores(19) = 0.00001
valores(20) = 0.000004
valores(21) = 0.000002
valores(22) = 0.000001
```

```
valores(23) = 0.0000004
valores(24) = 0.0000002
valores(25) = 0.0000001
valores(26) = 0.00000004
valores(27) = 0.00000002
valores(28) = 0.00000001
valores(29) = 0.000000004
tiempo_barrido = valores(indice)
End Function
```

```
Private Sub Text1_Change()
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Timer1_Timer()
```

```
' Usar COM1.
MSComm1.CommPort = 1
' 9600 baudios, sin paridad, 8 bits de datos y 1
' bit de parada.
MSComm1.Settings = "2400,N,8,1"
' Indicar al control que lea todo el búfer al usar
' Input.
MSComm1.InputLen = 0
' Abrir el puerto.
MSComm1.PortOpen = True
' Enviar al módem el comando de atención.
MSComm1.Output = "=RV" & Chr$(13) ' Asegúrese de que
' el módem responde con "OK".
' Esperar a que vuelvan los datos al puerto serie.
comandos = 0
buffer$ = ""
Do
    DoEvents
    caracter$ = MSComm1.Input
    If (comandos = 1) And (caracter$ <> vbCr) Then
        buffer$ = buffer$ & caracter$
    End If
    If caracter$ = vbCr Then
        comandos = comandos + 1
    End If
Loop Until comandos = 2
' Leer los datos de respuesta de aceptación en el
' puerto serie.
' Cerrar el puerto serie.
MSComm1.PortOpen = False
base$ = Mid$(buffer$, 4, 3)
exponente$ = Mid$(buffer$, 7, 3)
TextVacio.Text = base$ + "E" + exponente$
```

```
End Sub
```

```
Private Sub VScroll_barrido_Change()
```

```
Dim tiempo As Single
```

Dim prefijo As String  
 Dim comando As String

```
If (VScroll_barrido.Value >= 1) And (VScroll_barrido.Value <= 4) Then
    prefijo = " s"
    tiempo = (tiempo_barrido(VScroll_barrido.Value))
    valor_barrido.Text = Str$(tiempo) + prefijo
End If
```

```
If (VScroll_barrido.Value >= 5) And (VScroll_barrido.Value < 14) Then
    prefijo = "ms"
    tiempo = (tiempo_barrido(VScroll_barrido.Value) * 1000#)
    valor_barrido.Text = Str$(tiempo) + prefijo
End If
```

```
If (VScroll_barrido.Value = 15) Then
    prefijo = " μs"
    tiempo = (tiempo_barrido(VScroll_barrido.Value) * 1000#)
    valor_barrido.Text = prefijo
End If
```

```
If (VScroll_barrido.Value >= 14) And (VScroll_barrido.Value <= 22) Then
    prefijo = " μs"
    tiempo = (tiempo_barrido(VScroll_barrido.Value) * 1000000#)
    valor_barrido.Text = Str$(tiempo) + prefijo
End If
```

```
If (VScroll_barrido.Value >= 23) And (VScroll_barrido.Value <= 29) Then
    prefijo = " ns"
    tiempo = (tiempo_barrido(VScroll_barrido.Value) * 1000000000#)
    valor_barrido.Text = Str$(tiempo) + prefijo
End If
```

' El tiempo de barrido es 10x tiempo/division

comando\$ = "HORizontal:MAIn:SECdiv " + Str\$(tiempo\_barrido(VScroll\_barrido.Value))

```
If gpibactiva <> 1 Then
    Call IniciaTarjetaGPIB
End If
```

Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, comando\$)

```
'Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, comando$)
'EscribeComandoGPIB(DireccionGPIB%, comando$)
'EscribeComandoGPIB(TDS3012B, comando$) = VScroll_barrido.value
```

End Sub

```
Private Function volt_barrido(indice As Integer)
    Dim valores(13) As Single
    'se tienen 13 valores del barrido
```

```
If indice < 1 Then indice = 1
If indice > 13 Then indice = 13
valores(1) = 10
valores(2) = 5
valores(3) = 2
valores(4) = 1
valores(5) = 0.5
valores(6) = 0.2
valores(7) = 0.1
valores(8) = 0.05
valores(9) = 0.02
valores(10) = 0.01
valores(11) = 0.005
valores(12) = 0.002
valores(13) = 0.001
volt_barrido = valores(indice)
End Function
```

```
Private Sub VScroll1_volt_Change()
Dim voltaje As Single
Dim prefijo As String
Dim comando As String
```

```
If (VScroll1_volt.Value >= 1) And (VScroll1_volt.Value <= 4) Then
    prefijo = " V"
    voltaje = (volt_barrido(VScroll1_volt.Value))
    voltaje_barrido.Text = Str$(voltaje) + prefijo
End If
```

```
If (VScroll1_volt.Value >= 5) And (VScroll1_volt.Value <= 13) Then
    prefijo = "mV"
    voltaje = (volt_barrido(VScroll1_volt.Value) * 1000#)
    voltaje_barrido.Text = Str$(voltaje) + prefijo
End If
```

```
comando$ = "CH1:SCALE" + Str$(volt_barrido(VScroll1_volt.Value))
If gpibactiva <> 1 Then
Call IniciaTarjetaGPIB
End If
Call EscribeComandoGPIB(TDS3012B, comando$)
End Sub
```

## Listado del programa para simular los transitorios electrónicos en ANSI C

```

#include<stdio.h>
#include<graphics.h>
#include<math.h>
int ndat,gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
double exp(),ax,ay,bx,by,xmax,ymax,x1,x2,y1,y2;
//transformacion lineal coordenadas (x,y) a escala del monitor
int escalax(double x)
{
    ax=(xmax)/(x2-x1);
    bx=(-x1*xmax)/(x2-x1);
    return((int)(ax*x+bx));
};
int escalay(double y)
{
    ay=(ymax)/(y1-y2);
    by=(-ymax*y2)/(y1-y2);
    return((int)(ay*y+by));
};
double transito(double no,double qe,double ve,double t,double b, double d)
{
    double resultado;
    if (t<0.0)
        {
            resultado=0.0;
        };
    if ((t>0.0) && (t<3E-7))
        {
            resultado=no*qe*ve*exp(ve*b*t)/d;
        };
    if (t>3E-7)
        {
            resultado=0.0;
        };
    return(resultado);
};
main()
{
    FILE *stream;
    float t,ti,tf,xp[10000],yp[10000],no,qe,ve,b,d,P,Temp,y1t,y2t,x1t,x2t,te;
    int i,color;
    float alfae,alfaen,N;

    /* initialize graphics and local
    variables */
    initgraph(&gdriver, &gmode, "");

    // Preguntamos la escala del monitor
    xmax=getmaxx();
    ymax=getmaxy();

    // Generamos una funcion para poderla graficar
    // aqui se podria leer de un archivo
    // ndat es el numero de datos
    ndat=1000;

```

```

color=15;
// Parametros iniciales
ve=1E7;
no=1.0;
qe=1.0;
d=3.0;
Temp=300.0; // en Kelvin
P=1.0; // en torr
te=d/ve;
alfaen=0.001e-16; //(a-n)/N en cm^2 (ver graficas experimentales
// de la ecuacion de gas ideal
// 760 Torr = 1.013e5 Pa

N=(9.65e24*P/Temp)/1.0e6; // N esta en 1/(cm^3)
alfae=alfaen*N; // calculamos (a-n)
// Inicia el calculo de los puntos del transitorio
//Abrimos archivo
stream=fopen("tiempo.fil","w+");
stream=fopen("magnitud.fil","w+");
i=0;
for(t=0-0.2*te;t<=te+0.2*te;t=t+te*1.4/ndat)
{
    xp[i]=t;
    yp[i]=transito(no,qe,ve,t,alfae,d);
    i++;
//Escritura del archivo
fprintf(stream,"%f",xp[i]);
fprintf(stream,"%f",yp[i]);
};

// buscar maximo y minimo de los datos
x1=xp[0];
x2=xp[0];
for(i=0;i<=ndat-1;i++)
{
    if (xp[i]>x2)
        {
            x2=xp[i];
        };
    if (xp[i]<x1) x1=xp[i];
}
y1=yp[0];
y2=yp[0];
for(i=0;i<=ndat-1;i++)
{
    if (yp[i]>y2) y2=yp[i];
    if (yp[i]<y1) y1=yp[i];
}
//Cierra archivo
fclose(stream);
//Acotacion
x1t=x1-0.2*(x2-x1);
x2t=x2+0.2*(x2-x1);

y1t=y1-0.1*(y2-y1);

```

```
y2t=y2+0.1*(y2-y1);

x1=x1t;
x2=x2t;
y1=y1t;
y2=y2t ;

// Graficamos los datos

for(i=0;i<ndat-1;i++)
{
line(escalax(xp[i]),escalay(yp[i]),escalax(xp[i+1]),escalay(yp[i+1]));
//putpixel(escalax(xp[i]),escalay(yp[i]),color);
};
getch();
closegraph();
t=i*((tf-ti)/(ndat-1));
};
```

## Listado del programa para simular los transitorios iónicos en ANSI C ®

```

#include<stdio.h>
#include<graphics.h>
#include<math.h>
int ndat,gdriver = DETECT, gmode, errorcode;
double exp(),ax,ay,bx,by,xmax,ymax,x1,x2,y1,y2;
//transformacion lineal coordenadas (x,y) a escala del monitor
int escalax(double x)
{
    ax=(xmax)/(x2-x1);
    bx=(-x1*xmax)/(x2-x1);
    return((int)(ax*x+bx));
};
int escalay(double y)
{
    ay=(ymax)/(y1-y2);
    by=(-ymax*y2)/(y1-y2);
    return((int)(ay*y+by));
};
double transito(double no,double qo,double vi,double t,double alfae,double d)
{
    double resultado,Ti;
    Ti=d/vi;
    if (t<0.0)
        {
            resultado=0.0;
        };
    if ((t>0.0) && (t<Ti))
        {
            resultado=(qo*no)/(alfae*Ti)*(exp(alfae*d)-exp(alfae*vi*t));
        };
    if (t>Ti)
        {
            resultado=0.0;
        };
    return(resultado);
};
main()
{
    FILE *stream;
    float t,ti,tf,xp[10000],yp[10000],no,qo,vi,b,d,P,Temp,y1t,y2t,x1t,x2t,te;
    int i,color;
    float alfae,alfaen,N;

    /* initialize graphics and local
    variables */
    initgraph(&gdriver, &gmode, "");

    // Preguntamos la escala del monitor
    xmax=getmaxx();
    ymax=getmaxy();

    // Generamos una funcion para poderla graficar
    // aqui se podria leer de un archivo

```

```

// ndat es el numero de datos

ndat=1000;
color=15;
//Abrimos archivo
stream=fopen("iones.dat","w");
// Parametros iniciales
vi=1E4;
no=1.0;
qo=1.0;
d=3.0;
Temp=300.0; // en Kelvin
P=1.0; // en torr
te=d/vi;
alfaen=1.2E-16; //(a-n)/N en cm^2 (ver graficas experimentales
// de la ecuacion de gas ideal
// 760 Torr = 1.013e5 Pa

N=(9.65e24*P/Temp)/1.0e6; // N esta en 1/(cm^3)
alfae=alfaen*N; // calculamos (a-n)
// Inicia el calculo de los puntos del transitorio
i=0;
for(t=0-0.2*te;t<=te+0.2*te;t=t+te*1.4/ndat)
{
xp[i]=t;
yp[i]=transito(no,qo,vi,t,alfae,d);

//Escritura del archivo
fprintf(stream,"%e %fn",xp[i],yp[i]);

i++;
};
//Cierra archivo
fclose(stream);
// buscar maximo y minimo de los datos
x1=xp[0];
x2=xp[0];
for(i=0;i<=ndat-1;i++)
{
    if (xp[i]>x2)
        {
            x2=xp[i];
        };
    if (xp[i]<x1) x1=xp[i];
}
y1=yp[0];
y2=yp[0];
for(i=0;i<=ndat-1;i++)
{
if (yp[i]>y2) y2=yp[i];
if (yp[i]<y1) y1=yp[i];
}
//Acotacion
x1t=x1-0.2*(x2-x1);
x2t=x2+0.2*(x2-x1);

```

```
y1t=y1-0.1*(y2-y1);
y2t=y2+0.1*(y2-y1);

x1=x1t;
x2=x2t;
y1=y1t;
y2=y2t ;

// Graficamos los datos

for(i=0;i<ndat-1;i++)
{
line(escalax(xp[i]),escalay(yp[i]),escalax(xp[i+1]),escalay(yp[i+1]));
//putpixel(escalax(xp[i]),escalay(yp[i]),color);
};
getch();
closegraph();
t=i*((tf-ti)/(ndat-1));
};
```

**Características del sistema de adquisición de datos**

Se muestra en las figuras B-1, B-2, B-3, B-4 el equipo utilizado en la adquisición de datos en el diseño del programa están integrados los comandos principales de medición. El osciloscopio captura la señal del transitorio, establece comunicación con la PC a través de la tarjeta GPIB de la figura B-4.



Modelo	Tektronix TDS3012B
Ancho de banda	100 MHz
Velocidad de muestreo	1.25 GS /s
Canales	2
Puertos	RS232 / GPIB
Voltaje de alimentación	127 VCA

Figura B-1 Osciloscopio TDS3012B

El multímetro Fluke® recibe la lectura del sensor de presión la información es enviada a la PC por la tarjeta GPIB.



Modelo	FLUKE 45
Ancho de banda	1 MHz
Pantalla	5 dígitos
Resolución	1µA VDC 10 µA AC 1 mΩ 100 nA DC 100 nA AC
Precisión	0.02 % V DC
Voltaje/ corriente	0.02 % A DC
Puertos	RS232 / GPIB
Voltaje de alimentación	127 VCA

Figura B-2 Multímetro Fluke 45.

La tarjeta de adquisición de datos recibe la señal en los 4 puntos arbitrarios para la temperatura, así como el control de la fuente de alto voltaje.



Modelo	PCL812PG
Número de canales	16 entradas analógicas/16 digitales
Resolución	12 bits
Convertidor Analógico /Digital	30 kHz
Rango bipolar	$\pm 10V \pm 5V \pm 2.5V$ $\pm 1.25 \pm 0.625V$ $\pm 0.3125$
linealidad	$\pm 1 \text{ bit}$
Alimentación del bus	+5VDC

Figura B-3 Tarjeta de adquisición de datos.

La tarjeta GPIB permite comunicar los instrumentos osciloscopio y multímetro con la PC.



Modelo	PCI – GPIB 778032 – 01
Tasa de transferencia del bus	Standard IEEE 448 handshake 1.5 Mbytes/s HS448 handshake 7.7 Mbytes/s
Conector	IEEE 488 Standard 24 pines
Compatibilidad	Windows Mac OS' Solaris Digital Unix
Alimentación del bus	+5VDC

Figura B-4 Tarjeta GPIB.

Se muestra el láser utilizado en la cámara de descargas pulsada tipo Townsend



Modelo	<i>SpectraPhysics</i>
Longitud de onda	<i>337.1 nm</i>
Ancho del pulso	<i>4 ns</i>
<i>FWHM</i>	
Potencia promedio	<i>3 mW en 20 Hz</i>
Pulso de energía	<i>300 mJ @ 10 Hz</i>
Potencia de consumo	<i>15W a Hz.</i>
Voltaje de alimentación	<i>24 VDC 600mA</i>

Figura B-5 Láser ultra violeta de Nitrógeno.

Se muestra la fuente de alto voltaje marca BERTAN, modelo 602C-100P de 0 a 10 kV. esta posee comunicación en el puerto paralelo, se puede ajustar el voltaje necesario a través del programa principal de adquisición de datos



Modelo	Bertan 602C-100 P
Rango de voltaje	0-20kV
Rango de corriente	0-1 mA
Exactitud del control y monitoreo	0.1%
Regulación de voltaje	0.001%
Coefficiente de temperatura	50 PPM
Protección	Arqueo y corto circuito
Voltaje de alimentación	127 VCA

Figura B-6 Módulo de alto voltaje (HV) y características principales.

### Características del sistema de Alto Vacío.

Se muestra en las figuras C-1, C-2, C-3, C-4, C-5 y C-6 los componentes principales que se utilizaron en la construcción del sistema de alto vacío, para ello se utiliza el sistema de bomba mecánica-bomba turbo molecular. La bomba mecánica de vacío es necesaria para disminuir la presión del orden de 0.01 Torr, esta bomba se conecta a la salida de la bomba turbo molecular, que necesita de estas presiones para operar. Para disminuir más la presión se pone a trabajar la bomba turbo molecular, obteniéndose presiones máximas de  $1e-5$  Torr, que es necesario para mantener la presencia de impureza en las mezclas realizadas. Para medir presiones tan bajas se utiliza el medidor de presión por ionización de filamento caliente, el intervalo de trabajo de este medidor es de  $9.9 \cdot 10^{-4}$  a  $9.9 \cdot 10^{-9}$  Torr, su control registra la presión del sistema de vacío y se envía a la PC por medio de la interfase RS-232.

El medidor de presión de efecto capacitivo Baratron registra la presión en el interior de la cámara en el intervalo de 0 a 1000 Torr con una precisión de 0.25%, este sistema requirió de la construcción de su fuente de alimentación de  $\pm 15 VDC$ , y dando una salida de 0 a 10 V en el intervalo de presión de 0 a 1000 Torr, el voltaje de salida es registrado por el multímetro Fluke®.



Modelo	Alcatel serie Pascal 2010I
Velocidad de bombeo	$11.6 \text{ m}^3/\text{hora}$
Intervalo de trabajo	$1 \text{ atm} - 2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
Presión mínima alcanzable	$2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$
Voltaje de alimentación	127 VCA

Figura C-1 Bomba mecánica de vacío.



Modelo	Alcatel serie ATP 80
Velocidad de bombeo	80 l/s (N <sub>2</sub> )
Intervalo de trabajo	1.33x10 <sup>-1</sup> a 3.8x10 <sup>-9</sup> Torr
Presión mínima alcanzable	3.8x10 <sup>-9</sup> Torr
Velocidad máxima	27000 RPM
Controlador de velocidad	ACT 200T
Temperatura máxima	40 °C
Voltaje de alimentación	127 VCA

Figura C-2 Bomba turbo molecular ATP80 y su controlador ACT200.



Modelo	Alcatel serie Pascal ACT200
Display	alfanumérico
Monitoreo	Prueba de la bomba y parámetros
Entrada de controles	optó acopladas
Puertos	RS232/485
Rango de operación de voltaje	85-264 V

Figura C-3 Controlador de velocidad Bomba turbo molecular.



Modelo	MKS 626
Rango de trabajo	de 1000 Torr
Precisión	0.25 %
Presión máxima	310 kPa
Conector	15 Pines Tipo "D"
Entrada de voltaje	de $\pm 15$ VCD ( $\pm 5\%$ ) 35 mA

Figura C-4 Manómetro de efecto capacitivo Baratron.



Modelo	Bayard Alpert
Rango de presión	de $1 \times 10^{-1}$ Torr y $1 \times 10^{-10}$
tipo de medida de ión	Filamento caliente
Sensibilidad	$0.6 \text{ A } 20 \text{ Torr}^{-1}$ .
Corriente de emisión	$8 \times 10^{-3} \text{ A}$ .
Temperatura de operación	50 °C

Figura C-5 Medidor iónico de filamento caliente.



Modelo		KJL 2200
Rango de presión	de	$1 \times 10^{-3}$ torr a $1.5 \times 10^{-9}$ torr
Tipo de medición iónica		Bayard Alpert
Sensibilidad		$1 \text{ torr}^{-1}$ a $80 \text{ torr}^{-1}$
Corriente de emisión	de	Ajustable de 1.0 mA to 20.0 mA
Tipo de medidores		Filamento caliente
Puerto		RS-232
Voltaje de alimentación	de	127 VCA

Figura C-6 Módulo de control para el medidor iónico.



## Estudio de las propiedades de transporte de iones y electrones en gases que sustituyan al SF<sub>6</sub> en procesos de la industria eléctrica.

José Luis Hernández Ávila<sup>1</sup>, E. Basurto Uribe<sup>1</sup>, Jaime de Urquijo Carmona<sup>2</sup>, Ricardo Octavio Mota Palomino<sup>3</sup>  
Martín Hernández Hernández<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco,

División de Ciencias Básicas e Ingeniería, 02200, México D.F., México

<sup>2</sup> Centro de Ciencias Físicas, UNAM, P.O. Box 48-3, 62251 Cuernavaca, Mor., México

<sup>3</sup> SEPI-ESIME-Zacateco, IPN, 07340, México D.F., México.

**Resumen** - En los últimos años se han desarrollado tecnologías que utilizan plasmas de baja temperatura, en la actualidad el uso de las computadoras a incentivado el empleo de simulaciones de los procesos antes de realizar prototipos experimentales. En estas simulaciones están involucrados una gran cantidad de parámetros, en el gas que se estudia. La aplicación del método Pulsado de Townsend permite determinar en forma experimental tales parámetros. Se presentan los resultados obtenidos por esta metodología, las velocidades electrónicas, coeficientes efectivos de ionización y el campo eléctrico crítico reducido  $(E/N)_{crit}$ . en las mezclas gaseosas binarias con SF<sub>6</sub> mas N<sub>2</sub> o CO<sub>2</sub> para diferentes concentraciones de mezcla. Estos resultados pueden ayudar al estudio del modelado de fenómenos de transporte electrónico en gases aislantes en alta tensión y mezclas a base de SF<sub>6</sub>.

### Introducción

Por sus excepcionales propiedades de aislamiento el hexafluoruro de azufre ha sido ampliamente utilizado en la industria eléctrica (SF<sub>6</sub>), y en algunas etapas del proceso de fabricación de los semiconductores. Sin embargo, a pesar de estas características deseables como aislante, el SF<sub>6</sub> es un potente y peligroso promotor del efecto invernadero. En este sentido el SF<sub>6</sub> posee un potencial de calentamiento global (global warming potential GWP) del orden de 24,000 veces superior al que posee el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) [1]. Por tales razones, las investigaciones actuales se desarrollan en la búsqueda de algún sustituto de este gas o de mezclas de gases binarias combinadas con SF<sub>6</sub>, que cumplan por una parte, con la capacidad y propiedades de aislamiento propias de este gas y por otra lado sean gases compatibles ambientalmente [2, 3] de bajo nivel de GWP.

Entre los candidatos se pueden presentar mezclas de SF<sub>6</sub>

Entre las múltiples propiedades que pueden ser estudiadas en las mezclas binarias, aquellas correspondientes a la descarga eléctrica son de capital importancia.

Este trabajo presenta los resultados experimentales de velocidad electrónica  $v_e$ , coeficientes efectivos de ionización normalizados por densidad  $(\alpha-\eta)/N$  y el campo eléctrico crítico normalizado por densidad  $(E/N)_{crit}$  para mezclas binarias de SF<sub>6</sub> con Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) o Nitrógeno (N<sub>2</sub>). Las concentraciones de SF<sub>6</sub> en las mezclas varían desde 1% hasta 50% en cualquiera de los gases arriba mencionados. El rango de estudio para E/N fue de 50–500 Td (1 Townsend = 10<sup>-17</sup> V cm<sup>2</sup>)

### Detalles técnicos del método pulsado de Townsend empleadas y aparato experimental

Un esquema del montaje experimental utilizado se presenta en la figura 1, su descripción completa y detallada así como la técnicas para determinar  $v_e$  y  $(\alpha-\eta)/N$  puede consultarse en las referencias [5-7]. Esta técnica se basa en el análisis de forma de onda de la corriente de desplazamiento, a través de un par de electrodos planos y paralelos de aluminio (capacitor) embebidos en el gas de estudio dentro la cámara de pruebas.

Un campo eléctrico homogéneo es producido entre los platos por una fuente externa de alta tensión. En todos los casos, las avalanchas electrónicas están por debajo del nivel de ruptura dieléctrica del gas. Los electrones iniciales son producidos por un pulso láser de luz UV (láser N<sub>2</sub>, 337 nm, 1ns FWHM, 1.4 mJ de energía máxima) que golpea el cátodo de aluminio. Algunos de estos fotoelectrones ionizan o son capturados por las moléculas de la mezcla gaseosa, durante su recorrido o deriva hacia el ánodo.

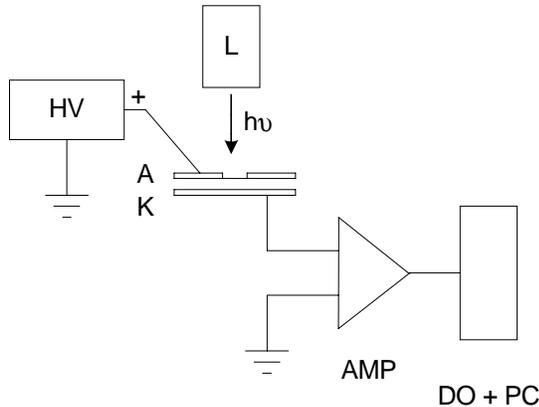
La corriente total debida a los electrones, iones positivos y negativos es medida externamente por un amplificador de trans-resistencia (40 MHz, 10<sup>5</sup> V/A), conectado el cátodo a tierra. Ignorando la difusión, la corriente electrónica durante el régimen transitorio se expresa por [8]

$$i(t) = \frac{n_0 q_0}{T_e} \exp[(\alpha - \eta) v_e t] \quad (1)$$

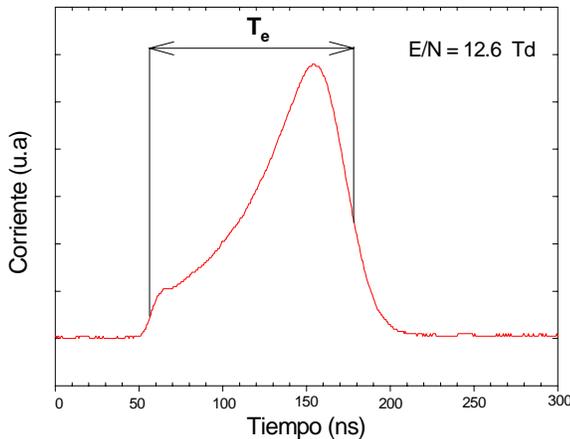
Donde  $n_0$  es el número inicial de fotoelectrones,  $q_0$  es la carga electrónica, y  $T_e = d/v_e$  el tiempo de tránsito electrónico, donde  $d$  es el espacio interelectrodos.  $T_e$  es deducido del intervalo entre los puntos medios del ascenso

y descenso de la forma de onda de la corriente

electrónica (ver figura 2), mientras que  $(\alpha-\eta)$  se obtiene por un proceso de ajuste de la porción exponencial de la parte central ascendente  $(\alpha-\eta)>0$  o descendente  $(\alpha-\eta)<0$  del pulso de corriente electrónica.



**Figura 1.** Diagrama esquemático del aparato del método pulsado de Townsend. HV fuente de alto voltaje, A ánodo, K cátodo, L láser UV, AMP amplificador de trans-resistencia, DO osciloscopio digital, PC computadora personal.



**Figura 2.** Forma de onda típica del transitorio en una mezcla 1-99% SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>. Condiciones de medición E/N = 12.6 Td, p = 130 torr, d = 3 cm. T<sub>e</sub> es el tiempo de tránsito electrónico.

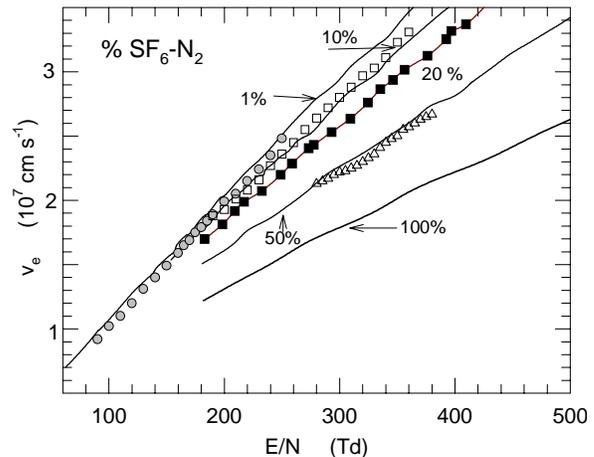
Todos los gases poseen una pureza superior al 99% y fueron inyectados a la cámara de pruebas sin ninguna purificación previa. Las presiones de gas dentro de la cámara fueron desde 1 a 300 torr (1 atm = 760 torr) y las temperaturas variaron entre 290 K y 300 K.

**Resultados**

Los datos son el promedio de varias mediciones (normalmente tres) para un mismo E/N y diferentes presiones. Los errores típicos para v<sub>e</sub> y  $(\alpha-\eta)/N$  en la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> fueron 2% y 6%, respectivamente y para la mezcla SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> fueron v<sub>e</sub> (2%) y  $(\alpha-\eta)/N$  (8%).

**Velocidades electrónicas**

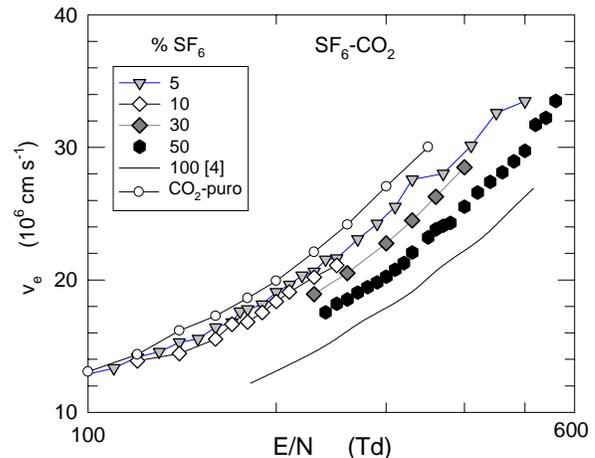
Los resultados de la velocidad electrónica de deriva en función de E/N son mostrados en la figura 3 para la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> y para la mezcla de SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> en la figura 4.



**Figura 3** Resultados de la velocidad electrónica de la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> (símbolos) y una comparación con los resultados previos de Aschwanden (líneas sólidas) [4].

Para la mezcla de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> y para claridad, solo los valores a concentraciones de 1%, 10%, 20% y 50% de SF<sub>6</sub> están mostradas en la figura 3. Para comparación, se han graficado los resultados medidos por Ashwanden [4] en esta mezcla a las mismas proporciones de mezcla. Este autor también empleó la técnica del método pulsado de Townsend. En la misma figura se trazaron los datos de velocidades límite del SF<sub>6</sub> puro determinadas en [4].

Se puede observar un buen acuerdo tanto en tendencia como en magnitud entre los datos medidos en nuestro experimento y los determinados por Aschwanden. Para concentraciones inferiores a 10% de SF<sub>6</sub>, v<sub>e</sub> esta dominada por el N<sub>2</sub>, provocando pequeños reducciones de valor para un E/N constante. A valores superiores a 20% de SF<sub>6</sub>, la pendiente de las curvas disminuye aproximándose a la tendencia que posee el SF<sub>6</sub> puro.



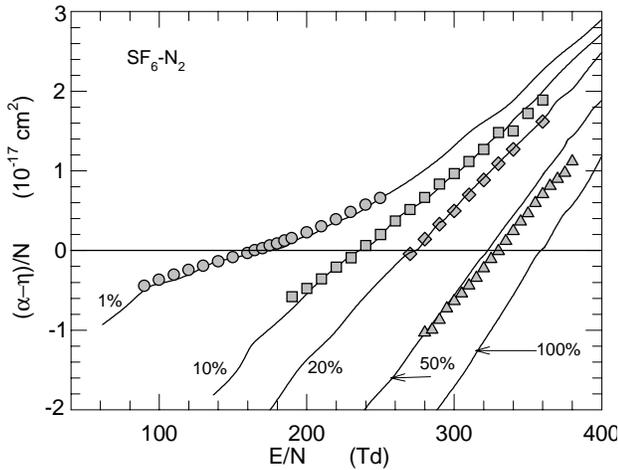
**Figura 4** Resultados de la velocidad electrónica de la mezcla SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> (símbolos). Las líneas son solo indicativas.

En el caso de la mezcla SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> (ver figura 4) y para bajas concentraciones de SF<sub>6</sub> (hasta 10%) no se aprecia grandes variaciones en v<sub>e</sub>. Sin embargo a partir de

concentraciones de 30% de SF<sub>6</sub>, se perciben una atenuación importante en la velocidad debido al carácter electronegativo que posee la mezcla para esas concentraciones de SF<sub>6</sub>, respecto de la cantidad de CO<sub>2</sub>.

**Coefficientes efectivos de ionización**

Los coeficientes efectivos de ionización normalizados en densidad  $(\alpha-\eta)/N$ , se muestran en las figuras 5 y 6 para el SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> y SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>, respectivamente, en función de E/N. Un punto remarcable que muestran estas curvas es el carácter electronegativo de los gases al incrementar la proporción del SF<sub>6</sub> en la mezcla; esto se aprecia claramente por la superposición de curvas para concentraciones diferentes de mezclas.



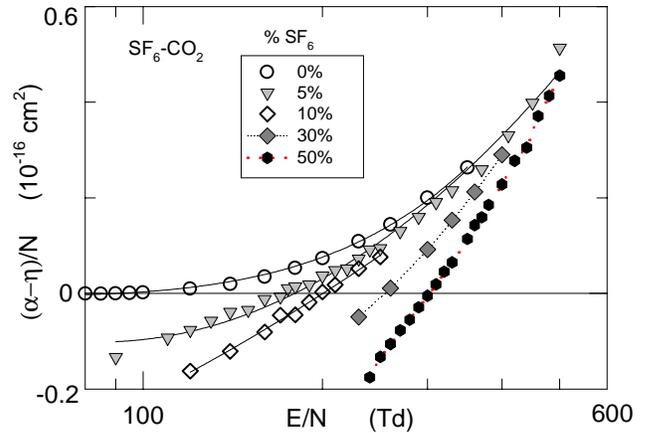
**Figura 5.** Coeficientes efectivos de ionización (símbolos), comparados con los resultados experimentales de Aschwanden (líneas sólidas) para SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> [4].

Para el SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, se puede observar el buen acuerdo en tendencia y magnitud, entre nuestros datos y los de la referencia [4] marcadas por las líneas continuas.

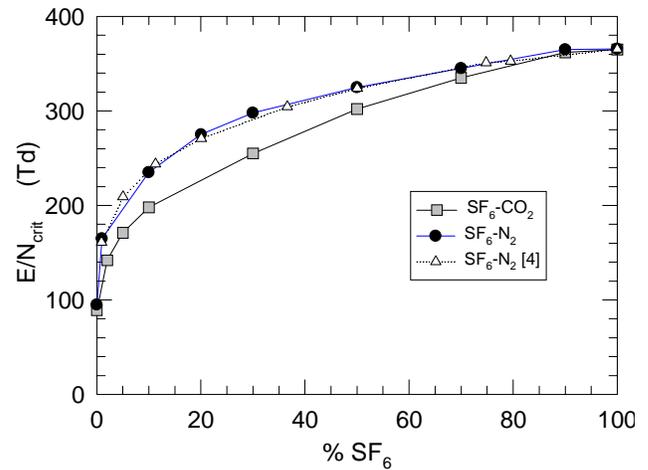
En la figura 6, los valores de  $(\alpha-\eta)/N$  para la mezcla de SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub> exhiben una tendencia que muestra la influencia del CO<sub>2</sub> a bajas concentraciones de SF<sub>6</sub>. Esta dependencia cambia a partir de valores de 50% de SF<sub>6</sub> en la mezcla, pues la curva de  $(\alpha-\eta)/N$  a esta concentraciones se asemeja a la curva del SF<sub>6</sub> puro (ver figura 5). Para un E/N constate los valores de  $(\alpha-\eta)/N$  disminuyen a medida que la concentración aumenta y en consecuencia el coeficiente de captura electrónica ( $\eta$ ) aumenta.

**Valor límite (o crítico) de E/N**

Un parámetro importante, de interés técnico y ampliamente usado en aplicaciones de descargas gaseosas, es el valor límite (o crítico) de E/N; valor al cual el coeficiente efectivo de ionización es cero, esto es, cuando  $\alpha = \eta$



**Figura 6.** Coeficientes efectivos de ionización para SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>. Las líneas son solo indicativas.



**Figura 7.** Variación de valor límite de E/N para las dos mezclas en función de la concentración de SF<sub>6</sub>. Para comparación se presenta los datos experimentales de E/N<sub>crit</sub> determinados por Aschwanden [4].

A partir de los valores de  $(\alpha-\eta)/N$  para las dos mezclas gaseosas, curvas de las figuras 5 y 6, se deducen los valores para E/N<sub>crit</sub> en función del contenido porcentual de SF<sub>6</sub>. La figura 7 muestra la variación de estos E/N<sub>crit</sub> para las dos mezclas gaseosas. Se comparan nuestros datos experimentales con los de la referencia [4] en el caso de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>, donde se aprecia el excelente acuerdo en las concentraciones comunes, exhibiendo la misma tendencia. En todo caso los valores de E/N<sub>crit</sub> para la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> son de 7% a 30% superiores a los de la mezcla de SF<sub>6</sub> CO<sub>2</sub>, sobre un rango de valores de 5% a 30% de contenido de SF<sub>6</sub>

**Conclusión**

Se ha presentado un conjunto de resultados de ionización efectiva y velocidades electrónicas derivadas del análisis de avalanchas electrónicas, bajo condiciones de pre-ruptura. Los resultados muestran que el mejor desempeño como aislante lo tiene el conjunto de datos de la mezcla SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub>.



Los resultados aquí presentados pueden ser de gran utilidad al emplearse para la modelación de procesos de descarga en gases y particularmente con aquellas mezclas que involucren substitutos de SF<sub>6</sub> puro en aplicaciones de alta tensión.

Por nuestra parte, seguiremos analizando diferentes mezclas y concentraciones con otros gases, para determinar los valores de  $(\alpha-\eta)/N$ , así como los valores independientes de  $\alpha/N$  y  $\eta/N$ .

De los dos gases analizados, se demuestra que la mezcla de SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> presenta los valores mas elevados de campo eléctrico crítico, colocando a este conjunto de valores como mejor aislante respecto del conjunto de concentraciones de la mezcla SF<sub>6</sub>-CO<sub>2</sub>.

### Agradecimientos

Este presente trabajo fue financiado por los proyectos UAM-2250216, DGAPA-UNAM-104501 y CONACYT 36645-A. Se agradece a Sr. A. Bustos por la asistencia técnica y a los Sr. N. Estrada y M. Álvarez por la ayuda en los pruebas experimentales.

### References

- [1] J. Castonguay and J-M Gauthier, "Study of the decomposition of traces of SF<sub>6</sub> in the lower atmosphere: the kinetic results", in Gaseous Dielectrics IX, L. G. Christophorou and J.K. Olthoff, Ed., Plenum-Kluwer, pp.413-418, 2001.
- [2] L.G. Christophorou, J.K. Olthoff, *NIST Technical Note* 1425, 1997.
- [3] L.G. Christophorou, R.J. Van Brunt, *IEEE Trans. Dielec. Insul.*, **2**, 952, 1995.
- [4] Th. Aschwanden, PhD. Diss. ETH Zürich, 1985.
- [5] J. L. Hernández-Ávila and J. de Urquijo, "Pulsed Townsend measurement of electron transport and ionization in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures" *J. Phys. D.*, **36**, L51-L54, 2003.
- [6] de Urquijo J, Arriaga C, Alvarez I and Cisneros C., *J. Phys. D* **32**, 41-45, 1999.
- [7] de Urquijo J, Alvarez I, Cisneros C, *Phys. Rev. E* **60**, 4990, 1999.
- [8] H. Raether, "Electron Avalanches and Breakdown in Gases", Butterworths:London, 1964.

### RESÚMENES BIOGRÁFICOS

**José Luis Hernández Ávila** (México D.F., 1965). En 1990 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. En 1992 el Diplôme d'Études Approfondies del Institut National Polytechnique de Grenoble, Francia. En 1996 obtiene el grado de Doctor en Física de la Université Joseph Fourier - Grenoble I, Francia. A finales del 1996 se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana

Azcapotzalco, donde actualmente es Profesor-Investigador, Titular "C" de tiempo completo. Sus principales áreas de interés en investigación son: física de descargas eléctricas en gases, líquidos y aplicaciones, física de plasma. El Dr. Hernández es miembro de la IEEE desde 1998.

**Eduardo Basurto Uribe** (México D.F., 1968). En 1992 obtuvo el grado de Lic. en Física y Matemáticas en la ESFM-IPN. En 1996 obtuvo el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Física en la ESFM-IPN. En 2000 obtuvo el grado Doctorado en Ciencias con especialidad en Física de la Escuela Superior de Física y Matemáticas, IPN. El mismo año se incorporó a la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, donde actualmente es Profesor-Investigador, Titular "C" de tiempo completo e Investigador Nacional nivel I.

**Jaime de Urquijo Carmona** (México D.F., 19XX).

En 1972 obtuvo el grado de Ingeniero de Comunicaciones y Electrónica por la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, IPN. En 1981 obtuvo el grado de Doctor of Philosophy por la University of Manchester, Inglaterra. En el Año de 1982 se integró al Instituto de Física de la UNAM, y desde 1998 se incorporó al Centro de Ciencias Físicas-UNAM donde actualmente es Investigador titular "C" de tiempo completo e Investigador Nacional nivel II.

**Ricardo Octavio Mota Palomino** (México D.F., 19XX). Profesor Titular (TC). Ingeniero Electricista de la ESIME-IPN (1976). Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica en la Sección de Graduados e Investigación de la ESIME-IPN (1980) y Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Waterloo (1985). Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Áreas de interés actual Análisis y protección de sistemas eléctricos de potencia. Operación y planificación de sistemas eléctricos hidrotérmicos.

**Martín Hernández Hernández** (México D.F., 1968). En 2001 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista de la Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Se encuentra realizando sus estudios de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica en la SEPI-ESIME-Z, IPN.