



Degradación de Gases Tóxicos Provenientes de Motores de Combustión Interna Mediante Tecnología de Plasma Frío

Maestría en Ciencias Ambientales



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DEGRADACIÓN DE GASES TÓXICOS PROVENIENTES DE
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE TECNOLOGÍA
DE PLASMA FRÍO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

MAESTRO
EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA EL
INGENIERO EN ELECTRÓNICA:

GERARDO JIMÉNEZ AVILES

DIRIGIDA POR:

DR. ARTURO COLÍN CRUZ

DR. RICARDO VALDIVIA BARRIENTOS



TOLUCA DE LERDO, ESTADO DE MÉXICO. JULIO, 2015.



UAEM | Universidad Autónoma
del Estado de México

3° (EV. DE GRADO)
OFICIO NO 238/2015

Toluca, México, 16 de junio de 2015

MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES
GERARDO JIMÉNEZ AVILES
FACULTAD DE QUIMICA
P R E S E N T E

La que suscribe Directora de la Facultad de Química, dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México, comunica a Usted que el Jurado de su Evaluación de Grado estará formado por:

Dr. Arturo Colín Cruz
PRESIDENTE

Dra. Patricia Balderas Hernández
SECRETARIO

Dr. Cheikh Fall
PRIMER VOCAL

Dr. Ricardo Valdivia Barrientos
SEGUNDO VOCAL

Dr. Eduardo Rodríguez Ángeles
TERCER VOCAL

Dr. Mario Ibáñez Olvera
SUPLENTE

Dr. Jorge Javier Ramírez García
SUPLENTE

FIRMA

(Handwritten signatures of the jury members)

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2015, Año del Bicentenario Luctuoso de José María Morelos y Pavón"

(Handwritten signature of Guadalupe Ofelia Santamaría González)
M. en A.P. GUADALUPE OFELIA SANTAMARIA GONZALEZ
DIRECTORA



c.c.p.Archivo

www.uaemex.mx



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

CARTA DE DERECHOS

En la ciudad de Toluca de Lerdo, Estado de México, el día 14 de julio del año 2015, el que suscribe I. en E. Gerardo Jiménez Aviles (becario CONACyT, CVU/Becario: 412287/258202), alumno del Programa de Maestría en Ciencias Ambientales, adscrito a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México con número de cuenta 0520415, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de tesis elaborado bajo la dirección del Dr. Arturo Colín Cruz y del Dr. Ricardo Valdivia Barrientos, mismo que fue registrado como MACIAS-1312 ante la Secretaría de Investigación y Estudios Avanzados de esta Universidad.

El proyecto se circunscribe en un esquema basado en Investigación en el área de acentuación de Calidad Ambiental con Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento de Prevención, Control y Efectos de la Contaminación Ambiental. El desarrollo experimental se realizó en el Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas, Departamento de Estudios del Ambiente/Gerencia de Ciencias Ambientales, del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (Centro de Costos: AM-109) y el Laboratorio 14 de Ciencias Ambientales de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México.

El documento ha sido optimizado para su versión electrónica en formato *.pdf, por lo que algunas de las características podrían no estar disponibles en la versión impresa. Se requiere de conexión a internet para redirigir a ciertos enlaces de la red.

Los usuarios de la información aquí contenida no deben de reproducir el contenido sin la debida referencia a este documento.

Los nombres de software y de marcas de productos se han empleado como referencia del desarrollo experimental y no se busca promover su venta.

Una firma manuscrita en tinta negra sobre una línea horizontal.

Gerardo Jiménez Aviles

Dedicado

a mi mamá, a mi papá

a mi hermana y a mi hermano

Gracias por compartir su vida conmigo

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Aviles-Jiménez, por estar conmigo en todo momento; aunque no siempre fuese físicamente. Este es un logro más de todos nosotros.

A mi tío Ricardo, por haberme enseñado a enfrentar con alegría los obstáculos de la vida.

A mis amigos, ¡gracias!, porque sin personas como Ustedes a mi alrededor habría claudicado hace ya mucho tiempo de este quehacer.

A mis compañeros, por su fraterna calidez al compartir y dar solución a las inquietudes y problemas durante la realización del protocolo de tesis.

A mi comité tutorial, por brindarme la oportunidad de recurrir a su capacidad y experiencia científicas, en un marco de amistad, confianza, afecto y respeto; aspectos fundamentales para la concreción de los objetivos del proyecto de investigación.

A los especialistas de área, por compartir su conocimiento: pilar invaluable de esta tesis.

Al personal del Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas, cuyo compañerismo y apoyo son soporte de este trabajo.

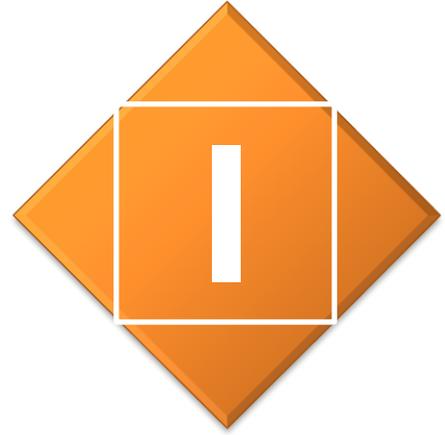
Al equipo *Plasma Froids* del *Laboratoire de Physique des Plasmas* de *École Polytechnique*, por facilitar la estancia de investigación que ha enriquecido mi vida profesional.

Al sínodo evaluador, por la retroalimentación y las críticas constructivas del documento presente.

A mi casa de estudios, “Patria, Ciencia y Trabajo”.

A las Instituciones de mi país, Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología, por brindarme infraestructura, recursos materiales y monetarios para realizar mis Estudios de Maestría.

ÍNDICE



	Pág.		Pág.
ÍNDICE	i	1.4.1 El Motor de Combustión Interna	7
Índice de Figuras	iii	1.4.2 Tecnologías y Estrategias para el	8
Índice de Tablas	v	Control de Emisiones de Fuentes Móviles	
Índice de Ecuaciones	v	a. Diseño	8
Lista de Abreviaturas	vii	b. Pre-combustión	9
		c. Post-combustión	9
		d. Acciones Sociales	11
RESUMEN	ix	1.5 Conclusiones	11
<i>Abstract/Résumé</i>	x	1.6 Literatura Citada	12
INTRODUCCIÓN	xi		
I. Planteamiento del Problema y Justificación	xi	CAPÍTULO 2. PLASMA FRÍO: DESCARGAS DE	15
II. Hipótesis	xii	BARRERA DIELECTRICA	
III. Objetivo General	xii	2.1 Introducción	15
III.I Objetivos Específicos	xii	2.1.1 Historia del Plasma	16
		2.1.2 Tipos de Plasma	16
CAPÍTULO 1. EMISIONES GASEOSAS POR FUENTES	1	2.2 Plasma Frío	18
MÓVILES Y SUS MEDIDAS DE CONTROL		2.3 Descargas de Barrera Dieléctrica	19
1.1 Introducción	1	2.4 Reactor Coaxial de Doble Barrera	20
1.2 Medio Ambiente	2	Dieléctrica	
1.2.1 La Atmósfera	2	2.5 Fuente de Excitación: Inversor <i>Push-Pull</i>	21
1.3 Contaminación Atmosférica	3	2.5.1 Comportamiento del PPI	22
1.3.1 Efectos de los Contaminantes	4	2.5.2 Modos de operación del PPI	24
Atmosféricos		2.5.3 Cálculo de Potencia en las DBD	25
a. Dióxido de Azufre	4	2.6 Aplicaciones Ambientales del NTP	26
b. Óxidos de Carbono	5	2.7 Tratamiento de Gases de Combustión (NO _x	27
c. Óxidos de Nitrógeno	6	y CO _x) con DBD: Estado del Arte	
1.4 Contaminación Atmosférica por Fuentes	7	2.8 Conclusiones	30
Móviles		2.9 Literatura Citada	31



	Pág.		Pág.
CAPÍTULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	35	ANEXOS	xiii
3.1 Introducción	35	Anexo A. Documentación de los Dispositivos	xiii
3.2 Reactor de Barrera Dieléctrica	35	Anexo B. Productos del Proyecto de Investigación	xiv
3.3 Líneas de Gas	36	B.1 Documentación del Artículo Enviado	xiv
3.4 Inversor <i>Push-Pull</i>	38	B.2 Estancia de Investigación en <i>École Polytechnique</i> , Francia	xxviii
3.4.1 Pulsos de Control	39	B.3 Premio Estatal de la Juventud 2013 en Innovación Tecnológica	xxix
3.4.2 Simulación y Elaboración del PPI	40	B.4 Primer Lugar del Reto Académico de <i>National Instruments</i>	xxx
3.5 Instrumentación Virtual	43	B.5 Presentación de la Interfaz <i>KaVi_v. 2.04</i> en <i>Academic Days</i>	xxx
3.5.1 Interfaz Gráfica del Control Principal	43	B.6 Exposición del Protocolo de Investigación en el Congreso de Ciencias Ambientales del ANCA	xxx
3.5.2 Monitoreo de Gases Residuales	45	Anexo C. Videos e Imágenes del Prototipo	xxxii
3.5.3 Versiones de la Interfaz	45	Anexo D. Algoritmo en Mathcad® para el Método de Manley	xxxiv
3.6 Cálculo de Potencia	46		
3.7 Esquema General del Experimento	47	GLOSARIO	xxxvii
3.8 Literatura Citada	49		
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	51		
4.1 Introducción	51		
4.2 Resultados y Discusión	51		
4.2.1 Sistema Eléctrico	51		
4.2.2 Degradación	56		
4.3 Conclusiones Finales	59		
4.4 Observaciones y Recomendaciones	59		



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.		Pág.
Figura 1.1. El sistema natural y sus relaciones internas	2	Figura 2.18. Generadores de cantidades altas de O_3	27
Figura 1.2. Tecnologías para el tratamiento de emisiones	11	Figura 2.19. Mecanismos de reacción de gases expuestos a DBD	29
Figura 2.1. Gráfica universal corriente-voltaje del plasma	17	Figura 2.20. Formas de onda voltaje-corriente empleadas en diferentes investigaciones	30
Figura 2.2. Mapeo de plasmas en función de su densidad electrónica y temperatura	17	Figura 3.1. Reactor coaxial de doble barrera dieléctrica	36
Figura 2.3. Ejemplificación de la divergencia de T_e y T_g en el cambio de fase de un arco no térmico a térmico	18	Figura 3.2. Reactor $C - DBD_2$ de pírex. Daño ocasionado por la descarga en atmósfera de nitrógeno	37
Figura 2.4. Fases en la evolución de las microdescargas en las DBD	19	Figura 3.3. Representación de las líneas de gas	37
Figura 2.5. Configuraciones de los reactores para DBD	19	Figura 3.4. Inversor <i>push-pull</i> elaborado	38
Figura 2.6. Microdescarga en un reactor de doble barrera dieléctrica	20	Figura 3.5. Riso de $V_{PP} = 5 V$ en C_{BUS} , con $f_{pwm} = 41 kHz$	39
Figura 2.7. Reactor coaxial de doble barrera dieléctrica	20	Figura 3.6. Circuito oscilador y controlador de los pulsos de control de compuerta V_{GS}	39
Figura 2.8. Curvas de Paschen para estimar el voltaje de rompimiento de diferentes gases	21	Figura 3.7. Formas de onda de los pulsos V_{GS}	40
Figura 2.9. Circuito eléctrico del inversor <i>push-pull</i>	21	Figura 3.8. Diagrama de simulación del PPI en <i>Simulink</i> ®	40
Figura 2.10. Formas de onda ideales características en los transistores de la topología básica de un PPI	22	Figura 3.9. Formas de onda del PPI, obtenidas por simulación y con osciloscopio (reales)	41
Figura 2.11. Pérdidas de potencia por cada interrupción del transistor	23	Figura 3.10. Representación del diagrama eléctrico para el PCB de control	42
Figura 2.12. Curva de histéresis del núcleo de T_{PP}	23	Figura 3.11. Terminales de la tarjeta USB-6259	43
Figura 2.13. Pico de corriente que indica la saturación de U_{PP}	24	Figura 3.12. Panel principal de la interfaz gráfica de usuario para control del reactor $C - DBD_2$	44
Figura 2.14. Formas de onda características del PPI cuasiresonante	24	Figura 3.13. Circuito divisor de frecuencia para el control remoto de los MOSFET	44
Figura 2.15. Formas de onda características de los PPI <i>boost</i> y <i>buck</i>	25	Figura 3.14. Procesamiento de la señal <i>ctr0</i> para obtener V_{GS}' mediante el circuito divisor de frecuencia	45
Figura 2.16. Representación de una Figura de Lissajous	25	Figura 3.15. Interfaz gráfica para monitoreo de gases	46
Figura 2.17. Configuraciones de precipitadores electrostáticos	26	Figura 3.16. Página en red con la GUI de KaVi_v. 2. 04 anidada y disponible para clientes remotos	46



	Pág.		Pág.
Figura 3.17.	47	Figura 4.5.	54
Figura 3.18.	48	$C - DBD_2^A$ con 65 V aplicados	
		Figura 4.6.	55
		Voltajes y potencias aplicados al	
		$C - DBD_2^B$	
Figura 4.1.a.	52	Figura 4.7.	56
Identificación de las condiciones		Resultados de las pruebas de	
mínimas de potencia para iniciar las		degradación con el $C - DBD_2^A$	
descargas		Figura 4.8.	57
Figura 4.1.b.	52	Resultados de las pruebas de	
Detección de valores pico para		degradación con el $C - DBD_2^B$	
estimar el voltaje mínimo de		Figura 4.9.	58
operación requerido para el		Fotografías del comportamiento	
MOSFET		general de las DBD cuando	
Figura 4.2.	52	incrementa gradualmente la	
Variación de f_{PWM} y D_{PWM} para		concentración de CAM	
determinar la transferencia máxima		Figura 4.10.	60
de potencia		Pérdidas de potencia por formación	
Figura 4.3.	53	de microdescargas fuera del reactor	
Formas de onda del voltaje		Figura 4.11.	60
proporcionado a la descarga		Esquema propuesto para la	
Figura 4.4.	54	instalación en serie de un sistema de	
Voltajes y potencias aplicados al		DBD al convertidor catalítico	
$C - DBD_2^A$			



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.		Pág.
Tabla 1.1. Contaminantes atmosféricos principales y porcentaje de emisión por tipo de fuente	4	Tabla 2.3. Configuraciones plasma-catalizador/plasma empleadas en maquinaria diésel para tratamiento de NO _x	28
Tabla 1.2. Características de emisiones para diferentes tipos de MCI	8	Tabla 3.1. Flujos y concentraciones generales de la mezcla de gas	38
Tabla 1.3. Características de los vehículos eléctricos	9	Tabla 4.1. Datos de degradación de NO _x y CO _x presentes en la mezcla CAM con el reactor C – DBD ₂ ^A	57
Tabla 2.1. Reacciones en la región activa del NTP	18	Tabla 4.2. Datos de degradación de NO _x y CO _x presentes en la mezcla CAM con el reactor C – DBD ₂ ^B	58
Tabla 2.2. Mediciones ideales de los voltajes principales durante las etapas de conmutación del PPI	22		

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.		Pág.
Ecuación 2.1. Distribución de campo eléctrico	19	Ecuación 2.16. Pérdida de potencia total en el PPI	23
Ecuación 2.2. Capacitancia equivalente de un reactor dieléctrico	20	Ecuación 2.17. Intensidad de flujo magnético en T_{PP}	23
Ecuación 2.3. Voltaje de rompimiento	21	Ecuación 2.18. Densidad de flujo magnético en T_{PP}	23
Ecuación 2.4. Voltaje de semiciclo en el primario de PPI	22	Ecuación 2.19. Flujo magnético en T_{PP}	23
Ecuación 2.5. Voltaje en el MOSFET 1	22	Ecuación 2.20. Número de vueltas para el primario de T_{PP}	24
Ecuación 2.6. Voltaje de semiciclo a la salida de PPI	22	Ecuación 2.21. Frecuencia de resonancia del PPI	24
Ecuación 2.7. Voltaje de semiciclo en el secundario de PPI	22	Ecuación 2.22. Función de la forma de onda del voltaje de salida del PPI	24
Ecuación 2.8. Voltaje en el MOSFET 2	22	Ecuación 2.23. Fórmula de potencia para ozonizadores o de Manley	25
Ecuación 2.9. Voltaje de semiciclo a la salida de PPI	22	Ecuación 3.1. Factor de corrección de la CAM	37
Ecuación 2.10. Voltaje en el MOSFET 1 y 2	22	Ecuación 3.2. Factor de corrección de escala del MFC	37
Ecuación 2.11. Voltaje pico a la salida de PPI	23	Ecuación 3.3. Flujo equivalente de la CAM	37
Ecuación 2.12. Función de transferencia de PPI	23	Ecuación 3.4. Flujo equivalente de He	37
Ecuación 2.13. Voltaje mínimo en el MOSFET	23	Ecuación 4.1. Voltaje mínimo en el MOSFET (factor corregido)	52
Ecuación 2.14. Pérdida de potencia en CA en el PPI	23		
Ecuación 2.15. Pérdida de potencia en CD en el PPI	23		





LISTA DE ABREVIATURAS

% vol.	Concentración en volumen	DCP	Descarga de corona pulsada
7408	Circuito lógico AND	DEE	Densidad de Energía de Entrada
7476	Circuito <i>flip-flop</i> JK	DRE	Eficiencia de remoción o destrucción
A_+	Ion positivo	DVP	Densidad volumétrica de potencia
A^*	Partícula excitada	e^-	Electrón
A:C	Relación aire-combustible	ϵ	Permitividad
CA	Corriente alterna	ESP	Precipitador electrostático
ACIS	Sistema avanzado de encendido por corona	<i>et al.</i>	Colaboradores
Ag/ γ -Al ₂ O ₃	Plata/gamma-alúmina	E	Campo eléctrico
Ar	Argón	F, nF	Unidades de capacitancia, faradio
B	Densidad de flujo magnético	ϕ_{PP}	Flujo magnético
BaTiO ₃	Titanato de bario	f_{PWM}	Frecuencia de la PWM
C	Capacitancia	f_R	Frecuencia de resonancia
C_{BUS}	Filtro capacitivo para V_{PP}	f_z	Frecuencia de amortiguamiento
$C - DBD$	Reactor coaxial de barrera dieléctrica	f	Frecuencia
$C - DBD_2$	Reactor de doble barrera dieléctrica	g	Unidad de masa, gramo
$C - DBD_2^A$	Reactor dieléctrico para la primera prueba	GCF_{CAM}	Factor de corrección de la mezcla CAM
$C - DBD_2^B$	Reactor dieléctrico para la segunda prueba	GCA	Guías de la calidad del aire
C_L	Capacitor en serie al reactor dieléctrico	GEI	Gas de efecto invernadero
C_{PP}	Capacitor de resonancia en T_{PP}	GF	Factor de corrección de la válvula
C_{dbd}	Capacitancia equivalente del reactor	GND	Electrodo de referencia
C_{fw}	Capacitor de rodamiento libre	GSD	Desarrollo gráfico de sistemas
Cp_i	Calor específico del i-ésimo gas	GUI	Interfaz gráfica de usuario
°C	Unidad de temperatura, grados Celcius	H ₂ S	Sulfuro de hidrógeno
C ₂ H ₅ OH	Alcohol	H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
C ₃ H ₈	Propano	HC	Hidrocarburos
CAM	Mezcla automotriz sintética	HV	Electrodo de alto voltaje
CC	Convertidor catalítico	Hz	Unidad de frecuencia, hertz
CeO ₂	Dióxido de cerio	H	Intensidad de flujo magnético
CH ₄	Metano	ICH	Ignición por chispa
CI	Concentración inicial	ICO	Ignición por compresión
CO	Monóxido de carbono	i	Corriente en el circuito, [A, ampere]
CO ₂	Dióxido de carbono	J	Unidad de energía, joule
COHb	Carboxihemoglobina	K	Unidad de temperatura, Kelvin
Co-HZSM-5	Zeolita	L	Distancia donde se cruzan los electrodos
COV	Compuestos orgánicos volátiles	l	Unidad de volumen, litro
CO _X	Óxidos de carbono	λ	Sonda o parámetro lambda
CTV	Convertidor catalítico de tres vías	λ_D	Longitud o radio de Debye
D_{PWM}	Ciclo de trabajo, o servicio, de la PWM	$L_{1,2}$	Devanados primarios de T_{PP}
D_{fw}	Diodo de rodamiento libre	L_3	Devanado secundario de T_{PP}
d_i	Densidad del i-ésimo gas	L_{PP}	Bobina de resonancia en T_{PP}
DAQ	Tarjeta de adquisición de datos	LGCC	Ley general de cambio climático
DBD	Descarga de barrera dieléctrica	LGEEPA	Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente
DB _X	Conector tipo D con X cantidad de pines	M	Ganancia de T_{PP}
CD	Corriente directa		



MCI	Motor de combustión interna	SO ₄ ²⁻	Sulfatos
MFC	Válvula de control de gas	SO _x	Óxidos de azufre
MOSFET	Transistor de efecto de campo metal- óxido-semiconductor	SSA	Secretaría de salud
Mt	Unidad de masa, megatonelada	sub-VI	Subrutina de un VI
M _X T	Motor de X tiempos	<i>T</i>	Temperatura de translación
<i>n_e</i>	Densidad electrónica	<i>T</i> ₊	Temperatura de translación de los iones
N ₂	Nitrógeno molecular	<i>T_e</i>	Temperatura de translación de electrones
N ₂ O	Óxido nitroso	<i>T_g</i>	Temperatura promedio del plasma
NH ₃	Amoníaco	<i>T_n</i>	Temperatura de translación de las partículas neutras
NLM	Biblioteca nacional de medicina	<i>T_{ON}</i>	Tiempo del MOSFET en 1 lógico
NO	Monóxido de nitrógeno	<i>T_{PP}</i>	Transformador del PPI
NO ₂	Dióxido de nitrógeno	<i>t_x</i>	Tiempos característicos en la gráficas
NO _x	Óxidos de nitrógeno	TC4422	Circuito manejador de compuerta
NTP	Plasma frío	TEG	Material termoelectrico
<i>N</i>	Número de vueltas en los devanados de <i>T_{PP}</i>	TiO ₂	Dióxido de titanio
O•	Radical	TL594	Circuito oscilador
O ₂	Oxígeno molecular	TLO	Temperatura del CC al 50%
O ₃	Ozono	TLP250	Circuito optoacoplador
OMS	Organización mundial de la salud	TTL	Lógica transistor-transistor
Pa	Unidad de presión, pascal	<i>U_{PP}</i>	Núcleo del transformador <i>T_{PP}</i>
Pb	Plomo	UBA	Ultra bajo en azufre
PCB	Circuito impreso	UE	Unión europea
PG-250	RGA portable	USB-6259	Tarjeta de adquisición de datos
PM _x	Material particulado	UV	Radiación ultra violeta
ppb	Concentración en partes por billón	V	Voltaje, [V, volt]
PPI	Inversor <i>push-pull</i>	<i>V_(MÁX)</i>	Voltaje máximo
ppm	Concentración en partes por millón	<i>V_(pk)</i>	Voltaje de amplitud máxima
PWM	Modulación por ancho de pulso	<i>V_{DS}</i>	Voltaje en el MOSFET al conmutar
<i>pd</i>	Variables independientes de <i>V_r</i>	<i>V_{GS}</i>	Pulsos de control para el MOSFET
<i>Q_{1,2}</i>	Transistores del PPI	<i>V_{PP}</i>	Fuente de CD principal
<i>Q, Q̄</i>	Salida del <i>flip-flop</i>	<i>V_{PP1}</i>	Voltaje senoidal a la salida del inversor
<i>r_x</i>	Radios del reactor	<i>V_r</i>	Voltaje de rompimiento
RGA	Analizador de gases residuales	V ₂ O ₅	Óxido de vanadio (V)
<i>R(t)</i>	Resistencia del canal de descarga	<i>vgr.</i>	Por ejemplo
S	Azufre	VI	Instrumento virtual
SCF	Factor de corrección de escala	W	Unidad de potencia, watt
snm	Sobre el nivel del mar	WESP	Precipitador electrostático húmedo
SMPS	Fuente conmutada	ZrO ₂	Dióxido de zirconio
SO ₂	Dióxido de azufre	ZVS	Conmutación a cero voltaje



RESUMEN



De entre los tantos problemas que amenazan la vida colectiva se encuentra el deterioro de las condiciones naturales del lugar donde se desarrolla la población. El cambio climático, fenómeno con 95% de probabilidad de haberse originado por actividades antrópicas, es la cuestión ambiental más discutida en estos tiempos y ha sido marcada como irreversible.

Ante tal situación, diversas medidas institucionales han tenido que surgir para balancear los extremos antropocéntrico y biocéntrico. En este proceso se busca un modelo de desarrollo incluyente que preserve y/o mejore el entorno actual para las generaciones posteriores, sin que ello signifique sacrificar el nivel de bienestar actual.

De forma muy específica, existe la necesidad inmediata de reducir los niveles de contaminación atmosférica, ya que se ha demostrado que la exposición a este medio alterado es causa de enfermedades crónicas y agudas. La fuente que más contribuye a esta alteración en zonas urbanas es el automóvil, con más del 90% de emisiones de material particulado, hidrocarburos, óxidos de carbono, nitrógeno y azufre, principalmente dióxido de azufre.

Una de las tecnologías emergentes para contrarrestar el efecto de las fuentes móviles es el post-tratamiento del efluente gaseoso con plasma frío. Al respecto, existen reportes en la literatura de investigaciones en las que las descargas corona se utilizaron para degradar, simultáneamente, dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno; para los últimos se emplean, en

otros casos, descargas de barrera dieléctrica, debido a su estabilidad y homogeneidad. A pesar de esto, las descargas de barrera a partir de aire o nitrógeno tienden a ser filamentosas a presión atmosférica y dificultan su implementación.

En este trabajo, para poder proporcionar un control estable de las descargas, se desarrolló un sistema gráfico para adquirir y generar datos hacia y desde una unidad de procesamiento. En este proceso de instrumentación se diseñó e implementó un inversor *push-pull* de alto voltaje que conmuta a 41 kHz con el ciclo de trabajo al 25%; con estos parámetros, a la salida del convertidor existe una señal de voltaje con forma de onda senoidal modificada, colocada en paralelo a un reactor coaxial de dos paredes de alúmina y electrodos de acero inoxidable, a través del cual fluye una mezcla de gases contaminantes balanceados en nitrógeno.

En las pruebas experimentales se emplearon dos reactores similares con volúmenes de 50.60 y 29.44 μm^3 . En el primero se diluyó la mezcla sintética contaminante CAM con helio, en concentraciones del 0.38 al 13.95 % vol., la degradación máxima fue de 88.24% ($141.50 \text{ mW } \mu\text{m}^{-3} @ 34.42 \text{ J l}^{-1}$) para óxidos de nitrógeno. En el segundo caso, la degradación de estos compuestos fue cercana a 100%, sin embargo, se generaron 11.68 ppm de monóxido de carbono. En ambos casos se aplicaron voltajes máximos, desde la fuente principal, de 65 V (vistos como 6 kV de amplitud en el reactor) con potencias de hasta 100 W.



ABSTRACT

Among the many problems that threaten the collective life, it is focused the degradation of the environment's conditions where the population develops. The climate change is a phenomenon with 95% probability of being originated because of human activities. It is the most controversial environmental issue these days and has been marked as irreversible.

Specifically, there is an immediate need to reduce air pollution levels, since it has been shown that exposure to this altered environment causes chronic and acute diseases. In urban areas, the sources that contributes the most to this alteration are the vehicles, with over 90% of particulate matter emissions, hydrocarbons, and carbon, nitrogen and sulfur oxides, mainly sulfur dioxide.

One of the emerging technologies to counteract the effect of mobile sources is the post-treatment of gaseous effluent with cold plasma. There are investigations in which the corona discharges are used to degrade sulfur dioxide and nitrogen oxides simultaneously; for the last ones, dielectric barrier discharges are employed due to their stability and homogeneity. Despite this, barrier discharges generated from air or nitrogen tend to be like a filament at atmospheric pressure, making difficult their implementation in daily life.

In this paper, to provide a stable discharge control, a graphical system design was developed to acquire and generate data in a plasma-processing unit. In this instrumentation, a high voltage high frequency push-pull inverter, at 41 kHz switching frequency and 25% duty cycle, was designed and implemented. With these parameters, a modified-sine voltage waveform is measured at the converter's output; then placed in parallel to a dual-layer coaxial-alumina reactor with stainless steel electrodes, through which a pollutant gaseous mixture, balanced in nitrogen, can flow to be treated.

In tests, two similar reactors with 50.60 and 29.44 μm^3 were used. In the first one, the synthetic flue gas CAM was diluted with helium in concentrations from 0.38 to 13.95 %vol., the maximum nitrogen oxides' degradation was 88.24% (141.50 $\text{mW } \mu\text{m}^3 @ 34.42 \text{ J l}^{-1}$). In the second case, this degradation was nearly 100%, however, 11.68 ppm of carbon monoxide were generated. In both reactors, the maximum voltage applied from the primary source was 65 V (seen as 6 kV of amplitude in the electrodes) with a maximum power of 100 W.

RÉSUMÉ

Parmi les nombreux problèmes qui menacent la vie collective c'est la détérioration des conditions naturelles où la population se développe. Le phénomène de changement climatique, avec 95% de probabilité de provenir par les activités humaines, est la question la plus controversée de l'environnement de nos jours et a été marquée comme irréversible.

Plus précisément, il y a un besoin immédiat de réduire les niveaux de pollution de l'air, car il a été montré que l'exposition à cet environnement modifié provoque des maladies chroniques et aiguës. La source qui contribue le plus à cette modification dans les zones urbaines est l'automobile, avec plus de 90% des émissions de particules, hydrocarbures, oxydes de carbone, d'azote et de soufre, principalement le dioxyde de soufre.

Une des technologies émergentes pour contrer l'effet des sources mobiles est le post-traitement des effluents gazeux par plasma froid. Il existe des recherches dans lesquelles les décharges corona sont utilisées pour dégrader le dioxyde de soufre et oxydes d'azote en même temps; pour ce dernier sont utilisés, dans d'autres cas, les décharges à barrière diélectrique, en raison de sa stabilité et de son homogénéité. Malgré cela, les décharges à barrière dans l'air ou l'azote ont tendance à être filamenteuses à la pression atmosphérique et nuisent à sa mise en œuvre.

Dans cet article, pour concevoir un contrôle stable des décharges, un système graphique est développé pour acquérir et générer des données en une unité de traitement. Dans ce processus d'instrumentation, un inverseur *push-pull* de haute tension qui commute à 41 kHz avec un cycle de service de 25% a été conçu et mis en œuvre; avec ces paramètres, on a un signal de tension en sortie du convertisseur avec une forme d'onde sinusoïdale modifiée, placée en parallèle avec un réacteur coaxial à deux barrières d'alumine et électrodes en acier inoxydable, à travers duquel circule un mélange de gaz polluants, équilibrés en azote.

Dans les tests ont été utilisés deux réacteurs similaires (de 50,60 et 29,44 μm^3). Dans le premier a été dilué le contaminant synthétique CAM avec hélium à des concentrations de 0,38 à 13,95 %vol. La dégradation maximale était de 88,24% (141,50 $\text{mW } \mu\text{m}^3 @ 34,42 \text{ J l}^{-1}$). Dans le second cas, la dégradation était de près de 100%, cependant, ont été générés 11,68 ppm de monoxyde de carbone. Dans les deux cas, la tension maximale appliquée a été de 65 V (6 kV d'amplitude dans le réacteur) et une puissance maximale de 100 W.



INTRODUCCIÓN



A lo largo de la tesis se desarrollan los temas que forman el Marco Teórico del trabajo de investigación. En el Capítulo 1 se presentan los conceptos básicos concernientes al ambiente y, gradualmente, la temática se enfoca hacia las fuentes móviles como precursoras y contribuyentes principales de la contaminación atmosférica. De forma muy puntual, se enlistan las tecnologías actuales que tratan de disminuir el deterioro de la calidad del aire. También, son mencionadas algunas de las posibles afectaciones crónicas y agudas de salud pública, las cuales pueden ser diversas con repercusiones múltiples de acuerdo a la concentración del contaminante y a las características del individuo que las inhala.

Dentro de las innovaciones estudiadas se presentan en el Capítulo 2 a las Descargas de Barrera Dieléctrica (un tipo de Plasma Frío) como alternativa de gran impacto para el tratamiento de emisiones gaseosas, por tratarse de un medio altamente reactivo; cualidad que las pone en ventaja ante procesos convencionales.

Una vez planteada la terminología necesaria, que también refuerza la justificación para la fase de experimentación, en el Capítulo 3 se desarrolla un montaje en laboratorio con las herramientas necesarias para estudiar el comportamiento eléctrico de un inversor diseñado para alimentar a un reactor coaxial. El fin de este sistema es realizar pruebas de degradación de una mezcla automotriz sintética y analizar los resultados para ciertos de sus compuestos. La información obtenida se discute en el último Capítulo.

De acuerdo con los requerimientos del programa, los Capítulos 1, 2 y 3 corresponden al protocolo actualizado, mientras que el Capítulo 4 ha sido enviado para su arbitraje en un artículo científico que abarca el 70% de los resultados del trabajo de investigación. Éste documento está adjunto en el Anexo B.

Entonces, en este primer apartado se plantean la Justificación, la Hipótesis y los Objetivos, como ejes principales para la ejecución del trabajo de investigación y experimentación.

I. Planteamiento del Problema y Justificación

Sin lugar a dudas, el problema de la contaminación global del medio es una situación prioritaria en esta época. Existe una gran probabilidad de que las actividades humanas sean las causantes de la gran cantidad de problemas ambientales. La necesidad de transporte, que surgió recientemente, es una actividad antrópica que contribuye notablemente a la alteración de la composición natural de la atmósfera, principalmente en zonas urbanas; la contaminación de este recurso natural se refleja en el agravamiento a la salud de la población expuesta y a fenómenos naturales devastadores.

Para frenar la cantidad de emisiones gaseosas de fuentes móviles, se han propuesto e instalado dispositivos a bordo de los vehículos, muchos de los cuales no procesan totalmente los gases, tienen un tiempo de vida corto o necesitan alcanzar condiciones de temperatura para iniciar el tratamiento



mientras dejan escapar el efluente intacto. Dentro de estas tecnologías se encuentra el convertidor catalítico, que desde hace casi 4 décadas se ha posicionado como el líder en el control de gases de combustión; sin embargo, a medida que las regulaciones institucionales establecen límites de emisión menores, son necesarias las mejoras o, en su caso, la sustitución de las técnicas empleadas hasta ahora.

Con esta motivación es que serán diseñados, elaborados e implementados, en un prototipo de laboratorio, una fuente bipolar de alto voltaje a alta frecuencia y un reactor coaxial de doble pared cerámica para el tratamiento de óxidos de nitrógeno y de carbono expuestos a descargas de barrera. En el Estado del Arte (Capítulo 2) se muestra que las investigaciones actuales señalan al Plasma Frío como una alternativa acorde para el tratamiento de estos compuestos, especialmente en automóviles. En muchas de estas referencias se añaden catalizadores, pero aquí se entregan resultados similares (>99% de remoción/destrucción) con el sólo empleo de las descargas. No obstante, los filtros de sorción son necesarios para atrapar los subproductos generados.

II. Hipótesis

Mediante la implementación de descargas de barrera dieléctrica es posible degradar simultáneamente y en un porcentaje elevado a los óxidos de nitrógeno y de carbono presentes en la mezcla automotriz CAM.

III. Objetivo General

Implementar tecnología de plasma frío, tipo descargas de barrera dieléctrica, para degradar simultáneamente los óxidos de nitrógeno y de carbono que son resultado del proceso de la quema de combustibles fósiles en fuentes móviles.

III.I Objetivos Específicos

- Llevar a cabo una revisión bibliográfica para identificar los contaminantes atmosféricos y su efecto en el medio, así como los lineamientos que dan lugar a la implementación de medidas y tecnologías para su control.
- Diseñar y construir un sistema de potencia que proporcione una señal de voltaje bipolar capaz de suministrar el voltaje de rompimiento del gas a ionizar dentro de un reactor coaxial de doble pared dieléctrica y, que del mismo modo, sostenga en forma estacionaria las descargas de barrera.
- Instrumentar el reactor dieléctrico mediante el diseño gráfico de sistemas, para proporcionar lecturas y registros confiables, y en tiempo real, de las variables físicas involucradas en el proceso.
- Realizar pruebas de degradación a partir de un flujo de la muestra sintética del gas de combustión, empleando, en un primer escenario, helio como gas de acarreo.
- Disminuir la cantidad del gas noble presente en el efluente, mediante la optimización del sistema de control de potencia (frecuencia y ciclo de trabajo).
- Generar descargas a partir del componente principal del aire: nitrógeno.
- Determinar el porcentaje de degradación para los contaminantes gaseosos enunciados, mediante la información recabada de un analizador de gases residuales.



CAPÍTULO



EMISIONES GASEOSAS POR FUENTES MÓVILES Y SUS MEDIDAS DE CONTROL

1.1 Introducción

Uno de los tantos problemas que amenazan la vida de la sociedad moderna es la contaminación del lugar que habita, derivada, entre otros factores, de la mala racionalización y del inadecuado y acelerado uso de los recursos naturales. Actualmente, expresiones como deshielo de los casquetes polares, destrucción de la capa de ozono o desertización progresiva son términos que se pronuncian con más frecuencia cuando se habla de los peligros que acechan al medio. El cambio climático es la cuestión ambiental más importante y discutida de la era, ya que provoca cambios en los patrones climáticos y amenaza la producción de alimentos; también, induce un aumento del nivel del mar, mismo que contamina las reservas de agua dulce costeras y aumenta el riesgo de inundaciones.

De forma polarizada, dos modos de convivencia hombre-ambiente han sido marcados a través de la corta historia del ser humano: la primera se enfoca en cubrir las necesidades del hombre sin considerar los efectos colaterales negativos hacia el ambiente (antropocéntrica), mientras que la segunda lo integra como parte del sistema natural y procura por una alteración mínima de la naturaleza (biocéntrica) [1]. Aunque la necesidad de alcanzar un balance que armonice a ambas concepciones no es reciente (basta con mencionar el signo cultural deidad-naturaleza presente en las culturas prehispánicas, que da cuenta del enorme valor que dieron los

pueblos antiguos en sus creencias y prácticas cotidianas), sí se presenta con mucha premura desde hace poco tiempo. Tal equilibrio busca un modelo de desarrollo integral que preserve y/o mejore el entorno actual para las generaciones posteriores, sin sacrificar el nivel de bienestar actual.

A nivel institucional, en 1968 las Naciones Unidas consideraron por primera vez la temática en su convocatoria a la Conferencia sobre los Problemas del Medio Humano para 1972 [2]. Este evento llevó a la creación del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, que es la autoridad mundial principal a cargo de los asuntos del ambiente [3]. En 1987 fue presentado el Informe Brundtland, documento que con base en factores sociales, económicos y ambientales, expuso el término Desarrollo Sostenible: >> *satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades* >> [4]. Ese mismo año se presentó el Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono, con la expectativa de su recuperación para el año 2050 [5]. Hacia 1992 se realizó la Conferencia de Río, o Cumbre de la Tierra, con el fin de elaborar estrategias y medidas para detener o revertir los efectos de la degradación del medio [6]. Para 1997, en Kioto, los países industrializados se comprometieron a ejecutar medidas para reducir al menos 5% las emisiones contaminantes (dióxido de carbono (CO₂),



metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hexafluoruro de azufre, hidrofluorocarbonos y perfluorocarbonos) entre 2008 y 2012, con referencia a los niveles de 1990 [7]. En 2002, la Unión Europea (UE) ratificó el protocolo de Kioto, que entró en vigor en 2005, tras la validación de Rusia; sin embargo, varios países industrializados se negaron a reconfirmarlo, entre ellos, Estados Unidos de Norte América y Australia [8]. Estos son sólo algunos ejemplos de los numerosos proyectos de colaboración emprendidos y demuestran una voluntad clara de cambiar la manera en que la humanidad gestiona los recursos naturales.

Las iniciativas anteriores han servido para encarar el cúmulo de desafíos ambientales. Entre sus prioridades precisan un Gobierno y Economía Verdes que proporcionen a toda la población alimento y energía “ilimitados” (siempre basados en el desarrollo sostenible), debido a que respuestas anteriores como la Revolución Verde (1940-1970) y los Reactores Nucleares (de 1942 a la fecha) no han cubierto las expectativas pronosticadas [9].

Existe la necesidad urgente de reducir los niveles de contaminación atmosférica, ya que millones de personas han muerto, y otras tantas morirán prematuramente, debido a la exposición de largo plazo a aire contaminado. Tan sólo un niño, o una mujer adulta, procesa aproximadamente 8 l min⁻¹ de aire cuando está en reposo, 10 l min⁻¹ en el caso de un hombre adulto [10]. Entre las fuentes de contaminación del aire están incluidos los vehículos automotores, la industria manufacturera, las plantas de energía, la cocina y la calefacción con combustibles sólidos (*vgr.*: carbón o madera), los incendios forestales, la quema a cielo abierto de residuos municipales y la agricultura.

Específicamente, las secciones siguientes tocarán el tema de la contaminación atmosférica generada por los medios de transporte automotor, en la que se considera la conexión directa e inherente de la antroposfera con la atmósfera, la hidrosfera, la geosfera y la biosfera a través de los ciclos biogeoquímicos (Figura 1.1).

1.2 Medio Ambiente

El medio ambiente (aunque la forma más apropiada es medio o ambiente) es el espacio donde todas las formas de vida se desenvuelven e interactúan con el resto de la materia. Desde el punto de vista antropocéntrico, es el entorno que afecta y condiciona la vida de la sociedad [12]. Está constituido por la

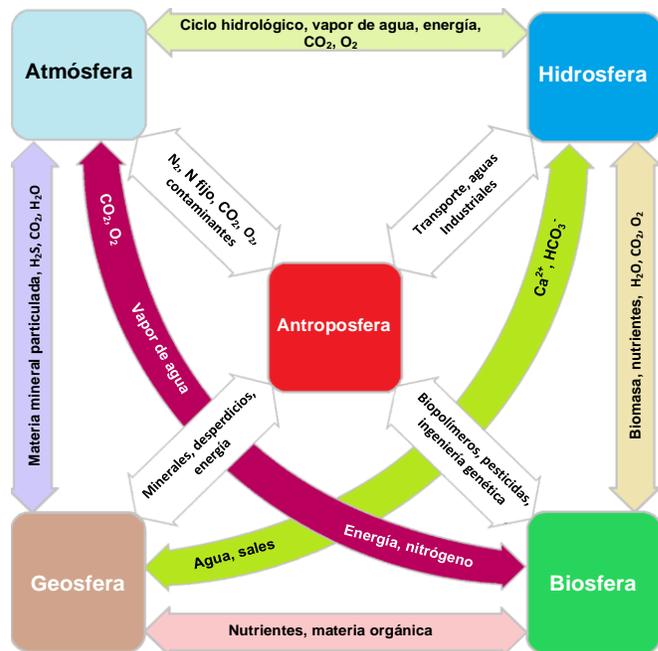


Figura 1.1. El sistema natural y sus relaciones internas [11].

biosfera, la hidrosfera, la geosfera y la atmósfera. La biosfera abarca a todos los seres vivos en la Tierra; en la hidrosfera, el 97% del agua se está distribuida en los océanos y la mayoría del restante 3%, que comprende al agua dulce, se encuentra principalmente en estado sólido. La litosfera (con un espesor de 50 a 100 km) es la parte exterior de la geosfera y mantiene una relación muy estrecha con el resto de las esferas del sistema natural; la corteza (con un grosor de 5 a 40 km) es la parte más externa de la litosfera y es donde la mayoría de las actividades relacionadas con la generación de productos para el consumo humano son realizadas. La atmósfera es la capa de gases que cubre a la Tierra; controla la temperatura del planeta, absorbe la radiación UV proveniente del espacio, transporta energía desde las regiones ecuatoriales y cumple como vía principal dentro del ciclo hidrológico. Como parte adicional, la ciencia y la tecnología (antroposfera) son las herramientas que ofrecen confort al hombre, pero que a su vez acarrear alteraciones en el entorno natural [11].

1.2.1 La Atmósfera

La atmósfera es una mezcla gaseosa denominada Aire. Nutre y protege la vida de la radiación dañina proveniente del sol, al permitir únicamente el paso de longitudes de onda de 300 a 2500 nm y de 0.01 a 40 m; su composición en volumen sobre el nivel del mar (snm) es de 78.03% de nitrógeno (N₂), 20.99% de oxígeno (O₂), 0.94% de argón (Ar) y 0.033% de



CO₂, el porcentaje restante se refiere a trazas de gases nobles y de monóxido de carbono (CO), amoníaco (NH₃), N₂O, dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), entre otros. Estos últimos compuestos son removidos naturalmente mediante procesos fotoquímicos¹. Normalmente el aire presenta una concentración de 1 a 3 % de vapor de agua, cifra que tiende a variar debido a la formación de nubes [13].

La atmósfera concentra el 99% de sus 5.30x10¹⁸ kg en los primeros 30 km snm (de 500 km totales), y se divide en capas de acuerdo con la temperatura y densidad que presenta; estas son: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera o ionosfera, y exosfera, separadas entre sí por regiones conocidas como pausas [11]. La troposfera se extiende hasta una altitud de 16 km snm con temperaturas que descienden de la ambiente a 217 K; está en contacto directo con la biosfera y la antroposfera, por lo tanto, allí reside gran parte de los contaminantes producidos en procesos antropogénicos, aunque algunos de ellos escapan a la estratosfera (*vgr.*: compuestos halogenados) y causan el agotamiento de la capa de ozono [14].

1.3 Contaminación Atmosférica

La población en aumento junto con el deseo de la mayoría de la gente por alcanzar un nivel de vida más alto, son factores que dan lugar a la contaminación ambiental en escala masiva, fenómeno que generalmente es dividido en las categorías de agua, aire y suelo.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) define a la contaminación como >> *la presencia en el ambiente de uno o más contaminantes o de cualquier combinación de ellos que cause desequilibrio ecológico* >>; donde un contaminante es >> *toda materia o energía en cualesquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, agua, suelo, flora, fauna o cualquier elemento natural, altere o modifique su composición y condición natural* >> [15]. Entonces, la contaminación atmosférica es la alteración de un ambiente cerrado o libre por cualquier agente químico, físico o biológico que modifica las características naturales del aire.

Existe una probabilidad >95% de que el calentamiento atmosférico, presente desde 1950, sea resultado de las

actividades humanas y se ha señalado la imposibilidad de mantener su aumento debajo de los 275.15 K en este siglo [16]. El calentamiento es acentuado por contaminantes denominados gases de efecto invernadero o de invernadero (GEI), que retienen parte de la energía que la superficie planetaria emite al espacio después de haber sido calentada por la radiación solar. Si bien los GEI más importantes están presentes en la atmósfera de forma natural, su concentración se ha modificado por acción antrópica; tal es el caso del GEI responsable del 85% en el incremento del calentamiento global: el CO₂, que de 260 ppm en la era preindustrial [11] pasó a 400 ppm en 2013 [17].

Existen formas alternas de organizar a los contaminantes, como ejemplo están los:

- Contaminantes Peligrosos: son 188 compuestos no carcinógenos y carcinógenos, en su mayoría compuestos orgánicos volátiles (COV) [18]; y los
- Contaminantes Criterio: empleados para evaluar la calidad del aire y establecer niveles permisibles para la formulación de programas de control que protejan la salud y el ambiente, estos son el SO₂, NO₂, material particulado (PM), plomo (Pb), CO y O₃ [19].

Otra diferenciación considera si los contaminantes han sido emitidos directamente desde la fuente o si se formaron posteriormente. En esta clasificación se encuentran los:

- Contaminantes Primarios: procedentes directamente de las fuentes de emisión, *vgr.*: Pb, CO, NH₃, PM, óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), halógenos, sulfuro de hidrógeno (H₂S), entre otros; y los
- Contaminantes Secundarios: originados en la atmósfera por la interacción entre dos o más contaminantes primarios, o por reacciones con los agentes naturales (viento, radiación solar, humedad, precipitación pluvial o temperatura); *vgr.*: O₃, HC, PM, sulfatos (SO₄²⁻), nitratos, ácido sulfúrico (H₂SO₄), etc. [11].

Respecto a las fuentes de generación de contaminantes, se dividen en naturales (*vgr.*: descomposición de materia orgánica, emisión de CH₄ en cuerpos de agua, respiración o tolveneras) y antropogénicas. Estas últimas son subdivididas en Fijas, Estacionales o Puntuales (*vgr.*: plantas de energía, industrias químicas, refinerías de petróleo, fábricas, etc.), de Área (pequeñas, numerosas y dispersas, con emisión <<10 Mg por año; *vgr.*: el uso de madera para cocinar, las imprentas,

¹ Éste tipo de reacciones son las de mayor importancia dentro de la química atmosférica; resultan de moléculas que absorben fotones de luz [11].



las estaciones de servicio o las tintorerías) y Móviles (todos los medios de transporte terrestre impulsados por motor de combustión) [20]. En la Tabla 1.1 se muestra esta clasificación de generadores de contaminantes atmosféricos.

Se considera que el aire limpio es un requisito básico de la salud y el bienestar humanos, ya que su contaminación representa una amenaza importante para la salud en todo el mundo. Entre 2005 y 2010, la tasa de mortalidad debida a los contaminantes atmosféricos aumentó 4% a nivel mundial [21], y estimaciones de 2012 identifican que 3.7 millones de defunciones prematuras son a razón de esta condición [22].

1.3.1 Efectos de los Contaminantes Atmosféricos

Debido a los elevados porcentajes de emisiones gaseosas y su concentración en la atmósfera, es importante conocer los límites permisibles establecidos en la normatividad para evaluar y determinar la calidad del aire. Ya que pueden ocasionar afectaciones de corto y largo plazo en la salud pública (agudas y/o crónicas); los contaminantes atmosféricos de mayor preocupación son el PM, el O₃, el SO₂, el CO y el NO₂ [23]. Como respuesta, se han implementado políticas y estrategias tendientes a disminuir la cantidad de contaminantes atmosféricos. Tres de los instrumentos legislativos más importantes en México son la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Art. 4º: >> *Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.* >>, Art. 25 y Art. 122) [24], la LGEEPA (que en su Capítulo II, del Título Cuarto, trata específicamente sobre la Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera) [15], y la Ley General de Cambio Climático (LGCC, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012, que en lo general se enfoca a la mitigación de emisiones de GEI) [25].

En 1987 la Organización Mundial de la Salud (OMS) publicó las Guías de la Calidad del Aire (GCA), en su última revisión de 2005 se refieren únicamente al PM, O₃, SO₂ y NO₂ [26]. Estos lineamientos respaldan en todo el mundo las medidas locales orientadas a propiciar una calidad de aire que proteja la salud pública; sin embargo, cada país establece su propia normatividad en función de su viabilidad tecnológica y de sus aspectos económicos, políticos y sociales. A la par de las GCA surgieron investigaciones sobre los efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud, sobre todo en países

TABLA 1.1
CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PRINCIPALES
Y PORCENTAJE DE EMISIÓN POR TIPO DE FUENTE [11]

Contaminante	Fuente de Emisión	
	Natural	Antropogénica
SO ₂	55.3%	44.7%
CO ₂	56.6%	43.4%
HC	84.5%	15.5%
Macropartículas	88.7%	11.3%
NO _x	88.7%	11.3%
CO	90.6%	9.4%

de ingresos bajos y medianos, donde los niveles de contaminación alcanzan su nivel más alto.

A continuación se proporciona información concerniente al SO₂, los óxidos de carbono (CO_x) y los NO_x, que son contaminantes inorgánicos antropogénicos.

a. Dióxido de Azufre

El azufre es un elemento no metálico de color amarillo, constituye a los aminoácidos necesarios para la síntesis de proteínas. Se encuentra de forma natural en la atmósfera a una concentración de $\sim 2 \times 10^{-8}$ % vol. A nivel industrial se emplea como fertilizante y en la fabricación de pólvora, laxantes, fósforos e insecticidas; de forma natural está presente en el petróleo y el carbón [13].

La parte más significativa del ciclo del azufre es la generación en la atmósfera de SO₂ y H₂SO₄. El primero es un gas incoloro e hidrosoluble de olor asfijante y ligeramente tóxico, desprendido en la combustión de combustibles fósiles. El efecto perjudicial importante del SO₂ radica en su tendencia a oxidarse en la atmósfera para producir H₂SO₄, responsable de la precipitación ácida que afecta la integridad estructural y la vida de los edificios. Recientemente, se ha reconocido la contribución de las emisiones de SO₂ en la formación de aerosoles inorgánicos secundarios y partículas finas [13]. Aproximadamente 100 Mt de azufre entran en la atmósfera cada año como resultado de actividades antrópicas, principalmente como SO₂ [11].

El SO₂ es perjudicial para las plantas, pues induce necrosis foliar (muerte de las hojas) y la exposición crónica provoca clorosis (blaqueamiento de las hojas). Estos daños se elevan con el aumento de la humedad relativa. A largo plazo, la



exposición a niveles bajos de SO_2 puede reducir los rendimientos de los cultivos [27]. De forma similar, el compuesto ha sido implicado en la inversión térmica que atrapó productos industriales de desecho en Meuse Valley River, Bélgica, en diciembre de 1930; los niveles de SO_2 alcanzaron 38 ppm, 60 personas y algunas cabezas de ganado murieron en el episodio [28]. En octubre de 1948, un incidente similar registró 2 ppm de SO_2 , lo que causó enfermedades a más del 40% de la población de Donora, Pennsylvania, y la muerte de 20 personas [29]. De estos acontecimientos, el más devastador sucedió en 1952 en Londres, Inglaterra, donde una inversión con 1.3 ppm de SO_2 prevaleció durante cinco días y conllevó a 12000 muertes adicionales para 1953 [30].

Las GCA de la OMS establecen una concentración máxima en el aire de 7.63 ppb de SO_2 como media durante 24 h de exposición, y de 198.47 ppb durante un periodo máximo de 10 min [26]². En México, la Secretaría de Salud (SSA) especifica 110 ppb de SO_2 promedio en 24 h una vez al año, 25 ppb promedio anual, y 200 ppb promedio durante 8 h máximo dos veces al año [31].

El efecto principal del SO_2 en el cuerpo humano está sobre el tracto respiratorio, donde produce irritación, secreción de mucosa y aumenta la resistencia de las vías respiratorias; la exposición aguda a altas concentraciones es causa de muerte en adultos saludables (los daños por exposición crónica y aguda se encuentran ampliamente discutidos en el sumario del Departamento de Salud y Servicios Humanos de los Estados Unidos) [32].

De acuerdo con el compendio de la *National Library of Medicine* (NLM) [33], la exposición aguda de animales a SO_2 (con 9.92 ppm) sugiere la broncoconstricción inmediata, estrechamiento de las vías respiratorias, cambios en el metabolismo e irritación de las membranas mucosas de los ojos. Las exposiciones crónicas pueden aumentar reacciones alérgicas pulmonares y susceptibilidad a infecciones bacterianas. De 1 a 8 ppm durante 10 min, se presenta incremento en la frecuencia de pulsación y respiratoria, al igual que una disminución del volumen tidal; dosis con 1, 5 y 13 ppm por lapsos de 10 a 30 min, incrementan la resistencia pulmonar; concentraciones de 1, 5 y 25 ppm, por periodos de 1 a 6 h, disminuyen el flujo de mucosa nasal y de la sección nasal transversal.

² 1 ppm de SO_2 equivale a $2620 \mu\text{g m}^{-3}$ de SO_2 @ 298.16 K y 101.3 kPa [31].

b. Óxidos de Carbono

Los óxidos de carbono, u oxocarbonos, son compuestos inorgánicos formados únicamente de carbono y oxígeno. Los más simples y comunes son el CO y el CO_2 [34]; se empleará el término CO_x para referirse a ambos.

El CO es un gas inodoro, incoloro, explosivo y altamente tóxico. Se encuentra de forma natural en la atmósfera en una concentración de $\sim 1.2 \times 10^{-5}$ % vol. Se produce por la descomposición de la materia vegetal o por la combustión incompleta de combustibles fósiles, tabaco o madera. Los niveles más altos de este gas tienden a ocurrir en zonas urbanas con tráfico congestionado, cuando los vehículos están detenidos y con el motor encendido; llega a existir una concentración de 50 a 100 ppm de CO. Debido a su toxicidad, causa la muerte cuando se respira en altas concentraciones, la exposición aguda provoca dolor de cabeza, confusión, mareos, náuseas, debilidad y pérdida del conocimiento [13].

Por su parte, el CO_2 es un gas incoloro e inodoro, de sabor ácido débil, con moléculas lineales y no polares, a pesar de tener enlaces polares. También puede solidificarse para ser empleado como hielo seco. El CO_2 se produce cuando los volcanes entran en erupción, al respirar o quemar combustibles fósiles. Como parte del ciclo del carbono, las plantas, algas y cianobacterias usan la energía lumínica del sol para fotosintetizar carbohidratos y producir oxígeno a partir de CO_2 y agua. En la industria se utiliza para la refrigeración, la carbonatación de bebidas, en la producción de otros productos químicos (vgr.: metanol), en el procesamiento, preservación y congelación de alimentos, o para fumigar cultivos [11], [35].

A nivel internacional, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica estableció por primera vez las normas de calidad del aire para el CO en 1971, con patrones de 9 ppm durante 8 h y de 35 ppm por 1 h, cada día [36]. La UE, en el 2000, dispuso un máximo de 8.73 ppm promedio por 8 h en un día [37]³. En México, la SSA especifica que no debe rebasar el valor permisible de 11 ppm en promedio por 8 h una vez al año [38].

Son prácticamente nulas las regulaciones acerca del CO_2 . Los documentos más destacados son el Protocolo de Kioto a nivel internacional y la LGCC a nivel nacional, en ambos es

³ 1 ppm de CO equivale a $1145 \mu\text{g m}^{-3}$ de CO [38].



enfanzada la necesidad del establecimiento de estrategias y límites para diezmar su papel en el cambio climático.

Parece ser que el principal mecanismo de acción en la inducción de efectos tóxicos derivados de la exposición a CO es resultado de la formación de carboxihemoglobina (COHb), sustancia que deteriora la capacidad de transportar el oxígeno en la sangre. La exposición a niveles bajos de CO puede originar fatiga, dolor de pecho, dificultad para respirar, pérdida de memoria, lesiones en la piel, sudoración y síntomas parecidos a los de la gripe; concentraciones altas pueden causar problemas de visión y de coordinación, pérdida del conocimiento, dolores de cabeza y mareos (con una concentración de 35 a 400 ppm, en un periodo de 1 a 8 h), confusión, vómito, debilidad muscular, náuseas y convulsiones (800 ppm por 45 min), coma y muerte por envenenamiento (6400 ppm en periodos menores a 20 min). Durante el embarazo induce el aborto, aumenta el riesgo de daño al feto, da lugar a bebés con bajo peso al nacer y provoca el deterioro del sistema nervioso. Exposiciones crónicas pueden facilitar enfermedades del corazón y daños en el sistema nervioso [39].

La NLM también reporta que el CO₂ puede afectar el desarrollo fetal. La exposición a concentraciones >10 % vol. aumenta las probabilidades de sufrir convulsiones y/o morir. A volúmenes bajos genera hiperventilación, daño a la visión, congestión pulmonar, lesión del sistema nervioso central, contracciones musculares bruscas y eleva la presión arterial. Signos de intoxicación han sido producidos en ambientes con 5 % vol. durante 30 min de exposición; pocos minutos entre 7 y 10 % vol. de CO₂ conducen a la inconsciencia [40].

c. Óxidos de Nitrógeno

El concepto Óxidos de Nitrógeno (N_xO_y o, más habitualmente, NO_x) se aplica a los químicos gaseosos binarios con combinación de oxígeno y nitrógeno: trióxido de dinitrógeno (N₂O₃), tetraóxido de dinitrógeno (N₂O₄), pentaóxido de dinitrógeno (N₂O₅), N₂O, monóxido de nitrógeno (NO) y NO₂. Estos dos últimos son considerados los NO_x más importantes toxicológicamente, razón por la que en lo sucesivo el término NO_x será empleado para referirse sólo a ambos. Estos gases se encuentran de forma natural en el aire en una concentración de 10⁻¹⁰ a 10⁻⁶ % vol. [11], [13].

El NO es un gas incoloro, poco soluble en agua, de olor dulce penetrante, tóxico y que se oxida rápidamente. Tiende a entrar en la atmósfera como contaminante primario y posteriormente, a través de reacciones fotoquímicas, forma sales corrosivas o ácidos, pero principalmente se oxida a NO₂. Su principal fuente de emisión son las plantas de energía y los automóviles, lugar en el que 95% de los NO_x existe en forma de NO mientras el combustible está dentro de la unidad; más tarde, este gas en el aire puede convertirse en ácido nítrico (HNO₃) y precipitarse en forma de lluvia ácida [41].

El NO₂ es un gas café-rojizo de olor pungente, subproducto en procesos de combustión a altas temperaturas; entonces, su impacto es más fuerte en lugares con climas calurosos y durante el verano [11]. Las directrices de la OMS establecen su concentración media anual en el aire a 21.28 ppb y de 106.38 ppb durante un periodo máximo de 1 h [26]⁴; la normatividad local de la SSA estipula el límite de 210 ppb de NO₂ promedio por 1 h una vez al año [42].

La inhalación de NO conduce a dolor abdominal, irritación de los ojos y del tracto respiratorio, dolor de cabeza, somnolencia, ardor, náuseas, mareos, confusión, piel, labios o uñas azulados, dificultad para respirar, convulsiones, pérdida del conocimiento y la muerte. La exposición a corto plazo puede formar metahemoglobina (que tiene afinidad por el oxígeno, contrario a la COHb) [43]. El NO₂ es una sustancia corrosiva para la piel y el tracto respiratorio, donde también puede iniciar edema pulmonar. La exposición ocupacional por encima de 20 ppm causa la muerte, eleva el riesgo durante el embarazo y está considerado como carcinógeno [44].

En conjunto al O₃ y a los COV, los NO_x dan lugar al esmog fotoquímico, causante de una atmósfera neblinosa. La exposición prolongada a este esmog puede inducir la sintomatología anunciada. De acuerdo con diversos modelos, la deposición del NO₂ dentro del tracto respiratorio de roedores y de humanos son similares, pero la información es insuficiente para determinar la respuesta de los tejidos de varias especies a concentraciones diferentes. Con base en lo anterior, los resultados obtenidos en experimentos con animales permiten conocer los efectos tóxicos potenciales en humanos, pero no deducir a un nivel confiable las concentraciones que los producen [26].

⁴ 1 ppm de NO₂ equivale a 1880 µg m⁻³ de NO₂ [42].



Muchos de los esfuerzos para reducir la contaminación del aire, y a la vez los problemas ambientales y de salud pública asociados, van de la mano con las mejoras tecnológicas, que a su vez se reflejan en beneficios económicos y ambientales adicionales. Estas innovaciones están disponibles para hacer a los vehículos, la agricultura o las instalaciones industriales menos contaminantes; no obstante, su adopción puede llevar bastante tiempo. Por otra parte, los avances en su mitigación son superados por el rápido incremento en el número de unidades (*vgr.*: vehículos).

1.4 Contaminación Atmosférica por Fuentes Móviles

El aumento de la contaminación atmosférica está remarcado por la urbanización, especialmente en los países en desarrollo donde más del 90% de contaminantes aéreos se atribuyen a las emisiones vehiculares, principalmente por flotas de autos antiguos, la falta de mantenimiento, infraestructura inadecuada y la baja calidad de los combustibles; además, las barreras artificiales que rodean a las ciudades dificultan su dispersión. Esta problemática tiene un costo para los países en desarrollo de 5% del PIB; de 2% en los desarrollados [45].

La historia del automóvil comienza en 1769 con El Fardier del francés Nicolás-Joseph Cugnot (1725-1804), destinado a arrastrar piezas de artillería. En 1860, el belga Jean Joseph Etienne Lenoir (1822-1900) hizo funcionar el primer vehículo con un motor de combustión interna (MCI), convirtiéndose en el corazón de la ingeniería automotriz. En Viena, Siegfried Marcus (1831-1898) desarrolló el primer auto impulsado por gasolina en 1870, mientras que el motor diésel fue inventado por el francés Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) cuando trabajaba para la firma MAN en 1883, empresa que en 1897 produjo el primer auto de diésel. Hasta 1900 el automóvil había sido un objeto de fabricación artesanal y de costo prohibitivo. Las primeras empresas en iniciar producciones a una escala mayor fueron las francesas Panhard et Levassor (1889) y Peugeot (1891). Para 1913, el estadounidense Henry Ford (1863-1947) comenzó a manufacturar automóviles en una cadena de montaje, el cual consistía en armar automóviles sencillos y baratos, destinados al consumo masivo de las familias de clase media [46], [47].

Hoy en día, de acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA, *International Energy Agency*), existen en el mundo alrededor de 900 millones de vehículos ligeros (sin contar los de dos y tres ruedas); cifra que se duplicará en

menos de 40 años [48]. Con información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, se sabe que en 2013 México contó 1 vehículo de motor registrado en circulación por cada 4.30 habitantes; un dato alarmante es que ese mismo año por cada 7.10 habitantes transitó 1 vehículo particular, mientras que por cada 387135.10 habitantes sólo 1 camión de pasajeros estuvo disponible [49], [50]. Adicionalmente, en 2014 el país ocupó el octavo sitio como productor de vehículos y el cuarto como exportador a nivel mundial [51]. Este incremento en el número de vehículos, que al parecer es imparable, va más allá de poseer un medio de transporte y conlleva un conjunto de valoraciones, significaciones, emociones y creencias de la gente hacia este objeto. En estos imaginarios se encuentran la necesidad de seguridad, la facilidad de relacionarse con personas, y el reflejo de *status* social y bienestar económico [52].

Las fuentes móviles son parte de las invenciones más contaminantes. Una de las medidas para contrarrestar sus emisiones es el convertidor catalítico, que ha representado una de las historias de mayor éxito en el desarrollo de nuevas tecnologías para minimizar el impacto adverso sobre el medio.

1.4.1 El Motor de Combustión Interna

Un MCI es una máquina que adquiere movimiento mecánico directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de su cámara de combustión. Existen en diversas configuraciones. Los de tipo alternativo se dividen en ignición por chispa (ICH) o motor de Otto (en honor a su inventor), y en ignición por compresión (ICO) o motor de Diesel. Ambos están disponibles en ciclos de dos tiempos (M_2T ; admisión y expulsión) y de cuatro tiempos (M_4T ; admisión, compresión, combustión y expulsión). La energía en un motor Otto se obtiene a partir del encendido de la mezcla de combustible por una chispa, en el motor Diesel esto no es necesario, ya que la elevada presión sobre el aire provoca un aumento de su temperatura, aproximadamente 1173 K, que desencadena la combustión al inyectar diésel en forma de *espray*. La relación estequiométrica de aire y combustible (A:C) que debe presentar la mezcla de ignición en un motor de gasolina es de 14.70:1, mientras que en un motor de diésel es variable, siempre en combinaciones ricas de aire (*vgr.*: 17:10, 29:10 ó 30:10). La mezcla gaseosa en el escape de un MCI varía de acuerdo con diversos aspectos, como el tipo de motor, rapidez o aceleración durante el recorrido (Tabla 1.2) [47], [53].



TABLA 1.2
CARACTERÍSTICAS DE EMISIONES PARA DIFERENTES TIPOS DE MCI [54]

	Concentración en el gas de escape			
	Motor de ICO	M ₄ T de ICH		M ₂ T de ICH
A:C	≈ 26	≈ 14.7	≈ 17	≈ 14.7
Temperatura [K]	TA ^a -923	TA-1373 ^b	TA-1123	TA-1273
HC [ppm C ^c]	50-330	500-5000	≈ 1300	20,000-30,000
CO	300-1200 ppm	0.1-6 % vol.	≈ 1300 ppm	1-3 % vol.
NO _x [ppm]	350-1000	100-4000	≈ 1200	100-200
SO _x [ppm]	10-100	15-60	20	≈ 20
CO ₂ [% vol.]	7	10-13.5	11	10-13
PM	65 mg m ⁻³	-	-	-
O ₂ [% vol.]	10-15	0.2-2	4-12	0.2-2
H ₂ O [% vol.]	1.4-7	10-12	12	10-12
N ₂	El resto del efluente			

^a TA: Temperatura ambiente. ^b Catalizador ubicado más cerca del MCI. ^c ppm C: partes por millón de carbono.

Tanto los vehículos de gasolina como los diésel emiten HC, CO, NO_x, CO₂ y SO_x, principalmente SO₂; en el caso del motor de ICO se suma el PM fino en forma de hollín (contribuyente importante en el cambio climático y que puede ser inhalado profundamente en los pulmones) [53]. Los dispositivos actuales para su tratamiento no tienen un factor de conversión del 100%, por lo cual se necesitan desarrollar los lineamientos y tecnologías para su procesamiento completo. Existen numerosas medidas fructíferas relativas al sector transporte, como la priorización del transporte urbano, las sendas peatonales y de bicicletas en las ciudades, o la utilización de gasolinas con bajo contenido de azufre.

1.4.2 Tecnologías y Estrategias para el Control de Emisiones de Fuentes Móviles

Las tecnologías y medidas actuales enfocadas a la disminución de emisiones por fuentes móviles se clasificarán en cuatro grupos:

- modificaciones en su construcción (diseño),
- desarrollo y mejora de combustibles (pre-combustión),
- tratamiento de emisiones (post-combustión), y
- acciones sociales implementadas por los gobiernos.

a. Diseño

Como se observa en la Tabla 1.2, las temperaturas que llegan a alcanzar los MCI superan el millar de K. Para tomar ventaja

de esta situación y así ahorrar energía y combustible, con la consecuente disminución de emisiones, la investigación de la industria automotriz se extiende a incorporar materiales termoeléctricos (TEG, *thermoelectric generator*) capaces de transformar el calor en electricidad, ya sea desde el motor o del escape [55], [56]. Ikoma *et al.* [57] aplicó una celda TEG, de 20x20x9.2 mm³, capaz de generar 1.20 W con una diferencia de temperatura, entre los lados caliente y frío del módulo, de 563 K; con 72 unidades colocadas en el tubo de escape, obtuvo 35.60 W a una rapidez de 60 km h⁻¹. Esta propuesta tiene una eficiencia estimada de 11% respecto al flujo de emisiones primarias, ya que sólo procesó el 0.90% del calor de salida. Años más tarde Park *et al.* [58] desarrolló un TEG que genera >75 W en un vehículo que se desplazó a 80 km h⁻¹; 28 W durante el estado de reposo. Karri *et al.* disminuyó el consumo de combustible en 1.25% [59].

Informes de la IEA consideran el potencial que representa sustituir el metal en los automóviles por alternativas más ligeras, cambio que reduciría 10% el consumo de combustible [60].

Una nueva tendencia en el diseño son los vehículos eléctricos (VE), que engloban a los de batería (VEB), a los de celdas de combustible (VEC) y a los híbridos (VEH). Las tecnologías que emplean hacen posible la nulidad de emisiones sin reducir su desempeño. En la Tabla 1.3 se destacan sus características principales.



TABLA 1.3
CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS [61]

Tipo de VE	VEB	VEC	VEH
Propulsión		Motor eléctrico.	<ul style="list-style-type: none"> • Motor Eléctrico. • MCI.
Sistema de Energía	<ul style="list-style-type: none"> • Batería. • Ultracapacitor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Celda de combustible. • Hidrógeno. • Metanol, etanol o gasolina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Batería. • Ultracapacitor. • Gasolinas.
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Cero emisiones. • Independencia total de combustibles fósiles. • Distancias de recorrido de 100 a 200 km. • Costo elevado. • En muchos lugares requiere de la implementación de infraestructura nueva. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra bajas emisiones. • Eficiencia energética alta. • Independencia total de combustibles fósiles. • Distancias de recorrido largas. • Costo elevado. • Desarrollo en investigación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bajas emisiones. • Distancias de manejo largas. • Dependencia de combustibles fósiles. • Infraestructura disponible (estaciones de servicio).

b. Pre-combustión

El contenido de compuestos sumamente tóxicos en los combustibles fósiles ha venido disminuyéndose por las exigencias de los acuerdos internacionales. Las gasolinas han sido una de las fuentes de exposición al plomo más importantes por su biodisponibilidad en forma de tetraetilo de plomo. Hacia 1992, en México, el contenido de plomo en la gasolina Nova (que ya no se produce) era de 8 % vol., pero un año antes Pemex ya había lanzado al mercado la gasolina sin plomo Magna Sin (hoy Magna), como respuesta adicional a la introducción del catalizador [62]. De igual forma, Pemex cuenta en su catálogo con diésel ultra bajo en azufre (UBA, 15 mg kg⁻¹ de S) [63] y con gasolina de bajo contenido de azufre, que también es conocida como Pemex Premium Zona Metropolitana del Valle de México [64]. Normalmente los compuestos azufrados no se eliminan en tratamientos de post-combustión, ya que la única manera eficaz es reducirlos a azufre elemental, propenso a acumularse en el sistema. Por consiguiente, es preferible minimizar las emisiones de azufre al disminuir su contenido desde el combustible [54].

Las siguientes técnicas pre-combustión son reportadas en el Estudio de Tecnologías de Control de Emisiones en Vehículos Pesados para la Comisión Europea [65]:

- **Aditivos orgánicos e inorgánicos.** Mejoran la calidad del diésel convencional a base de nuevas formulaciones que ofrecen mejor desempeño ambiental.
- **Catalizador líquido.** Consiste en dosificar una pequeña

proporción de platino (Pt) en la línea de combustible diésel, justo antes de entrar al motor. Ofrece: 1) reducción de emisiones de CO del 60%, 66% para HC, 27% para NO_x y de la opacidad en 80%, 2) reducción en el consumo de combustible de entre 8 y 10 %, y 3) incremento del 16% de potencia.

- **Combustibles de bajo azufre (150 y 50 ppm).** Reducen las emisiones de CO, HC y NO_x en vehículos de gasolina equipados con catalizadores, y también las emisiones de PM en vehículos de diésel con o sin catalizadores de oxidación.
- **Combustibles de ultra bajo azufre (de 10 a 15 ppm).** Permiten el uso de equipo de absorción de NO_x e incrementa su control hasta niveles >90%, tanto en vehículos de diésel como de gasolina. Posibilitan diseños de motores más eficientes.

c. Post-combustión

Los motores a diésel son 59% más eficientes en el uso de combustible que los motores equivalentes que usan gasolina [47]; sin embargo, contribuyen de manera significativa en las emisiones de NO_x y PM, subproductos que en años recientes se han reducido, desde la fuente, a menos de la mitad con la incorporación de los dispositivos siguientes [65], [66] (Figura 1.2):

- **Catalizadores de oxidación para vehículos diésel.** Estos catalizadores oxidan el CO y los HC, así como la fracción



orgánica soluble de las partículas, para formar CO_2 y H_2O en presencia del exceso de oxígeno que se encuentra a la salida del escape. Reducen del 90 al 100 % los HC, del 88 al 99 % el CO, y del 15 al 31 % el PM.

- **Filtros de partículas.** Los filtros de regeneración continua y los filtros catalizados demuestran eficiencias del 90 al 99 % para la remoción de partículas, cuando se usan en conjunto con combustible de UBA, alcanzan niveles de emisión inferiores a los de vehículos de gasolina. Su eficiencia tiende a cero cuando se utiliza diésel con un contenido de 350 ppm de S. Reducen del 58 al 82 % los HC, y del 90 al 99 % el CO.
- **Trampas de almacenamiento de NO_x .** Estos catalizadores funcionan de manera similar al convertidor catalítico para vehículos de gasolina, pero conjuntamente almacenan de manera muy eficiente el SO_2 en forma de SO_4^{2-} . Eventualmente se saturan y sus temperaturas de regeneración se elevan. Reducen del 78 al 94 % las emisiones de NO_x (Figura 1.2.a).
- **Reducción catalítica selectiva (RCS).** Es el método más usado en el mundo para el cumplimiento de las norma ISO 22241. La RCS utiliza un agente reductor (generalmente urea al 32.5%, nombre comercial: AUS32 [67]) que se inyecta a los gases de escape antes de su paso por el catalizador, para alcanzar una conversión mayor de NO_x a N_2 . Adicionalmente, se instala en serie un catalizador de oxidación para evitar que se forme amoníaco a partir de la urea. Reduce de 80 a 90 % los NO_x (Figura 1.2.b).
- **Recirculación de gases de salida.** Disminuye simultáneamente la temperatura de combustión y la formación de NO_x . La desventaja está en la disminución de su durabilidad y confiabilidad por la presencia de H_2SO_4 formado al enfriar los gases de salida para introducirlos al sistema de recirculación.
- Sumado a lo anterior, las modificaciones al MCI buscan reducir la temperatura del motor para disminuir la cantidad de NO_x generados a temperaturas $>10^3$ K.

Sin duda alguna, el parteaguas en el control de emisiones se dio en 1975, en Estados Unidos de Norte América, cuando fue anunciado el convertidor catalítico (CC, Figura 1.2.c). Además, en 1976 las empresas Volvo y Saab incorporaron la

Sonda Lambda (λ) de Robert Bosch GmbH: un transductor de oxígeno que aproxima la A:C a su nivel ideal o, dicho de otra forma, mantiene el Parámetro Lambda cercano a la unidad ($A:C=14.70$ y $\lambda=1$, condiciones necesarias para el desempeño correcto del CC); esto es posible gracias a la inyección electrónica de combustible. Por un lado, la λ monitorea la diferencia de oxígeno a la salida del CC, con respecto a la entrada, y envía una señal de voltaje a un microcontrolador para que se autoajuste la A:C [68].

Exteriormente el catalizador es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa metálica antitérmica. En su interior contiene un soporte cerámico o monolito, de forma oval o cilíndrica, con una densidad de ~ 70 celdas cm^{-2} en forma de panal. Su superficie se encuentra impregnada con una resina que contiene metales nobles que funcionan como catalizadores que permiten la oxidación (Pt y paladio (Pd)) y la reducción (rodio (Rh)) [54].

La función inicial del CC fue oxidar el CO y los HC, ayudado por el Pt y/o el Pd (llamados CC oxidantes o de dos vías). En etapas posteriores aparecieron los catalizadores de tres vías (CTV) para reducir los NO_x en un bloque previo a la oxidación mediante la inyección de aire, procesos que requieren combinaciones de Pd y/o Pt con Rh y un $\lambda \equiv 1$, condiciones con las que idealmente debería exhalar únicamente vapor de agua, N_2 y CO_2 . Debido a las características propias del sistema de control digital, existe un tiempo de retraso asociado al ajuste de la A:C, que conlleva a una perturbación en la cual $\lambda \neq 1$ y a una mayor emisión de contaminantes. Para solucionar el problema se desarrollaron mezclas de óxidos de cerio y zirconio (CeO_2 y ZrO_2) para liberar y absorber O_2 durante estas alteraciones [68], [69].

La eficiencia del CC está en función de la temperatura, (Figura 1.2.d) cerca de los 573 K comienza el estado estacionario de la catálisis, iniciándose con la conversión de CO, seguida por la de los HC y los NO_x . Una vez que el CTV se encuentra a su temperatura normal de operación (623 K), las reacciones químicas comienzan a ocurrir más rápido. A la temperatura donde se logra una eficiencia de conversión de 50% para cada contaminante se le conoce como temperatura *light-off* (TLO); arriba de los 10^3 K el catalizador pierde eficiencia, acelera su envejecimiento y puede llegar a fundirse el material de soporte [70].

Actualmente, los catalizadores oxidantes son utilizados en vehículos diésel y los de tres vías en autos de gasolina.



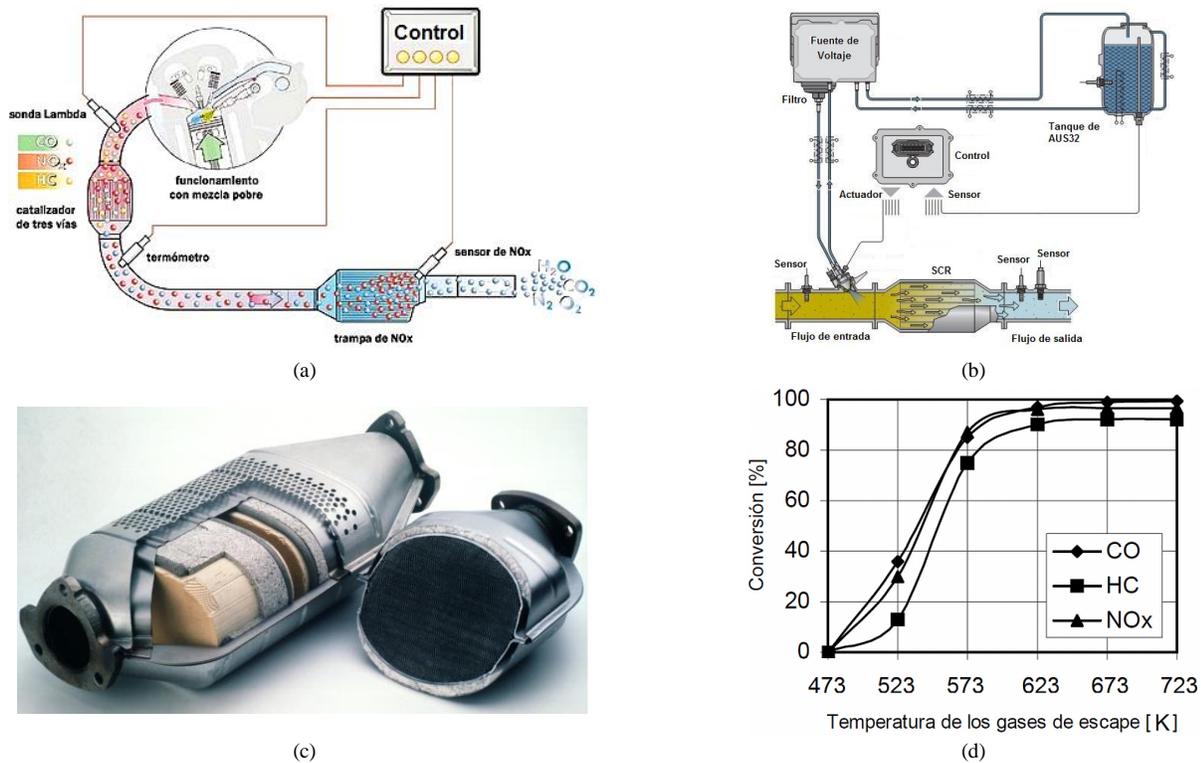


Figura 1.2. Tecnologías para el tratamiento de emisiones. (a) Trampa de almacenamiento de NO_x [71]. (b) Dispositivo para RCS [72]. (c) CTV [73]. (d) Evolución en la eficiencia de conversión del convertidor catalítico en referencia a la temperatura [70].

La A:C se ha mejorado en automóviles compactos, los modelos Nissan March® y Chevrolet Spark® operan a una relación de 9.8:1 [74], [75]. Esto es reflejado en menores emisiones de NO_x, pues la cantidad de aire se reduce 44%.

Asimismo, existen en la literatura numerosas publicaciones acerca de las descargas eléctricas (plasma) aplicadas en procesos de post-combustión, donde son resaltados los beneficios de esta tecnología: tratamiento simultáneo de emisiones, poca sensibilidad a envenenamiento por azufre, bajo consumo de potencia y la posibilidad de no generar subproductos.

d. Acciones Sociales

La Ciudad de México (DF), una de las más grandes en el mundo [76], ha implementado planes y programas sociales para contrarrestar la cantidad de emisiones. En 2010 se sumó a la lista de ciudades que integran una Estrategia de Movilidad en Bicicleta; desde entonces ha crecido más de 200%, con un total de 3600 bicicletas en un área de 21 km² [77]. En otro aspecto, entre el 45 y 50 % de la matrícula en escuelas privadas de nivel básico acude en automóvil particular y en promedio cada uno transporta a un alumno,

esto ocasiona que a la hora de entrada y salida de los estudiantes los vehículos destinados representen del 20% al 25% del total de vehículos circulando en ese momento, razón por la que el gobierno formuló un Programa de Transporte Escolar para mejorar la movilidad y la calidad del aire en la ciudad [78]. A pesar de las negativas de la población, una de las tácticas de mayor éxito es el Programa Hoy No Circula (que al parecer es exclusivo de la Nación), cuyo objetivo es establecer medidas aplicables a la circulación vehicular para prevenir, minimizar y controlar las emisiones de fuentes móviles que circulan en el DF, mediante la restricción de su circulación [79].

Estas y otras medidas tienen su origen o son replicadas en diferentes ciudades del mundo, como campañas para compartir el auto, utilizar el transporte público (metro o autobús), caminar las distancias cortas, transferir los centros de trabajo o contratar personal de las cercanías, etc. [80].

1.5 Conclusiones

Se realizó un estudio bibliográfico de los contaminantes atmosféricos por fuentes móviles, con énfasis en los



problemas ambientales y de salud pública que ocasionan el dióxido de azufre y los óxidos de carbono y nitrógeno.

El equilibrio natural de la composición de la atmósfera se ha perdido como consecuencia de la demanda de productos y el uso inadecuado de los recursos naturales, procesos iniciados en la Revolución Industrial; con ello, padecimientos a la salud se han manifestado y agudizado en sitios con índices elevados de contaminantes e incluso fuera de ellos debido al acarreo aéreo.

La mayoría de las fuentes de contaminación del aire exterior están más allá del control de la población, y requiere de medidas institucionales en el sector de transportes, en la gestión de residuos energéticos, en la agricultura o en cualquier otra fuente de emisiones, ya que las personas que están expuestas a aire contaminado aumentan el riesgo a padecimientos crónicos y agudos.

Como parte de la solución nace el concepto Ciencias Ambientales, que se define como el compendio de todas las disciplinas científicas existentes; enfocado a estudios generalistas en los que se tratan aspectos de biología, química, geología, medicina, ingeniería, matemáticas, física, sociología, política, administración o legislación, con el fin de que los recursos humanos incluidos den respuestas desde una perspectiva, primeramente, interdisciplinaria y multidisciplinaria, y finalmente, transdisciplinaria.

1.6 Literatura Citada

- [1] McKibben, B. (1989). *El Fin de la Naturaleza*. Ediciones B, ISBN 9788440614186.
- [2] ONU (2012, 7 de diciembre). Resolución 1346 (XLV). Cuestión de la Convocación de una Conferencia Internacional sobre los Problemas del Medio Humano. Recuperado de daccess-dds-ny.un.org/doc/RESOLUTION/GEN/NR0/592/83/IMG/NR059283.pdf?OpenElement.
- [3] UNEP (2012, 8 de diciembre). Report of the United Nations Conference on the Human Environment. Recuperado de www.unep.org/Documents.Multilingual/Default.asp?DocumentID=97.
- [4] UN (2012, 12 de diciembre). Report of the World Commission on Environment and Development. Recuperado de daccess-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N87/184/67/IMG/N8718467.pdf?OpenElement.
- [5] PNUMA (2006). *Manual del Protocolo de Montreal Relativo a las Sustancias que Agotan la Capa de Ozono*, 7ª edición. UNON, ISBN 9789280727708.
- [6] UN (2012, 11 de diciembre). Conference on Environment and Development. Recuperado de www.un.org/geninfo/bp/enviro.html.
- [7] UN (1998). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas, ID: GE.05-61702.
- [8] UE (2012, 11 de diciembre). Protocolo de Kyoto sobre el Cambio Climático. Recuperado de europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/128060_es.htm.
- [9] Catton, W. R. (2010). *Rebasados. Las Bases Ecológicas para un Cambio Revolucionario*. Océano, ISBN 9786074002966.
- [10] Adams, W. C. (1993). Measurement of Breathing Rate and Volume in Routinely Performed Daily Activities. Final Report. EPA, ID: 077086.
- [11] Manahan, S. E. (2009). *Environmental Chemistry*, 9ª Edition. CRC Press, ISBN 9781420059229.
- [12] Johnson, D. L., *et al.* (1997). Meanings of Environmental Terms. *Journal of Environmental Quality*, DOI: 10.2134/jeq1997.00472425002600030002x.
- [13] Manahan, S. E. (2009). *Fundamentals of Environmental Chemistry*, 3ª Edition. Taylor & Francis, ISBN 9781420052671.
- [14] Molina, M. J. y Rowland, F. S. (1974). Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalysed Destruction of Ozone. *Nature*, DOI: 10.1038/249810a0.
- [15] Gobierno de México (2014, 2 de febrero). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (DOF 16-01-2014). Recuperado de www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf.



- [16] PNUMA (2013). Informe Anual de 2013. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, ISBN 9789280733891.
- [17] UNEP (2014, 3 de enero). Observed Concentrations of CO₂ Cross 400 parts per million Threshold at Several Global Atmosphere Watch Stations. Recuperado de www.unep.org/newscentre/default.aspx?DocumentID=2716&ArticleID=9503.
- [18] USEPA (2013, 15 de diciembre). Calidad del Aire Fronterizo. Recuperado de www.epa.gov/ttnca1/cica/help/haqshaps_s.html.
- [19] INECC (2013, 15 de diciembre). Contaminantes Criterio. Recuperado de www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/523-calair-cont-criterio.
- [20] INECC (2013, 15 de diciembre). Fuentes de Contaminación del Aire. Recuperado de www.inecc.gob.mx/calair-informacion-basica/537-calair-fuentes#3.
- [21] UNEP (2014). UNEP Year Book 2014: Emerging Issues in Our Global Environment. United Nations Environment Programme, ISBN 9789280733815.
- [22] WHO (2013, 9 de diciembre). Calidad del Aire (Exterior) y Salud. Recuperado de www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/.
- [23] WHO (2013, 10 de diciembre). Air Pollution. Recuperado de www.who.int/topics/air_pollution/en/.
- [24] Gobierno de México (2014, 7 de agosto). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (DOF 07-07-2014). Recuperado de www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/htm/1.htm.
- [25] Gobierno de México (2014, 7 de agosto). Ley General de Cambio Climático (DOF 07-05-2014). Recuperado de www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf.
- [26] OMS (2006). Guías de Calidad del Aire de la OMS Relativas al Material Particulado, el Ozono, el Dióxido de Nitrógeno y el Dióxido de Azufre. Organización Mundial de la Salud, ID: WHO/SDE/PHE/OEH/06.02.
- [27] Taylor, G. E. y Murdy, W. H. (1975). Population Differentiation of an Annual Plant Species, *Geranium Carolinianum*, in Response to Sulfur Dioxide. *Botanical Gazette*, DOI: 10.1086/336805.
- [28] Nemery, B., *et al.* (2001). The Meuse Valley Fog of 1930: an Air Pollution Disaster. *The Lancet*, DOI: 10.1016/S0140-6736(00)04135-0.
- [29] Schrenk, H. H., *et al.* (1949). Air Pollution in Donora, Pa. Epidemiology of the Unusual Smog Episode of October 1948. Preliminary Report. *Public Health Bulletin*, ID: 306.
- [30] Bell, M. L. y Davis, D. L. (2001). Reassessment of the Lethal London Fog of 1952: Novel Indicators of Acute and Chronic Consequences of Acute Exposure to Air Pollution. *Environmental Health Perspectives*, ID: PMC1240556.
- [31] Secretaría de Salud (2013, 3 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-1993. Recuperado de www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/022ssa13.html.
- [32] USDHHS (2013, 17 de agosto). Toxicological Profile for Sulfur Dioxide. U.S. Recuperado de www.atsdr.cdc.gov/ToxProfiles/tp116.pdf.
- [33] NLM (2013, 17 de agosto). Toxicology Data Network. Sulfur Dioxide. Recuperado de toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/a?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+228.
- [34] IUPAC (2013, 21 de agosto). Oxocarbons. Recuperado de goldbook.iupac.org/O04375.html.
- [35] NLM (2013, 16 de agosto). Carbon Dioxide. Recuperado de toxnet.nlm.nih.gov/text_version/chemicals.php?id=6.
- [36] USEPA (2013, 15 de agosto). Carbon Monoxide. Recuperado de www.epa.gov/airquality/carbonmonoxide/.
- [37] Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2013, 15 de agosto). Directiva sobre los Valores Límite para el Benceno y el Monóxido de Carbono en el Aire Ambiente. Diario Oficial de las Comunidades Europeas, ID: 2000/69/CE.
- [38] Secretaría de Salud (2013, 3 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993. Recuperado de www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/021ssa13.html.
- [39] NLM (2013, 12 de agosto). Toxicology Data Network. Carbon Monoxide. Recuperado de toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/f?/temp/~fzDG5I:3.
- [40] NLM (2013, 13 de agosto). Toxicology Data Network. Carbon Dioxide. Recuperado de toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/r?dbs+hsdb:@term+@rn+124-38-9.
- [41] USEPA (2008). Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen — Health Criteria. Anexes. United States Environmental Protection Agency, ID: EPA/600/R-08/072.
- [42] Secretaría de Salud (2013, 3 de marzo). Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993. Recuperado de www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/023ssa13.html.
- [43] NIOSH (2013, 29 de abril). International Chemical Safety Cards. Nitrogen Oxide. Recuperado de www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng1311.html.
- [44] NIOSH (2013, 29 de abril). International Chemical Safety Cards. Nitrogen Dioxide. Recuperado de www.cdc.gov/niosh/ipcsneng/neng0930.html.
- [45] UNEP (2013, 17 de diciembre). Urban Air Pollution. Recuperado de www.unep.org/urban_environment/issues/urban_air.asp.
- [46] DK Publishing (2011). *Car: The Definitive Visual History of the Automobile*. Penguin, ISBN 9780756689384.
- [47] Mollenhauer, K. y Tschöke, H. (2010). *Handbook of Diesel Engines*. Springer, ISBN 9783540890829.
- [48] IEA (2014). *Energy Technology Perspectives 2014. Harnessing Electricity's Potential*. International Energy Agency, ISBN 9789264208001.
- [49] INEGI (2014, 3 de enero). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado de www.inegi.org.mx/.
- [50] INEGI (2014, 3 de enero). Vehículos de Motor Registrados en Circulación. Recuperado de www.inegi.org.mx/est/lista_cubos/consulta.aspx?p=adm&c=8.
- [51] Secretaría de Economía (2014, 7 de agosto). Se Consolida México como Productor en el Sector Automotriz a Nivel Mundial. Recuperado de www.economia.gob.mx/eventos-noticias/informacion-relevante/7670-boletin091-12.
- [52] Preciado, K. (2011). *Los Imaginarios Sociales sobre los Objetos Tecnológicos en la Sociedad Moderna*. Tesis de Maestría. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Jalisco.
- [53] Schmer, R. (2000). *The Motor Gasoline Industry: Past, Present & Future*. DIANE Publishing, ISBN 9780788187360.
- [54] Kašpar, J., *et al.* (2003). Automotive Catalytic Converters: Current Status and Some Perspectives. *Catalysis Today*, DOI: 10.1016/S0920-5861(02)00384-X.
- [55] Yang, J. (2005). Potential Applications of Thermoelectric Waste Heat Recovery in the Automotive Industry. *ICT 2005*, DOI: 10.1109/ICT.2005.1519911.
- [56] Tak, M. y Setia, M. (2012). Converting Waste Heat from Automobiles to Electrical Energy. *IPEMC 2012*, DOI: 10.1109/IPEMC.2012.6259167.
- [57] Ikoma, K., *et al.* (2003). Regulator Controls Rate of Heat Production of the Heat Source and/or the Cooling Power of a Cooler for the Thermal Generator to Keep the Output Voltage in Suitable Range such as for Charging a Battery; Electric, Hybrid Cars. Patente, US6605773B2.



- [58] Park, S., *et al.* (2010). A Thermoelectric Generation Waste Heat Recovery System Using Engine Coolant for Light-Duty ICE Vehicles. ICEMS 2010, DOI: ND.
- [59] Karri, M. A., *et al.* (2011). Exhaust Energy Conversion by Thermoelectric Generator: Two Case Studies. Energy Conversion and Management, DOI: 10.1016/j.enconman.2010.10.013.
- [60] IEA (2013, 14 de noviembre). Advanced Transport Materials. Recuperado de www.iea.org/techinitiatives/end-use-transport/advancedmaterialsfortransportation/.
- [61] Chan, C. C. (2002). The State of the Art of Electric and Hybrid Vehicles. Proceedings of the IEEE, DOI: 10.1109/5.989873.
- [62] INECC (2013, 15 de noviembre). Aspectos Relevantes sobre el Plomo. Recuperado de www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/314/aspectosrelevantes.html.
- [63] Pemex (2013, 15 de noviembre). Hoja de Datos de Seguridad de Sustancias. Pemex-Diésel UBA (1). Recuperado de www.pemex.com/productos/Documents/pemex_diesel_uba_110201.pdf.
- [64] Pemex (2013, 15 de noviembre). Hoja de Datos de Seguridad de Sustancias. Pemex Premium (1) ZMVM. Recuperado de www.pemex.com/productos/gasolinas_refinados/Documents/Productos/pemex_premium_110201.pdf.
- [65] EC-ENTR (2002). Study on Emission Control Technology for Heavy-Duty Vehicles. European Commission, ID: ETD/00/503430.
- [66] Semarnat (2013, 6 de octubre). Evaluación del Convertidor Catalítico de Oxidación en Vehículos a Diesel, Car Sound/Magnaflow Serie 60000 Modelo 60011, (Reporte de Opacidad, Contrapresión y Temperatura). Recuperado de web2.semarnat.gob.mx/informacionambiental/publicaciones/Publicaciones/EVALUACION%20DE%20CONVERTIDOR%20CATALITICO%20DIESEL.pdf.
- [67] Petrochemistry (2013, 15 de septiembre). Solución de Urea 32.5% Grado Automoción (Ahora y en Adelante Denominada AUS32) Según la Norma ISO 22241. Guía para el Aseguramiento de la Calidad. Recuperado de www.petrochemistry.eu/ftp/pressroom/QAGD_ES_203%200.pdf.
- [68] Schäfer, F. y Van Basshuysen, R. (1995). Reduced Emissions and Fuel Consumption in Automobile Engines. Springer, ISBN 9783211827185.
- [69] Shelef, M. y McCabe, R. W. (2003). Twenty-Five Years After Introduction of Automotive Catalysts: What Next? Catalysis Today, DOI: 10.1016/S0920-5861(00)00407-7.
- [70] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile (2013, 7 de abril). Análisis de Normas de Homologación y Recambio de Convertidores Catalíticos. Recuperado de www.sistemas-sustentables.com/archivos/file/Final%20Reports/Informe%20Final%20Cataliticos.pdf.
- [71] km77 (2014, 7 de enero). Inyección Directa y Mezcla Pobre con un Coste muy Alto. Recuperado de www.km77.com/marcas/volkswagen/lupo_01/fsi/0primera/sumario2.asp.
- [72] Industria Automotriz de Venezuela (2014, 7 de enero). Camión del Año 2009 en Europa: Mercedes Benz Actros. Recuperado de industriaautomotrizdevenezuela.com/blog/2009/07/06/camion-del-ano-2009-en-europa-mercedes-benz-actros/.
- [73] Clásicos al Volante (2014, 7 de enero). Opel Celebra el 25 Aniversario como Pionera en el Uso de Catalizadores. Recuperado de www.clasicosalvolante.es/opel-celebra-el-25-aniversario-como-pionera-en-el-uso-de-catalizadores/.
- [74] Nissan (2014, 7 de enero). Nissan March 2014. Ficha Técnica. Recuperado de web.nissan.com.mx/march/.
- [75] Arpem (2014, 7 de enero). Chevrolet Spark 1.0 68 Cv. Recuperado de www.arpem.com/coches/coches/chevrolet/spark/modelos-09/chevrolet-spark-10-68.html.
- [76] UN (2014, 24 de febrero). World Urbanization Prospects, the 2011 Revision. Recuperado de esa.un.org/unup/CD-ROM/Urban-Agglomerations.htm.
- [77] SEDEMA (2014, 24 de febrero). Movilidad en Bicicleta. Recuperado de www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/movilidad-sustentable/movilidad-en-bicicleta.
- [78] SEDEMA (2014, 24 de febrero). Movilidad Escolar. Recuperado de www.sedema.df.gob.mx/sedema/index.php/movilidad-sustentable/movilidad-escolar.
- [79] SEDEMA (2014, 20 de junio). Decreto por el que se Expide el Programa Hoy No Circula en el Distrito Federal. Recuperado de www.sedema.df.gob.mx/sedema/images/archivos/verificacion-hoy-no-circula/godf20140619programa-hoy-no-circula.pdf.
- [80] Ministerio de Empleo y Seguridad Social, España (2014, 21 de junio). Plan Tipo de Seguridad Vial en la Empresa. Recuperado de www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Instituto/Noticias/Noticias_INSHT/2012/ficheros/GuiaMetodo%20seguridad_vial_empresa.pdf



CAPÍTULO

2

PLASMA FRÍO: DESCARGAS DE BARRERA DIELECTRICA

2.1 Introducción

Sólido-líquido-gas es una secuencia conocida de los estados de agregación de la materia al considerar aumentos graduales de energía cinética de las moléculas que la componen. Desde la rigidez y orden de un sólido se pueden romper totalmente sus uniones para que cada molécula se mueva libremente hasta formar un gas, medio que generalmente se comporta como un aislante eléctrico. Para producir conductividad eléctrica en un gas es necesario aplicarle una cantidad de energía que disocie sus moléculas en los átomos que las componen y extraer a los electrones de sus estados fundamentales de energía para llevarlos a niveles superiores: generar un flujo de partículas cargadas para que el gas adquiera carga eléctrica (polarizarlo). A esta materia ionizada se le conoce como plasma, constituida por fotones (con espectro de emisión determinado por el tipo de átomos, moléculas e iones que lo forman), átomos y moléculas (partículas eléctricamente neutras) e iones, electrones y radicales (portadores de carga eléctrica positiva o negativa). Comúnmente los plasmas se obtienen mediante la aplicación de un campo eléctrico, por compresión adiabática, al incidir un rayo intenso de fotones o al transferir energía por colisiones atómicas; la energía eléctrica se usa a menudo en aplicaciones industriales y de laboratorio por ser económica y técnicamente más viable [1].

Los estudios de fenómenos naturales en el planeta han revela

do que las flamas, los rayos, las auroras, la ionosfera y las descargas eléctricas en la alta atmósfera son tipos distintos de plasmas naturales; más allá de la atmósfera, existe plasma en el Sol y las demás estrellas, en el viento solar, en la cola de los cometas y en el espacio interestelar.

El plasma ofrece ventajas remarcadas que lo hacen atractivo en la práctica, en las que destaca que:

1. su temperatura y densidad energética pueden exceder aquellas presentes en procesos convencionales,
2. es capaz de producir grandes concentraciones de energía y de especies químicamente activas,
3. puede estar en desequilibrio termodinámico con elevada concentración de especies electroquímicas, pero mantiene el sistema general a temperatura ambiente, y
4. logra resultados de manera más eficiente y barata, como en el recubrimiento de materiales para aumentar su dureza y resistencia, o en la reducción de consumo eléctrico de luminarias [1], [2].

Las aplicaciones tecnológicas del plasma encuentran lugar en la generación de nanopartículas, deposición de películas finas, esterilización de materiales, deposición y grabado de semiconductores, en fuentes de iluminación, televisores, láseres y, recientemente, en aplicaciones médicas (*vgr.*: apoptosis de melanoma).



2.1.1 Historia del Plasma

Aunque para muchos autores puede diferir el momento exacto del comienzo de estudios formales del plasma, en este caso se situará en 1705 con la construcción de una lámpara de descargas a partir de un gas por el inglés Francis Hauksbee (1666–1713); con base en este fenómeno luminoso, más tarde se desarrollaron la lámpara de neón, el tubo fluorescente, la lámpara de vapor de mercurio, la de sodio, la de haluro metálico, la de luz de Wood o luz negra, entre otras [3] [4]. A partir de 1747 Benjamin Franklin (1706-1790) inicia estudios de fenómenos eléctricos y para 1752 realizó su famoso experimento con la cometa: hizo volar hacia una tormenta una cometa con esqueleto de metal atada a una llave metálica con hilo de seda; confirmó que la llave adquirió carga, demostró que las nubes están cargadas de electricidad y que los rayos son descargas eléctricas (plasma). Gracias a este experimento creó el pararrayos [5].

En 1808 se presentan los experimentos del Padre de la Electroquímica Sir Humphry Davy (1778-1829) acerca de la descarga de arco de CD en estado estacionario, seguido por Michael Faraday (1771-1867) que presentó su tubo de descargas eléctricas de alta tensión de CD en la década de 1830. El plasma es identificado como estado de agregación hasta 1879 por Sir William Crookes (1832-1919) [1].

La historia del plasma está remarcada en 1928, año en el que la palabra Plasma se utilizó en primera ocasión en [6] por el Premio Nobel de Química 1932 Irving Langmuir (1881-1957) cuando trabajaba para General Electric Co., donde estudió dispositivos electrónicos basados en gases ionizados. La forma en que los fluidos electrificados transportaban electrones de alta velocidad, iones e impurezas, le recordaron a Langmuir la forma en que el plasma sanguíneo transporta los glóbulos y los gérmenes, según cuenta su colaborador Harold M. Mott-Smith [7]. Este hecho provocó que las revistas médicas solicitaran a los autores cambiar sus publicaciones por la confusión de términos.

Las investigaciones sobre el plasma se desarrollaron progresivamente, de las cuales tres fueron especialmente significativas [8], [9]:

1. el descubrimiento de la ionosfera, la capa natural de plasma en la atmósfera;
2. se mostró que gran parte del universo está formado de plasmas, ahora se sabe que más del 99% del universo está presente en este estado de agregación; y
3. la fusión termonuclear y la bomba atómica, que necesita

temperaturas y presiones similares a las que se dan en el centro del Sol y, por lo tanto, de materiales que soporten esas condiciones; sin embargo, dado que el gas a tales temperaturas se convierte en plasma, surgió la idea de confinarlo dentro de un campo magnético sin tocar realmente ninguna pared material.

El último punto se ha propuesto como una alternativa en la generación de energía verde y recientemente se ha publicado la ganancia de energía por fusión nuclear de hasta 40% [10].

A la fecha, los estudios del plasma se dividen en tres disciplinas:

1. Física de Plasmas: se ocupan de las leyes básicas y los procesos que rigen su comportamiento. Dos importantes subáreas son la magnetohidrodinámica, que investiga el comportamiento de los fluidos conductores de electricidad en presencia de campos magnéticos; y la electrohidrodinámica, que estudia el comportamiento de los fluidos cargados eléctricamente (o partículas en campos eléctricos);
2. Química de Plasmas: se ocupa de las reacciones que pueden implicar únicamente al plasma o en las que el plasma interactúa con sólidos, líquidos o gases; e
3. Ingeniería de Plasmas: se ocupa de las aplicaciones en dispositivos o procesos industriales [1].

2.1.2 Tipos de Plasma

Clasificar la diversidad de plasmas es una tarea arriesgada por no existir una cualidad específica que sirva de criterio único. Generalmente se atiende al equilibrio termodinámico local, es decir, a si la temperatura o energía media de las especies (T_g) es o no la misma para cada tipo de partícula.

Los plasmas en equilibrio termodinámico, térmicos o calientes son aquellos en los que la temperatura de los electrones (T_e) y las partículas pesadas (átomos, iones, partículas neutras y moléculas, T_g) es similar. Como ejemplos están los plasmas producidos en el núcleo (alejado de las paredes) de los dispositivos de fusión termonuclear, o en el caso más práctico: el arco eléctrico [11]. Debido a las temperaturas promedio altas que llega a alcanzar ($>10^4$ K), el plasma térmico tiene la capacidad de convertir en vitrificados inertes a los compuestos que entran en contacto con él [12], [13]. Una de sus aplicaciones recientes se enfoca a la gasificación de biomasa, carbón y desperdicios municipales para producir nuevas fuentes de energía como el gas sintético (*syngas*, CO y H₂) [14], [15]. En el área aeroespacial se ha



empleado para simular la temperatura de reentrada a la Tierra y probar la capacidad del escudo térmico en los transbordadores espaciales [16]; también, para reformar desechos radiactivos: se mezclan con partículas de vidrio, se exponen a antorchas de plasma y se calientan para producir un vidrio fundido que atrapa los elementos radiactivos y evita que se muevan a través del aire o se combinen en aguas subterráneas por lixiviación [17].

Los plasmas fuera de equilibrio termodinámico, no térmicos o fríos (identificados en la bibliografía como NTP, *non-thermal plasma*) se caracterizan por la divergencia alta en las energías de sus electrones libres y especies pesadas. Generalmente, la temperatura de las partículas pesadas permanece cercana a la ambiente, mientras que la de los electrones comprende el orden de 10^4 K [18]. La lista de sus aplicaciones incluye: focos fluorescentes, televisores planos, motores para propulsión espacial, la medicina (existe un campo emergente llamado *plasma medicine*), el tratamiento de superficies (erosión, depósito y alteración fisicoquímica), la fabricación de nanomateriales y nanoestructuras, la nanolitografía para fabricar chips electrónicos, entre otras [19], [20].

Por mencionar una aplicación específica, en el sector automotriz la empresa estadounidense Federal-Mogul desarrolla su Sistema Avanzado de Encendido por Corona (ACIS, *Advanced Corona Ignition System*) para reemplazar a las bujías. ACIS se basa en descargas corona (NTP) generadas mediante pulsos con duración de 10^{-9} a 10^{-6} s. Con esta tecnología, la energía de la descarga se canaliza al combustible a través de los electrones y se disminuyen las pérdidas de energía en forma de calor porque el combustible se conserva a temperatura baja; también permite estrategias avanzadas de combustión que conducen a reducir 10% el

consumo de combustible y, por consiguiente, las emisiones mismas [21].

De forma alterna, la clasificación del plasma puede estar en función de las características de la potencia aplicada (voltaje y corriente) o por la temperatura media respecto a la cantidad de electrones por unidad de volumen (densidad electrónica, n_e), como se representa en las Figura 2.1 y 2.2, respectivamente.

En la Figura 2.1 se muestra que en la primera sección se aplica alto voltaje a corriente baja para formar una descarga oscura (o de Townsend) que se sostiene a voltaje constante; si este valor se eleva, la conductividad del gas aumenta significativamente y aparece una transición en la que la tensión disminuye y la corriente incrementa, en esta situación la excitación de los átomos y moléculas del gas es tan elevada que hace visible la descarga (región luminiscente). En esta zona la tensión a través de la descarga es prácticamente independiente del voltaje sobre varios órdenes de magnitud. Cuando la densidad de corriente es muy alta se producen electrones y sucede la transición hasta el régimen de descarga de arco, donde el gas se convierte en un puente altamente conductor [1].

La Figura 2.2 esquematiza la ubicación de plasmas típicos encontrados en la naturaleza y en aplicaciones tecnológicas. Existe una división para los metales y el interior de las estrellas, debido a que estos alcanzan niveles de ionización del 100% (plasmas completamente ionizados), a diferencia del resto que sólo lo hacen parcialmente (de 0.1×10^{-3} a 0.1 %) [8]. Adicionalmente, se registra el símbolo λ_D que denota la longitud o radio de Debye: distancia sobre la cual puede ocurrir una separación significativa de carga [22]. La n_e del plasma incluso supera la de los metales.

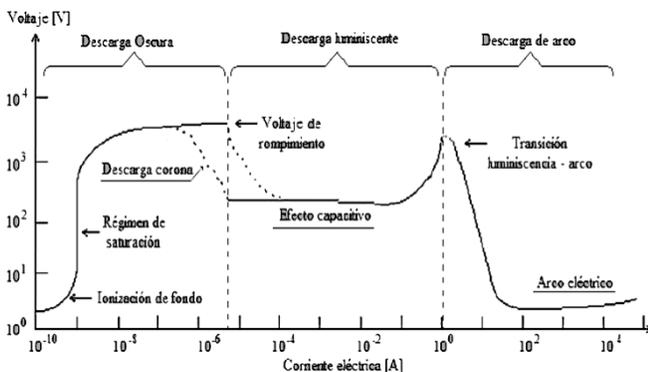


Figura 2.1. Gráfica universal corriente-voltaje del plasma [1].
(Clic izquierdo sobre la imagen para seguir el vínculo).

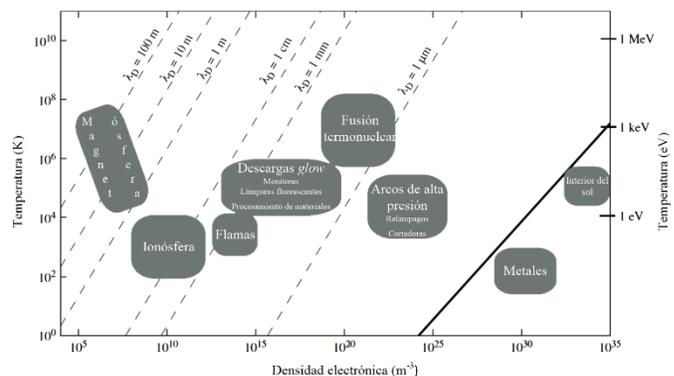


Figura 2.2. Mapeo de plasmas en función de su densidad electrónica y temperatura [22].

(Clic izquierdo sobre la imagen para seguir el vínculo).



2.2 Plasma Frío

El plasma frío resulta útil para muchas aplicaciones técnicas porque es posible controlar separadamente la temperatura de las especies pesadas y la de los electrones. Las características principales que diferencian al NTP de otros tipos de descargas son [20]:

1. su densidad electrónica baja, de 10^{14} a 10^{18} m^{-3} ;
2. la temperatura de translación (T , energía cinética) de sus electrones elevada, de 10^4 a 10^5 K ;
3. su desviación cinética de equilibrio alta: la T_e es mucho mayor que la T de los iones (T_+) y de las partículas neutras (T_n); $T_e \approx 10^4 \text{ K} \gg T_+ > T_n$ (Figura 2.3); y
4. la T_g ($T_+ + T_n$) se mantiene de 300 a 400 K, debido a que la masa de las especies pesadas (con temperatura ambiente) es mucho mayor que la de los electrones (de aquí el nombre de NTP).

La T_e es el factor determinante al iniciar las reacciones químicas que en técnicas convencionales, activadas térmicamente, resultarían muy ineficientes o imposibles de realizar. Una vez iniciada la ionización, la distribución de energía la ejecutan los electrones (e^-), mucho más ligeros que cualquier partícula y con energía cinética adquirida alta, por lo que pueden ser acelerados de forma más eficaz y luego, mediante colisiones, repartir la energía al resto del gas; dentro de las colisiones de mayor trascendencia se encuentran:

1. las colisiones elásticas, que no cambian la estructura electrónica de las especies neutras, pero sí su energía cinética ($e_{rápido}^- + X_{lento} \rightarrow e_{más\ lento}^- + X_{más\ rápido}$); y
2. las colisiones inelásticas, que modifican la estructura electrónica de las especies neutras y las convierten en especies reactivas ($e_{rápido}^- + X \rightarrow e_{lento}^- + X^*$) o ($e_{rápido}^- + X \rightarrow e_{lento}^- + X^+ + e^-$);

donde X representa a cualquier especie en el gas, X^* una partícula excitada, y X^+ a un ion positivo. Se infiere que la transferencia de energía se realiza por colisiones elásticas; entretanto, las colisiones inelásticas inducen la serie de reacciones químicas (Tabla 2.1), mismas que juegan el papel más importante en el NTP, debido a la alta producción simultánea de portadores de carga y especies altamente reactivas [18].

Las fuentes de NTP trabajan en condiciones de baja presión de 10^{-1} a 10^3 Pa (vgr.: los plasmas de radiofrecuencia y de microondas) o a presiones de 10^5 Pa (vgr.: descargas corona

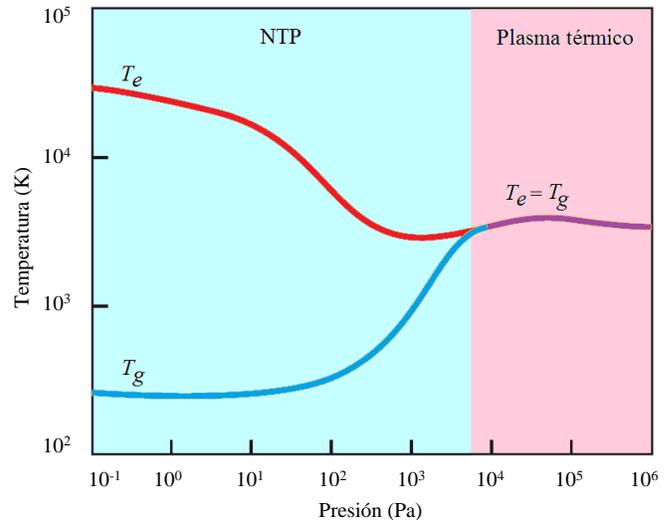


Figura 2.3. Ejemplificación de la divergencia de T_e y T_g en el cambio de fase de un arco no térmico a térmico [1].

TABLA 2.1
REACCIONES EN LA REGIÓN ACTIVA DEL NTP

Ionización	$X_2 + e^- \rightarrow X_2^+ + 2e^-$
Captura de electrones	$X_2 + e^- \rightarrow X_2^-$
Captura disociativa de electrones	$X_2 + e^- \rightarrow X^- + X$
Disociación	$X_2 + e^- \rightarrow X + X + e^-$
Excitación	$X_2 + e^- \rightarrow X_2^* + e^-$
Ionización disociativa	$X_2 + e^- \rightarrow X^+ + X + 2e^-$
Liberación de electrones	$X_2^- + e^- \rightarrow X_2 + 2e^-$
Recombinación	$X_2^+ + e^- \rightarrow X_2$

Elaborada con datos de [1] y [23].

y de barrera). Pese a sus cualidades destacadas, no todas las fuentes de plasma han demostrado ser económica ni técnicamente aplicables en el sector industrial, ya que por ejemplo: utilizan equipos de vacío, requieren campos electromagnéticos altos y aumentan los costos operativos en volúmenes de tratamiento grandes. Las descargas de barrera dieléctrica se emplean en escala industrial (con potencias de 10^6 W) por la simple escalabilidad de sus prototipos de laboratorio; se incluye: generación de ozono, esterilización de material quirúrgico, control de contaminantes, deposición de películas delgadas, láseres, lámparas, entre otros [8], [24].



2.3 Descargas de Barrera Dieléctrica

Las descargas de barrera dieléctrica, de barrera o silenciosas (DBD), son una fuente de NTP caracterizada por generar un conjunto de canales de conducción (microdescargas) en el espacio existente entre dos electrodos separados por una o varias capas dieléctricas (vidrio, sílice, polímeros o cerámicos) [24]. El tiempo de vida de las microdescargas es de nanosegundos y se fragmenta en tres fases (Figura 2.4):

1. *avalancha*, se inicia cuando los e^- liberados del cátodo comienzan a multiplicarse hasta alcanzar la barrera dieléctrica del ánodo;
2. *streamer*, cuando los e^- llegan a la barrera se forman filamentos, que son canales de conducción creados entre la barrera y el cátodo; y
3. *decaimiento*, la descarga colapsa gradualmente hasta llegar a la extinción a causa de las cargas acumuladas sobre la superficie del dieléctrico [25].

Las configuraciones de los reactores para producir DBD, que han sido estudiadas extensamente, se bosquejan en la Figura 2.5 [26]. El sistema se integra principalmente por una fuente de alimentación, un electrodo donde se aplica el alto voltaje (HV) y uno de referencia (GND), y un flujo de gas que hace posible las microdescargas. Un reactor coaxial genera descargas homogéneas al eliminar el efecto de filamentos y puntas; además, la distribución del campo eléctrico (E) depende del radio (r) en el que suceden las microdescargas (Ecuación 2.1; donde: R_{ext} es la distancia al borde más alejado del centro, y R_{int} es el radio del cilindro interior) [1]. Entre más reducido sea r , mayor será la intensidad del E asociado.

$$E(r) = \frac{V_{CA}}{r \ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)}; \left[\frac{V}{m}\right] \quad (2.1)$$

En cualquier configuración resalta la aplicación de voltaje alterno (CA) para alimentar continuamente el sistema, ya que el material aislante no permite el paso de corriente directa (CD). Las fuentes de excitación operan en frecuencia de línea hasta MHz, punto en el cual la barrera aislante pierde capacidad de limitación de corriente⁵ (de desplazamiento)⁶, misma que se rige por la derivada del voltaje respecto al tiempo, por la constante dieléctrica y por el grosor del material, razones que dan pie a que su equivalente eléctrico sea una capacitancia. El modelo más empleado es el de Ulrich

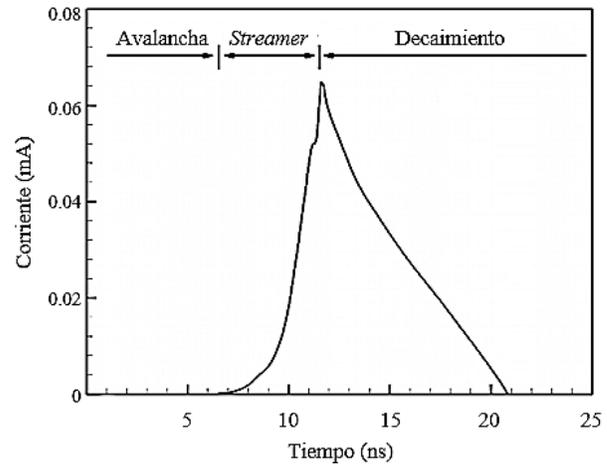


Figura 2.4. Fases en la evolución de las microdescargas en la DBD [25].

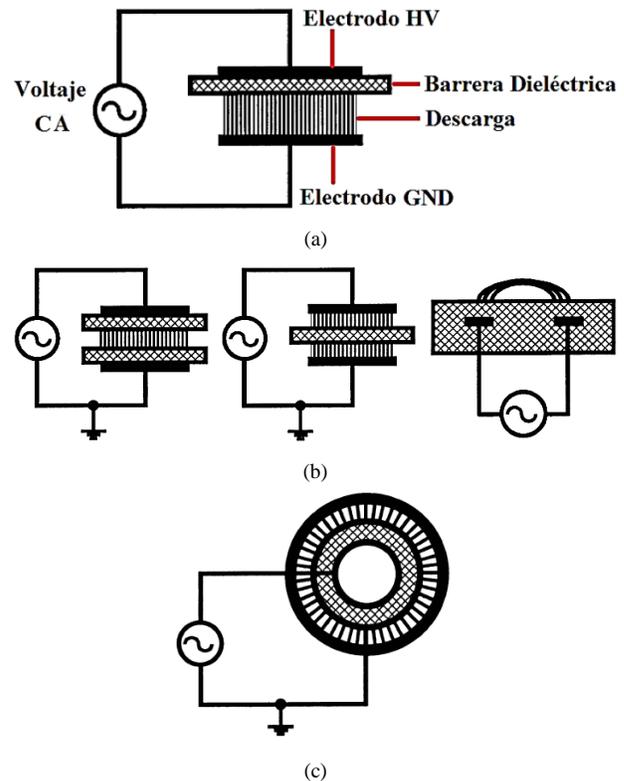


Figura 2.5. Configuraciones de los reactores para DBD. (a) Elementos principales. (b) Geometría plana y coplanar. (c) Geometría coaxial [26].

Kogelschatz, a partir de la representación con elementos eléctricos pasivos del dieléctrico (C_a), la brecha entre los electrodos/aislantes (C_d) y de los canales de conducción ($R_d(t)$). En la Figura 2.6 el interruptor *Ignición* simboliza el voltaje necesario para que ocurra la descarga [24].

⁵ Debido a la reactancia capacitiva (X_C) que es inversamente proporcional a la frecuencia (f); $X_C = -(2\pi fC)^{-1}$.

⁶ La corriente de desplazamiento es: $i_{des} = C_{dbd} \frac{dV_{CA}}{dt}$.



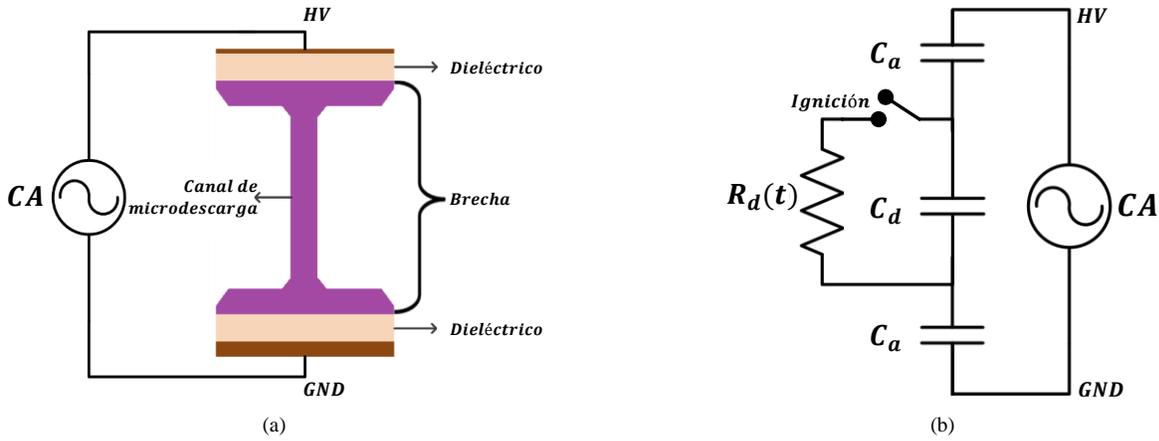


Figura 2.6. Microdescarga en un reactor de doble barrera dieléctrica. (a) Esquema de un filamento. (b) Equivalente eléctrico [24].

2.4 Reactor Coaxial de Doble Barrera Dieléctrica

Las secciones marcadas en la Figura 2.7 representan a un reactor de doble barrera dieléctrica coaxial ($C - DBD_2$), compuesta por dos electrodos concéntricos y dos capas aislantes entre ambos, también la brecha que los separa se considera un aislante (momento antes de que inicie la ionización e inmediatamente después se vuelve variante en el tiempo por acción de $R_d(t)$).

El cálculo de la capacitancia equivalente (C_{dba}) se realiza de acuerdo con las dimensiones físicas y al material del reactor, relacionados por la Ecuación 2.2; donde: ϵ_0 es la permitividad del vacío (8.85 pF m^{-1}), L es la distancia compartida por los electrodos distados paralelamente, ϵ_a es la permitividad del aislante, ϵ_d es la permitividad del gas en la brecha, y x_{0-4} , x_{0-3} , y x_{0-2} son las distancias desde el centro de la geometría hacia GND, la barrera dieléctrica externa y el fin de la brecha de las descargas, respectivamente [27].

$$C_{dba} = \pi \epsilon_0 L \left(\left(\frac{\epsilon_a}{\ln \frac{x_{0-4}}{x_{0-3}}} \right)^{-1} + \left(\frac{\epsilon_d}{\ln \frac{x_{0-3}}{x_{0-2}}} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

donde el primer sumando se relaciona con la C_a y el segundo a la C_d .

En un $C - DBD_2$ las microdescargas se distribuyen uniformemente, lo que permite trabajar con flujos de gas mayores respecto a las descargas con una sola barrera. Asimismo, la acumulación de cargas en las paredes dieléctricas (efecto memoria) facilita la aparición de los canales de conducción en cada ciclo de la señal de voltaje [28].

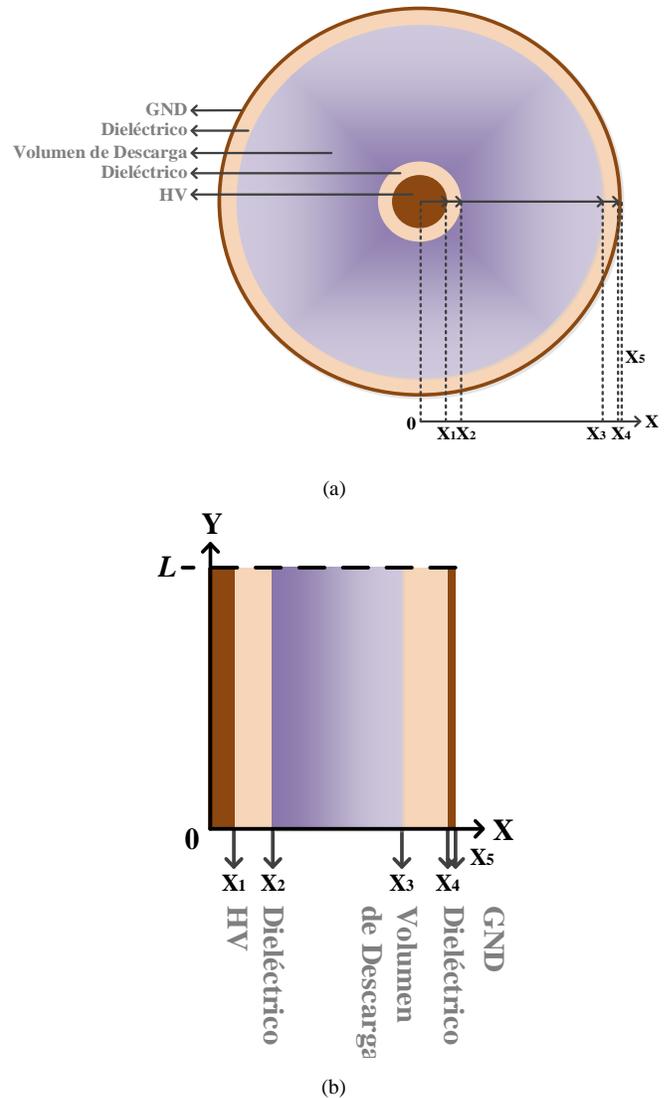


Figura 2.7. Reactor coaxial de doble barrera dieléctrica. (a) Vista transversal. (b) Vista longitudinal.



2.5 Fuente de Excitación: Inversor Push-Pull⁷

Para generar y mantener las DBD es necesario alimentar continuamente el sistema con una fuente bipolar, en caso contrario el medio retorna a la fase gaseosa. La amplitud mínima de voltaje, entre ánodo y cátodo (electrodos), para que sucedan las descargas se denomina Voltaje de Rompimiento (V_r), cuando su valor es inferior al requerido la ionización es prácticamente nula, una vez superado ligeramente ese nivel comienza a existir un flujo de corriente entre los electrodos (plasma parcialmente ionizado) y su comportamiento es regido por el campo eléctrico. El valor de V_r depende del gas, la presión de trabajo (p) y de la distancia entre los electrodos (d), parámetros vinculados con la Fórmula de Paschen (Ecuación 2.3, en la que δ y σ son constantes específicas del gas inyectado). En la Figura 2.8 se presentan las Curvas de Paschen para algunos gases de uso común en la generación de descargas de plasma [8], [32].

$$V_r(pd) = \frac{\delta pd}{\sigma + \ln(pd)} \quad (2.3)$$

Los equipos industriales proveen una densidad de potencia de 0.05 hasta 1 W cm⁻³. Si se acopla al C – DBD₂ una fuente de voltaje alterno de alta frecuencia, tanto la eficiencia como la conductividad eléctrica aumentan y el tamaño del equipo final se reduce notablemente. La importancia de la frecuencia de excitación radica en su influencia en el comportamiento general de la descarga; por ejemplo, en el orden de kHz los electrones y los iones siguen las oscilaciones del campo eléctrico, mientras que en un orden superior, MHz o GHz, sólo los electrones siguen dicho campo [1], [28].

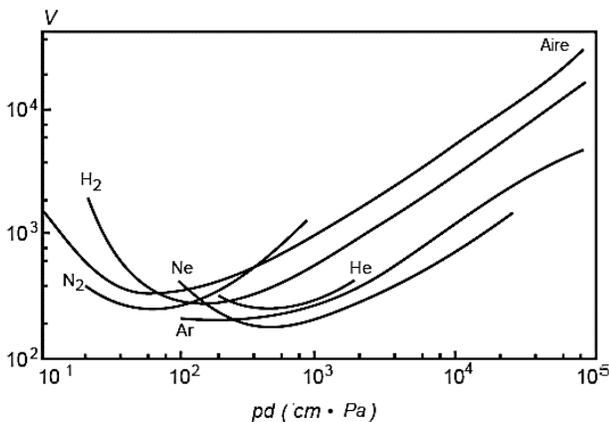


Figura 2.8. Curvas de Paschen para estimar el voltaje de rompimiento de diferentes gases [8].

Una fuente conmutada (SMPS, *switch-mode power supply*) permite trabajar a frecuencias de kHz mediante el cambio de estado de transistores. En este trabajo se ocupa una fuente principal que provee hasta 100 V_{CD} @ 1.44 kW; entonces, el diseño del sistema de excitación se enfoca en desarrollar un inversor con topología *push-pull* (PPI, *push-pull inverter*), acorde para la alimentación de cargas capacitivas.

Un PPI es una SMPS que aísla sus etapas mediante un transformador con derivación central en su primario, y convierte una señal de CD a una de CA al alternar dos interruptores de estado sólido referenciados a tierra, situación que simplifica su diseño; es capaz de conmutar a cero voltaje (ZVS, *zero voltage switching*) y de manejar cargas no constantes, no lineales y reactivas [33].

En el esquema eléctrico de la Figura 2.9 se identifican dos transistores MOSFET de canal N (Q_1 y Q_2), los cuales se activan/interrumpen mediante dos señales de control de compuerta (V_{GS1} y V_{GS2}), que son trenes de pulsos ajustables en frecuencia y ancho de pulso o ciclo de trabajo (f_{PWM} y D_{PWM} , respectivamente). A este método se le conoce como Control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM, *pulse-width modulation*). Para evitar la superposición de ambos V_{GS} , existe un desfase de 180° entre ellos y el máximo valor de D_{PWM} es 0.5. En la práctica los pulsos de control no son totalmente rectangulares y presentan un tiempo de subida (t_1) y de bajada (t_2) en cada uno de sus flancos. Por seguridad, se genera un tiempo muerto (T_R) en el que ninguno

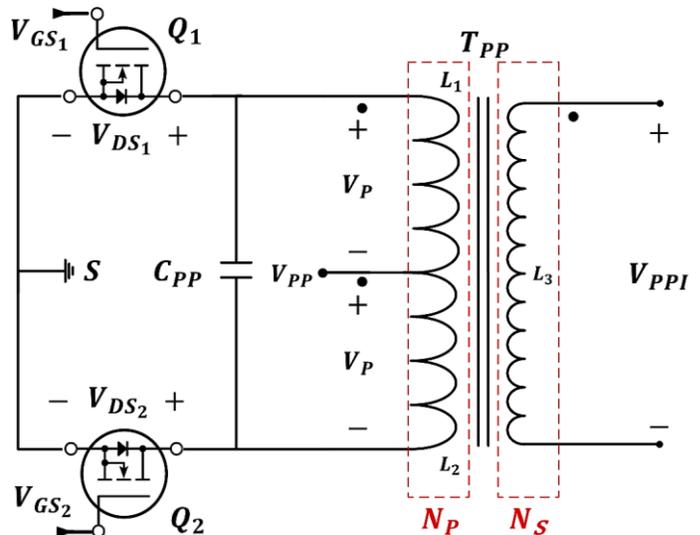


Figura 2.9. Circuito eléctrico del inversor push-pull.

⁷ La teoría fundamental de esta sección se encuentra redactada en [29]-[31].



de los transistores está encendido y que asegura un D_{PWM} menor a 0.5; por lo tanto, las únicas posibles combinaciones de los estados son: ABIERTO-CERRADO (1/0), CERRADO-ABIERTO (0/1) y ABIERTO-ABIERTO (0/0) (Figura 2.10 y Tabla 2.2).

2.5.1 Comportamiento del PPI

El comportamiento general del PPI se basa en la conmutación del voltaje proporcionado por una fuente de CD (V_{PP}) a través de la derivación central (L_{1-2}) en el primario del transformador (T_{PP}) por Q_1 cuando V_{GS1} está en 1 lógico durante el tiempo T_{ON1} , con ello se origina un voltaje pulsado (V_p) en L_1 (Ecuación 2.4) y un flujo magnético (ϕ_{PP}) opuesto en el núcleo de T_{PP} , V_p a su vez se refleja sobre L_2 y, mientras en Q_1 hay 0 V, en Q_2 existe un voltaje (V_{DS2}) igual a $2 V_{PP}$ menos la caída en Q_1 (Ecuación 2.5). ϕ_{PP} genera un voltaje a la salida del PPI (V_{PPI}) en el secundario de T_{PP} (L_3) que resulta de la multiplicación de la ganancia (M , definida idealmente por la relación en el número de vueltas del primario y el secundario de T_{PP}) por el voltaje V_{PP} menos la caída en el transistor Q_1 (Ecuación 2.6). Cuando Q_2 es el que está cerrado ocurre un comportamiento similar, pero el sentido de las corrientes es contrario (Ecuaciones 2.7-2.9). En el caso del tiempo muerto, únicamente se mide V_{PP} en ambos transistores (Ecuación 2.10) y $V_{PPI} = 0 V$. Con estas condiciones y al asumir los elementos como ideales, el valor pico de V_{PPI} se aproxima mediante la Ecuación 2.11 y, si la caída en el transistor es pequeña, la función de transferencia del PPI se establece con la Ecuación 2.12 [31].

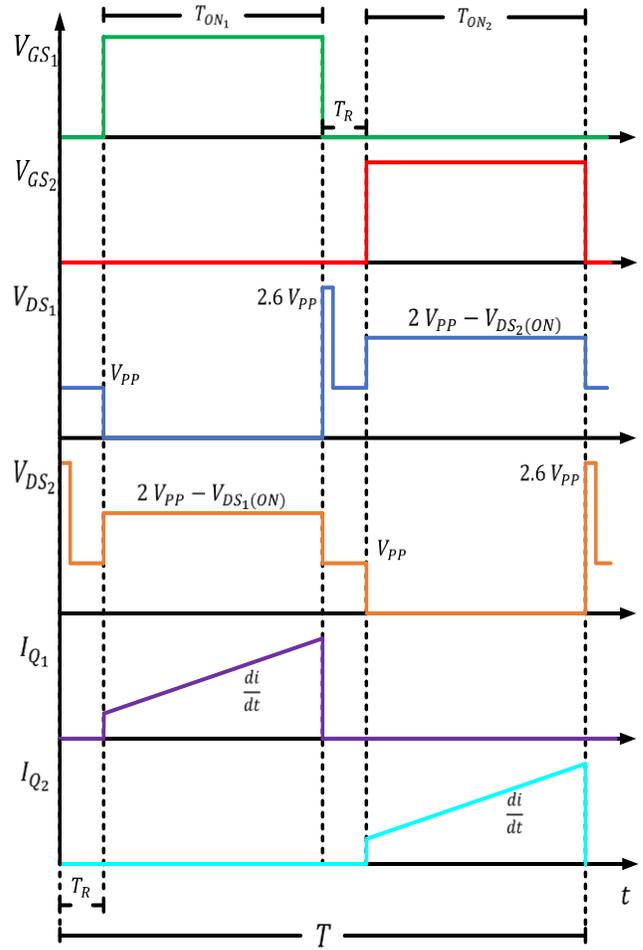


Figura 2.10. Formas de onda ideales características en los transistores de la topología básica de un PPI [30], [34].

TABLA 2.2

MEDICIONES IDEALES DE LOS VOLTAJES PRINCIPALES DURANTE LAS ETAPAS DE CONMUTACIÓN DEL PPI

Caso	Descripción	Ecuación
$Q_1: 1$ $Q_2: 0$	V_{PP} genera un V_p en L_1 , referenciado a su lado sin punto.	$V_p = -(V_{PP} - V_{DS1(ON)})$ (2.4)
	V_p se refleja en L_2 .	$V_{DS2(OFF)} = 2 V_{PP} - V_{DS1(ON)}$ (2.5)
	V_{PPI} es negativo debido a la polarización del primario.	$V_{PPI} = -\frac{N_S}{N_P} (V_{PP} - V_{DS1(ON)})$ (2.6)
$Q_1: 0$ $Q_2: 1$	V_{PP} produce un V_p en L_2 , referenciado a su lado sin punto.	$V_p = V_{PP} - V_{DS2(ON)}$ (2.7)
	V_p se refleja en L_1 .	$V_{DS1(OFF)} = 2 V_{PP} - V_{DS2(ON)}$ (2.8)
	V_s es positivo debido a la polarización del primario.	$V_{PPI} = \frac{N_S}{N_P} (V_{PP} - V_{DS2(ON)})$ (2.9)
$Q_1: 0$ $Q_2: 0$	No existen voltajes inducidos o reflejados, únicamente la medición de V_{PP} .	$V_{DS} = V_{PP}$ (2.10)

Elaborada con información de [34] y [35].



$$V_{PPI(pk)} = \pm 2 \frac{N_S}{N_P} \frac{T_{ON}}{T} (V_{PP} - V_{DS(ON)}) \quad (2.11)$$

$$\frac{V_{PPI}}{V_{PP}} = \pm 2 \frac{N_S}{N_P} \frac{T_{ON}}{T} \quad (2.12)$$

donde

- T_{ON} = tiempo en que el transistor está en 0 lógico,
- T = periodo del pulso,
- N_P = número de vueltas en el primario, y
- N_S = número de vueltas en el secundario.

De acuerdo con las Ecuaciones 2.5 y 2.8, el voltaje máximo entre sus terminales *drain* (D) y *source* (S) que deben soportar Q_1 y Q_2 , en estado ABIERTO, es $\sim 2 V_{PP}$, pero a este valor se suma el pico de voltaje que se genera por la inductancia de fuga en el flanco de bajada de V_{GS} . Aunque los transformadores aplicados en conmutación son diseñados para tener una inductancia de fuga pequeña [36], por lo general se estima para ser aproximadamente 30% mayor que la tensión en el transistor, por lo tanto, al final del intervalo T_{ON} la tensión máxima ($V_{DS(MIN)}$, voltaje mínimo de operación del transistor) es igual a la resultante en la Ecuación 2.13 (Figura 2.10) [35].

$$V_{DS(MIN)} \approx 2.6 V_{PP} \quad (2.13)$$

En la Figura 2.11 se grafica el voltaje y la corriente en el transistor al momento del cambio de estado. Cuando el transistor conduce corriente, el voltaje decae rápidamente mientras que la corriente (i_Q) inicia una rampa suave de ascenso, debido a que la corriente no puede cambiar abruptamente en un inductor; en este punto la potencia es cero. Sin embargo, cuando el transistor deja de conducir, la corriente y el voltaje presentan una transposición durante un tiempo T_{SW} ; mientras el voltaje incrementa suavemente la corriente descende del mismo modo, de tal forma que el área que encierran ambas formas de onda representa una disipación de potencia en CA ($P_{Q,ca}$) descrita en la Ecuación 2.14 y las pérdidas en CD ($P_{Q,cd}$) se calculan con la Ecuación 2.15; la suma de ambas en la Ecuación 2.16 representa la potencia total disipada por los transistores ($P_{Q,tot}$) [35].

$$P_{Q,ca} = i_Q V_{DC} \frac{T_{SW}}{T} \quad (2.14)$$

$$P_{Q,cd} = i_Q V_{DS(ON)} D_{PWM(MAX)} \quad (2.15)$$

$$P_{Q,tot} = P_{Q,ca} + P_{Q,cd} \quad (2.16)$$

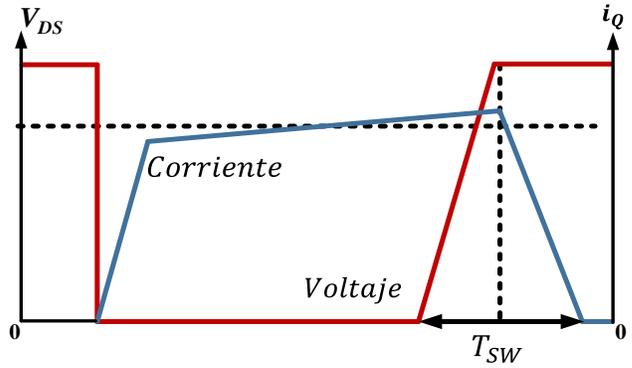


Figura 2.11. Pérdidas de potencia por cada interrupción del transistor [35].

En lo que respecta al núcleo (U_{PP}) del transformador, en la Figura 2.12 se observa que U_{PP} trabaja en el primer y tercer cuadrantes de la curva de histéresis característica [34]. El eje x representa la intensidad de flujo magnético (H) que es proporcional al número de vueltas (N), a la corriente que pasa por la bobina (i) y a la longitud de U_{PP} ($l_{U_{PP}}$), con unidades $A \cdot m^{-1}$. El eje y simboliza la densidad de flujo magnético (B) que se relaciona con el área transversal de U_{PP} ($A_{U_{PP}}$) y con el flujo magnético (medido en Wb). Las Ecuaciones 2.17 y 2.18 establecen estas relaciones, entretanto la Ecuación 2.19 relaciona a B y a H a través de la permeabilidad de U_{PP} (μ_{PP}) y la permeabilidad del vacío ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot A^{-1} \cdot m$) [36].

$$H = \frac{N i}{l_{U_{PP}}} \quad (2.17)$$

$$B = \frac{\phi_{PP}}{A_{U_{PP}}} \quad (2.18)$$

$$\phi_{PP} = H A_{U_{PP}} \mu_{PP} \mu_0 \quad (2.19)$$

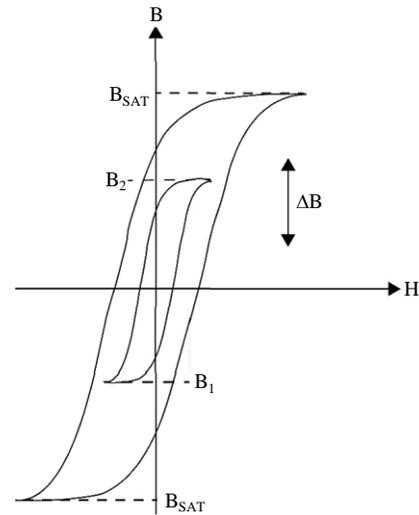


Figura 2.12. Curva de histéresis del núcleo de T_{PP} [36].



La densidad de flujo magnético tiene un ciclo que va de un valor B_1 a B_2 y viceversa, en incrementos ΔB , durante cada interrupción de los transistores. Al asumir que las bobinas primarias L_1 y L_2 son del mismo valor, debe procurar que ambos V_{GS} permanezcan alternadamente el mismo tiempo encendido para evitar que el núcleo alcance valores de saturación (B_{SAT}); sí se crea un flujo magnético diferente en magnitud durante cada ciclo, un valor de CD se le suma y puede fácilmente saturar al núcleo, que se observa gráficamente como un pico de corriente (i_Q) en el transistor desbalanceado (Figura 2.13) [30]. Con estas consideraciones, en [35] se encuentra una igualdad que proporciona el valor ideal de N_p con base en B (Ecuación 2.20), y que para obtener N_s bastaría multiplicar el resultado por la ganancia M .

$$N_p = \frac{V_p T_{ON}}{\Delta B A_{UPP}} \quad (2.20)$$

2.5.2 Modos de Operación del PPI

El PPI puede trabajar de tres formas que dependen de f_{PWM} y de la frecuencia de resonancia (f_R), que se asemeja a la frecuencia de amortiguamiento de la ZVS (f_Z). A estos modos se refieren [33], [37]-[42] como: cuasiresonante ($f_{PWM} = f_R$), *boost* ($f_{PWM} < f_R$), y *buck* ($f_{PWM} > f_R$).

Para la mayoría de aplicaciones, el PPI trabaja en el modo cuasiresonante, debido a que la corriente circula por el circuito tanque resonante formado por el capacitor C_{PP} y la inductancia $L_1 + L_2$ (L_{PP}) de T_{PP} . En este modo, f_{PWM} se encuentra justo debajo de f_R (valor estimado en la Ecuación 2.21) para cargas pequeñas, o es aproximadamente igual a la frecuencia de amortiguamiento f_Z para cargas altas [41], [42]. El modo cuasiresonante supone que $D_{PWM} = 0.5$, por lo que [39] sugiere que la forma de onda de V_{PPI} en estado estacionario se comporta de acuerdo con la Ecuación 2.22. El resto de las gráficas características están en la Figura 2.14.

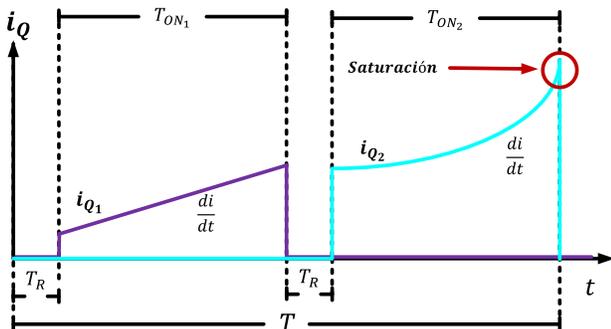


Figura 2.13. Pico de corriente que indica la saturación de U_{PP} [30].

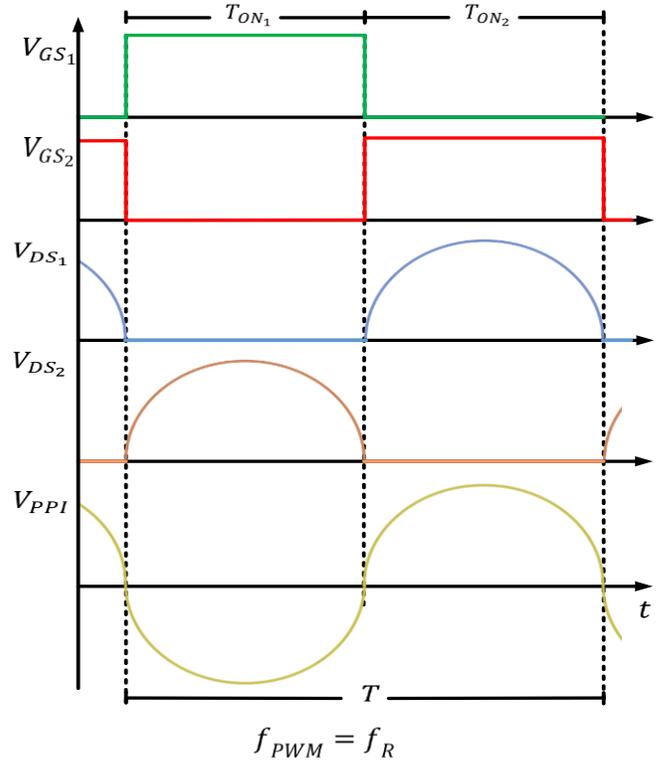


Figura 2.14. Formas de onda características del PPI cuasiresonante.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{PP} L_{PP}}} \quad (2.21)$$

$$V_{PPI(ca)}(t) = V_{PPI(pk)} \text{sen}(2\pi f_{PWM} t) \quad (2.22)$$

El PPI *boost* tiene como condición una superposición de los V_{GS} durante un tiempo α_1 , manifestado en un $D_{PWM} > 0.5$ [41]; sin embargo, encender ambos interruptores a la vez genera un ϕ_{PP} opuesto en U_{PP} , que resulta en la acción nula de T_{PP} por un cortocircuito en sus bobinas y en una baja impedancia entre V_{PP} y GND, en otras palabras, se destruyen los transistores. Para evitar este fenómeno, una bobina adicional se coloca entre V_{PP} y L_{1-2} , razón por la que es conocido como Inversor *Push-Pull* de Fuente de Corriente [34], [37]. Al estar ambos transistores encendidos, $V_p = 0$ V y la corriente de entrada se acumulan en el inductor; al permanecer sólo uno encendido, V_{PP} y el inductor proporcionan energía a V_{PPI} .

En los PPI *boost* y *buck*, parte de la corriente circula por los transistores (pérdidas de potencia); a pesar de ello, el modo *boost* posee alta eficiencia y es una buena alternativa para aplicaciones que requieren medianos y/o altos voltajes. Durante α_1 y α_2 , V_{PPI} conmuta a cero voltaje, lapso conocido como Periodo *Boost* [33], [37] (Figura 2.15).



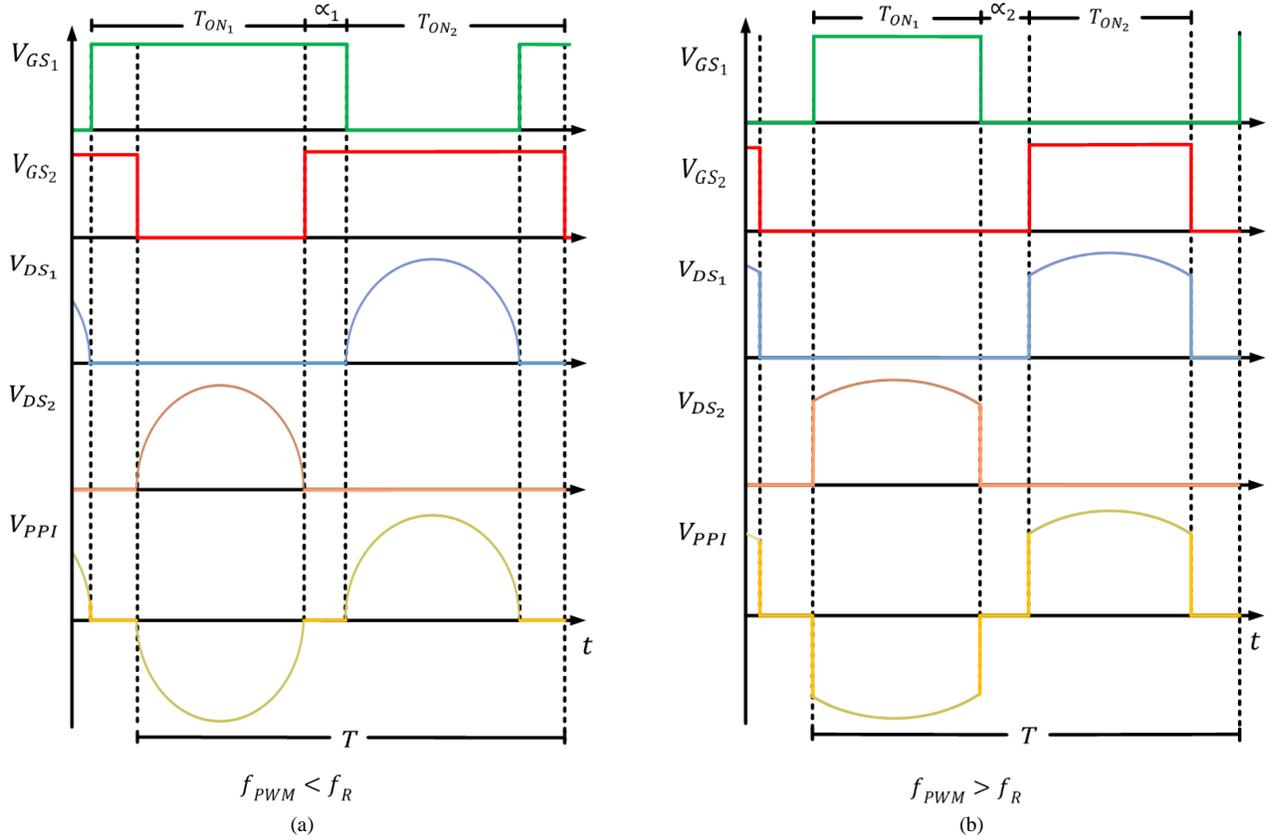


Figura 2.15. Formas de onda características de los PPI boost y buck. (a) Boost. (b) Buck.

2.5.3 Cálculo de Potencia en las DBD

En 1943, en su investigación sobre ozonizadores, Thomas C. Manley propuso un método para calcular la potencia disipada por las DBD mediante la Figura o Curva de Lissajous o de Bowditch: gráfica correspondiente a la superposición de dos movimientos armónicos simples (señales de voltaje) en direcciones perpendiculares. Este método arrojó una igualdad llamada Fórmula de Potencia para Ozonizadores o de Manley (Ecuación 2.23; $V_{PPI(min)}$ representa el voltaje mínimo donde se observan las microdescargas en el reactor) [24], [43], [44].

$$P = 4f(2\pi\epsilon_0L)^2 \left(\frac{\epsilon_d}{\ln \frac{x_0-4}{x_0-3}} \right)^2 + \frac{V_{PPI(min)}(V_{PPI} - V_{PPI(min)})}{(2\pi\epsilon_0L)^2 \left(\frac{\epsilon_d}{\ln \frac{x_0-4}{x_0-3}} \right) \left(\frac{\epsilon_d}{\ln \frac{x_0-4}{x_0-2}} \right)} \quad (2.23)$$

$$V_{PPI} \geq V_{PPI(min)}$$

Al colocar en serie un capacitor (C_L) al $C - DBD_2$ se obtiene la Curva de Lissajous cuando se compara el cambio de la carga ($q(v)$) respecto al voltaje aplicado, después se estima el área dentro del polígono para poder obtener la potencia. En

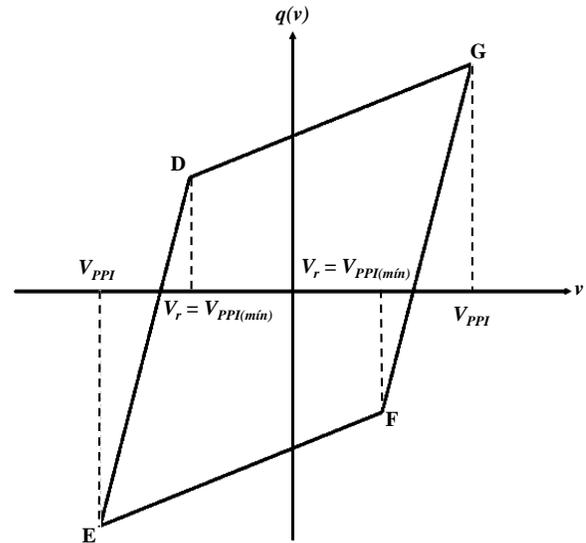


Figura 2.16. Representación de una Figura de Lissajous.

la Figura 2.16 las pendientes DE y FG representan el periodo de carga de C_L , mientras que EF y DG el periodo de descarga; $V_{PPI(min)}$ coincide con V_r [24]. En este caso el cálculo se realizará con un algoritmo en MathCAD® (Anexo D).



2.6 Aplicaciones Ambientales del NTP

Las aplicaciones ambientales del NTP abarcan una gama de investigaciones amplia y diversa, sin embargo, son pocos los avances de laboratorio que se han traducido con éxito en tecnologías aplicables a la vida cotidiana; impedidos, entre otros factores, por la falta de identificación, cuantificación y control de los subproductos producidos en el proceso, además de que a altas presiones es difícil mantener la descarga debido a su inestabilidad y a su susceptibilidad a la filamentación, seguida de una transición a arco eléctrico [45].

En prototipos de laboratorio se investiga la Eficiencia de Remoción o Destrucción (DRE, *destruction or removal efficiency*) de plasmas de electrodo capilar (similares a los reactores dieléctricos) para tratamiento de COV presentes en entornos con flujo de gas bajo, tales como laboratorios clínicos o farmacéuticos [46].

Entre los casos de éxito se incluye a los precipitadores electrostáticos (ESP, *electrostatic precipitator*) basados en descargas corona (Figura 2.17). Estos dispositivos atrapan partículas (polvo y desechos industriales gaseosos) mediante su ionización y posterior atracción hacia una carga electrostática. Son utilizados en fábricas de acero y de procesamiento de metales no ferrosos, en hornos cementeros, papeleras e incineradoras de residuos, en las refinerías de petróleo sirven para recuperar catalizadores. Alcanzan una DRE de 99.90% para partículas de 0.10 a 10 mm con un consumo de 0.10% de la energía empleada en los procesos que las generan [46].

Típicamente los ESP son filtros secos, pero al aplicar humedad al flujo entrante se promueve la recolección de partículas excepcionalmente finas y se reduce la cantidad de energía aplicada. Estos son conocidos como precipitadores electrostáticos húmedos (WESP, *wet electrostatic precipitator*). En 1998 Powerspan®, líder en el desarrollo de tecnología de NTP, implementó un sistema de WESP para tratar múltiples contaminantes en un flujo de 1887 l s^{-1} (1%) de las emisiones de una central eléctrica de carbón en Ohio, U.S.A. Dos años después, la planta piloto no alcanzó la DRE deseada y la presencia de ácidos causó corrosión hasta el punto de convertirse en un tema de alto mantenimiento. Para 2001, la compañía instaló un depurador de amoníaco a la línea de proceso, aguas arriba de la WESP, con lo que alcanzó una DRE de 98, 90, 99.9% para SO_2 , NO_x y PM, respectivamente. Además, las emisiones de mercurio lograron una DRE del 80 al 90% [47].

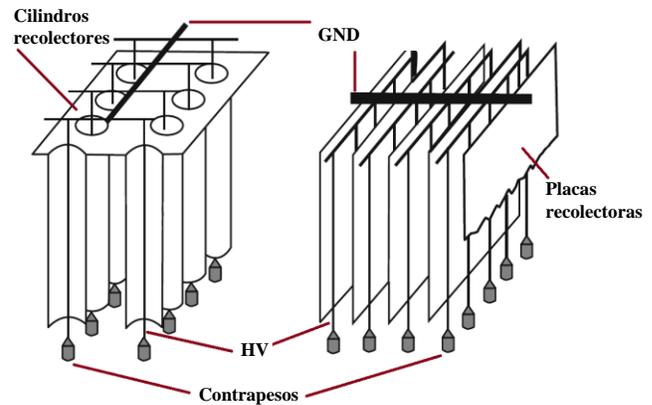


Figura 2.17. Configuraciones de precipitadores electrostáticos [46].

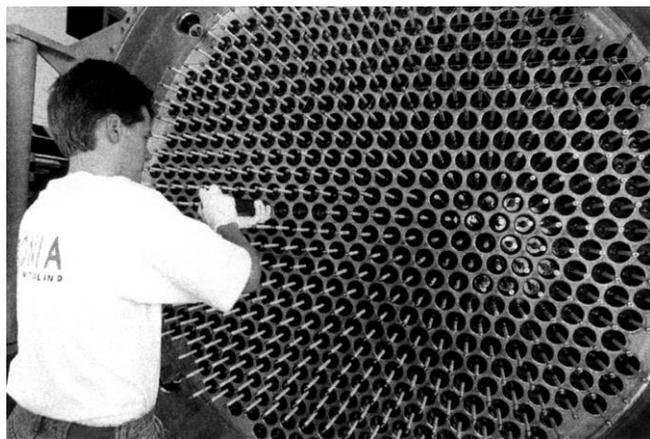
El rendimiento de los ESP disminuye si el efluente está constituido en su mayoría de partículas con diámetro de 0.1 a 1 mm, pues hace difícil su ionización y la corriente decae, lo mismo sucede con materiales con resistividad eléctrica alta. Caso contrario, si las partículas poseen una resistividad eléctrica muy baja (*vgr.*: residuos metálicos), éstas no se adhieren a la carga electrostática recolectora. El rendimiento de los ESP aumenta significativamente con fuentes de excitación bipolar pulsadas (corona pulsada, DCP), en las que la duración del voltaje aplicado es más corta que el tiempo de tránsito de los electrones desde el electrodo de descarga a la placa colectora (de 1 ms en ESP de gran volumen; en brechas de 1 a 3 cm la duración es de 0.1 a 0.3 μs). En las coronas pulsadas se aumenta la uniformidad de la descarga a lo largo de los electrodos y de las placas colectoras, y se evita la transición a arco eléctrico [8], [46].

Las DCP se han introducido en la producción de H_2 , elemento preponderante en el desarrollo de células de combustible aplicadas en la producción de energía y el sector de transportes [48]. También, en la conversión de gas natural, CH_4 , etano y propano en gas sintético. Una desventaja es la instalación de un horno para calentar el reactor [49]. Al colocar un catalizador en la zona de la corona, ambos subsistemas pueden modificar sus propiedades: el plasma provoca el calentamiento de la superficie del catalizador e induce la desorción de especies; se crea una sinergia que depende de la temperatura de la descarga [50].

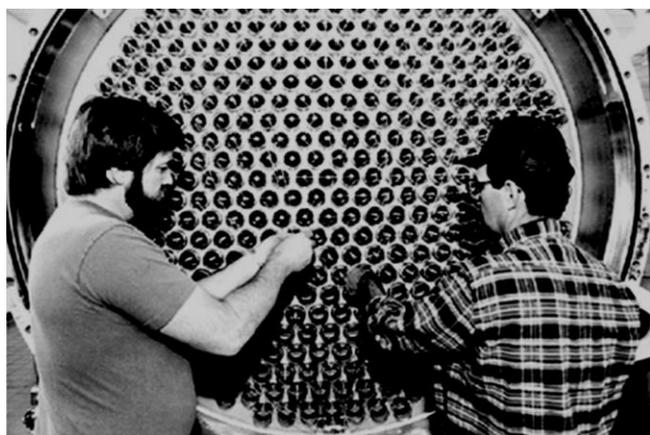
Las coronas pulsadas también son eficaces en la oxidación de SO_2 a trióxido de azufre y, por lo tanto, en la limpieza de gases de escape, con porcentajes de 98% en mezcla simultánea con NO , SO_2 , Hg y vapor de agua, además de una DRE del 40% para el NO (eficiencia que disminuye al aumentar la cantidad de vapor) [51]. La relación entre el NO

y el SO_2 la remarca [52], que obtuvo 70% de remoción de SO_2 al incluir NO en el flujo. Esta misma investigación reporta remociones superiores a 80 y 50% para NO y NO_x , respectivamente. En [53] y [54] la brecha de descarga es de 3.00 y 0.64 mm, con resultados de 100% de remoción de SO_2 , pero la eficiencia del sistema es de 16% en la primera investigación y menor a 50% en la segunda, aspecto que los hace inviables energéticamente.

Por otra parte, la aplicación histórica de las DBD se enfoca a la generación de O_3 (gas oxidante muy potente y eficaz) a partir de aire seco, de oxígeno puro o de oxígeno con nitrógeno. Es totalmente ideal pues el proceso necesita funcionar a baja temperatura porque las moléculas de O_3 decrecen rápido a temperaturas elevadas y, al mismo tiempo, requiere una presión relativamente alta [55]. El primer sistema generador de ozono fue propuesto en 1857 por Ernst



(a)



(b)

Figura 2.18. Generadores de cantidades altas de O_3 . (a) Reactor productor de 60 kg h^{-1} de O_3 [24]. (b) Planta tratadora en California, U.S.A. [46].

Werner M. von Siemens (1816-1892) [56] y, en colaboración con Wilhelm Ohlmüller, probó el efecto de la exposición a O_3 del cólera, el tífus y coliformes; el resultado fue la esterilidad completa del medio al provocar lisis celular [55], [57]. Con ello, se inició una extensa investigación del tema y la producción de ozono industrial en pequeñas plantas de tratamiento de agua, seguido de la instalación de reactores de gran volumen en las principales tratadoras de todo el mundo a principios del siglo XX (Figura 2.18) [24], ya que además reduce el olor y sabor del agua, no afecta al pH y es compatible con otros tratamientos. Recientemente el O_3 se ha dirigido a la oxidación de compuestos provenientes de la industria farmacéutica y la agricultura [58]-[60].

Sistemas en serie NTP-catalizador se han combinado para tratar NO_x provenientes de automóviles. Comprenden una etapa oxidativa (NTP) que convierte NO a NO_2 , y una fase de reducción y almacenamiento (catalizador), que emplea una trampa para convertir el NO_2 a N_2 , CO_2 , H_2 y O [61]. Dado que las DBD operan con niveles de potencia altos y tratan grandes flujos de gas a presión atmosférica con caída de presión insignificante (basado en la tecnología madura de generación de ozono), aplicaciones potenciales en el control de la contaminación se han examinado sistemáticamente.

2.7 Tratamiento de Gases de Combustión (NO_x y CO_x) con DBD: Estado del Arte⁸

La utilización de las DBD para controlar emisiones por fuentes antropogénicas ha sido un tema abordado por varios investigadores. Como inicio, se cita la publicación de Jeon y colaboradores [62], quienes trabajaron con un sistema DBD-catalizador para tratar simultáneamente COV y NO_x , con plasma de aire ($7.5 \text{ kV @ } 60 \text{ Hz}$) removieron 50% de NO_x y al colocar Pt/ZrO_2 , o $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3$, este valor aumentó a cerca del 80%, del cual $>75\%$ se transformó a N_2 . Su sistema genera cantidades adicionales de CO_x que son capturadas por otros catalizadores. Debido a que el catalizador se encuentra dentro del reactor de plasma, se identifican descargas corona sobre su superficie. Niu *et al.* [63] logra una reducción arriba del 50% con el catalizador Co-HZSM-5 . Casos mejores son los de Nie *et al.* [64] y Wang *et al.* [65], debido a que obtienen porcentajes $>90\%$ con los catalizadores $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ y $\text{Ag}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, respectivamente.

Los arreglos en cascada DBD-catalizador son frecuentes en

⁸ Edad promedio: 8.3 años, basado en el año de publicación.



estudios sobre la eliminación de NO_x provenientes de motores diésel de fuentes móviles y fijas [66]-[70]. En la primera etapa, las DBD convierten una parte de NO a NO_2 , entonces el gas entra en un reactor catalítico donde es reducido a N_2 . En las fuentes móviles, la atención se vuelve hacia el NO porque el NO_2 está presente en pequeñas concentraciones. Mok y Huh [66] emplearon el catalizador $\text{V}_2\text{O}_5/\text{TiO}_2$ y un reactor coplanar-cilíndrico, con los que obtuvieron 80% de remoción (en un motor sin carga) de una concentración inicial (CI) de 150 ppm de NO , a la par se generaron 250 ppm de CO , una desventaja en su desarrollo es la adición de NH_3 durante las descargas; en la Figura 2.20.a se muestran las gráficas del voltaje y corriente aplicados a la descarga de plasma. Las variantes empleadas en [67]-[70] se resumen en la Tabla 2.3. Por su parte, Kuwahara *et al.* [71] empleó un sistema de recirculación (con un solo $C - \text{DBD}_1$) que se aproxima a 60% de remoción de NO_x (CI: 240 ~ 325 ppm de NO_x , 160 ~ 220 ppm de CO , 4 % vol. de CO_2 , 130 ~ 190 ppm de HC y 7 % vol. de vapor de agua; velocidad de flujo: 300 l min^{-1}) después de un tratamiento de 35 h, con un aporte de 1 kWh por cada 143 g de NO_2 (fuente primaria CA: 5 kV @ 300 W, 10 kHz). Adicionalmente, los resultados sugieren que este tipo de procesos híbridos se pueden aplicar a la eliminación simultánea de NO_x y PM en los escapes de los motores diésel, donde el reactor hace la función de ESP.

En 2008, la investigación de Moreno [72]-[74] presentó la degradación de NO_x en una mezcla de aire y vapor de agua (1 y 5 % vol.). Los resultados indican que la degradación es posible gracias a los radicales $\text{O}\cdot$, $\text{N}\cdot$ y $\cdot\text{OH}$ que surgen de las colisiones entre moléculas de nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Las reacciones suceden en lapsos $\ll 1 \text{ s}$, incluidas las de degradación, en las que los subproductos principales fueron el HNO_3 y el ácido nitroso (HNO_2). El reactor en cuestión presentó geometría coaxial con 1.35 cm de brecha ($63 \mu\text{m}^3$ de descarga), con la peculiaridad de combinar las descargas corona y DBD; por un lado la descarga se forma y acumula en HV, que es puntiagudo y delgado (corona), pero que a la vez está separado de GND por un dieléctrico (pírex de 1.5 mm de grosor, $C - \text{DBD}_1$) que evita la corrosión prematura de los electrodos. Finalmente, con 3 kV y una entrada de energía de 837 J l^{-1} @ 40 kHz, obtiene un máximo de degradación del 98% de una concentración inicial de 50 ppm y permanece arriba del 90% para una de 400 ppm. La potencia aplicada fue de 450 W. La importancia de la humedad presente durante las descargas también es experimentada por Wang *et al.* [75], quién obtuvo un 20% de remoción de NO_x adicional (50.1% total) al incorporar vapor de agua, mismo que provoca el aumento del V_r .

TABLA 2.3

CONFIGURACIONES
PLASMA-CATALIZADOR/PLASMA EMPLEADAS EN
MAQUINARIA DIÉSEL PARA TRATAMIENTO DE NO_x

Configuración	Catalizador	Remoción [%]	Ref.
Equipos en cascada. Reactor planar de alúmina y pasta de plata.	NH_3 (SCR)	80 @ 373.15 K	[67]
Equipos en cascada. Reactor coaxial de una barrera de pírex.	Alúmina	57 @ 573.15 K	[68]
Reactor coaxial de una pared de cuarzo, relleno de esferas de BaTiO_3 .		60	[69]
Reactor coaxial de doble pared de cuarzo.		67.3 @ 7.5 kV	[70]

En las publicaciones de Pacheco *et al.* [76]-[80] se reportan investigaciones teórico-experimentales de tratamiento para gases de combustión y es puntualizado el interés en tecnologías de NTP para dispositivos a bordo de fuentes móviles. En [78] realizó el análisis de cinética química, obtuvo el mecanismo de degradación de los NO_x y determinó el comportamiento de las especies en la descarga (Figura 2.19.a). Los reactores utilizados fueron coaxiales, de una y dos paredes de pírex, con características similares: brecha no mayores a los 1.4 cm y volúmenes de descarga de $65 \mu\text{m}^3$. Las concentraciones inyectadas no superan las 300 ppm de NO_x ; mientras que los porcentajes de remoción son del 95% en promedio. En este mismo grupo, Pacheco y Valdivia *et al.* [28], [81], [82] han desarrollado un importante estudio sobre el comportamiento eléctrico de las DBD, con los cuales implementaron SMPS para ignición y sostenimiento de las DBD, con salidas de voltaje cuasisenoidal desde 60 Hz hasta 125 kHz (Figura 4.20.b.c). Valdivia [28] subraya la necesidad de aprovechar todo el voltaje aplicado para disminuir las pérdidas y sugiere una fuente pulsada en la que cada semiciclo es explotado casi en su totalidad.

El trabajo institucional del Laboratorio de Física de Plasmas del Centro Nuclear de México [83]-[91], muestra el diseño y la construcción de inversores resonantes de alto voltaje a alta frecuencia de medio puente y puente completo. Estas SMPS alimentan un $C - \text{DBD}_2$ con electrodos de aluminio recubiertos de pírex, con capacidad de tratar 305 cm^3 de mezcla. Durante la fase experimental en [85], diluyeron 200



ppm de NO en N₂ con proporciones <1% de O₂; con una potencia de 20 W degradaron hasta un 99% de la cantidad inicial de NO. En [86] y [87], comparan un reactor plano de electrodos lisos con otro de electrodos *jerk 'n' jump* (similar a una cámara anecóica); con las mismas potencias aplicadas (20 kV @ 7.14 W, 1.75 kHz) dan tratamiento a 22.4 cm³ de NO balanceado en N₂. El primer caso resulta con 87% de remoción y el otro con ~98% (porcentaje promedio en sus publicaciones). Esta última geometría de electrodos la emplea Takaki *et al.* [92] (a los que llaman electrodos multipunto) y obtiene 100% de remoción de NO con un voltaje de 7 kV. Una sugerencia respecto a la fuente de excitación es el inversor multinivel en [88], que al final tiene un comportamiento similar al de Pacheco *et al.* [81]. En la Figura 2.20.d se muestra un par de las formas de onda aplicadas durante sus experimentos.

En la investigación doctoral de Estrada, [93] y [94], se realizó un extenso estudio de química e ingeniería de plasmas. Como puntos importantes, entrega el mecanismo de reacción para CO_x (Figura 2.19.b) y contrasta el desempeño de dos reactores coaxiales, con una lista de pros y contras al utilizar una y dos barreras dieléctricas. La potencia aplicada se mantiene alrededor de 20 W con mezclas de He (gas de acarreo), aire, vapor de agua y NO_x/CO_x. Con un *C - DBD*₁ de pírex, la remoción de NO_x llegó a 99.74% para una concentración inicial de 50 ppm, y se redujo a 96.66% para 300 ppm; estos porcentajes aumentaron 0.23 y 0.65%, respectivamente, con un *C - DBD*₂. Para el CO₂, el porcentaje máximo fue 20.41%, pero genera 288 ppm de CO.

Un aspecto especialmente importante para las fuentes móviles lo tratan Kambara *et al.* [95] al relacionar los radicales de NH₂, NH, N y de H como agentes principales en la eliminación eficiente de NO_x; señala que este hecho disminuye conforme aumenta la concentración de O₂ más allá de 1 % vol. (condición necesaria en automóviles de acuerdo con el parámetro λ). Frente a ello, propone la inyección de NH₃ y realiza pruebas con volúmenes de 1 a 4% de O₂, con resultados de 20% mayor eliminación de NO_x.

En prueba piloto, la pesquisa de Obradović y colaboradores [96] se refirió a la oxidación simultánea de NO y SO₂ provenientes de la combustión en una central eléctrica de carbón. El equipo de DBD se utilizó en modo directo (el efluente pasó directamente por la descarga). La oxidación de NO llegó a un máximo de 43% con aumento a 34 ppm de CO,

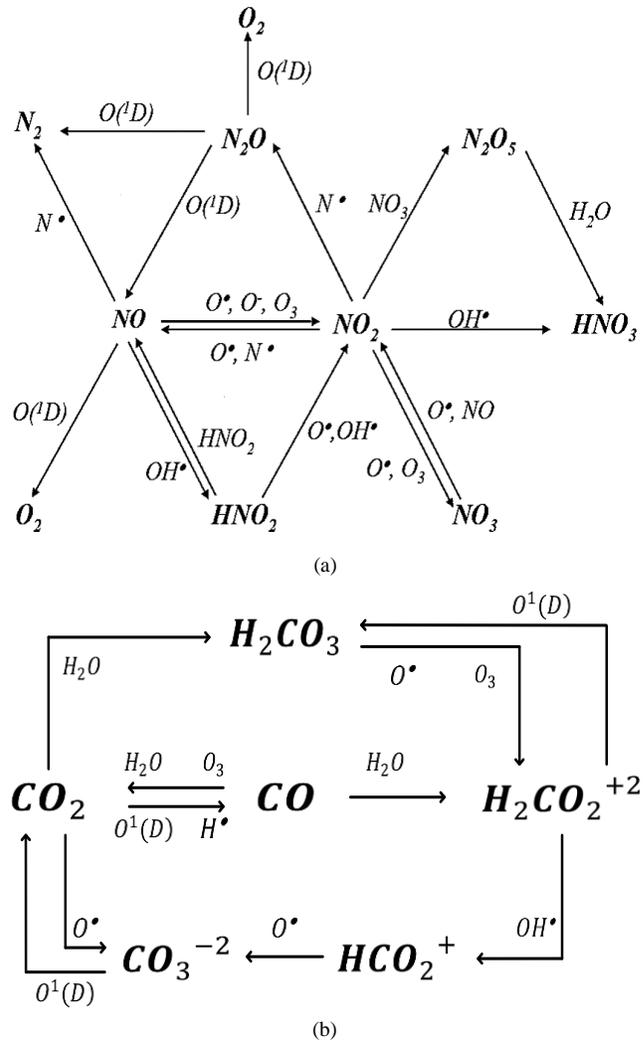


Figura 2.19. Mecanismos de reacción de gases expuestos a DBD. (a) NO_x [78]. (b) CO_x [93].

la CI del efluente fue: 16% O₂, 5% CO₂, 12% H₂O y ceniza; alimentado con 20 kV @ 50 Hz. Un estudio previo a nivel laboratorio fue realizado por Khacef y Cormier [97], su muestra sintética (8% O₂, 14% CO₂, 16% H₂O, 523 ppm de NO, 49 ppm de NO₂ y 163 ppm de SO₂; balanceados en N₂) cruzó un *C - DBD*₁ de cuarzo con brecha de 5 mm y volumen de descarga de 16 cm³. Los resultados de remoción fueron 100 y 38% para el SO₂ y los NO_x, respectivamente. Los dispositivos piloto de Fujishima *et al.* presentan del 60 a más del 90% de remoción para NO_x [98], [99].

Finalmente, con las formas de onda recabadas en la Figura 2.20 el trabajo presente cuenta con una guía eléctrica durante el desarrollo del experimento descrito en el Capítulo 3.



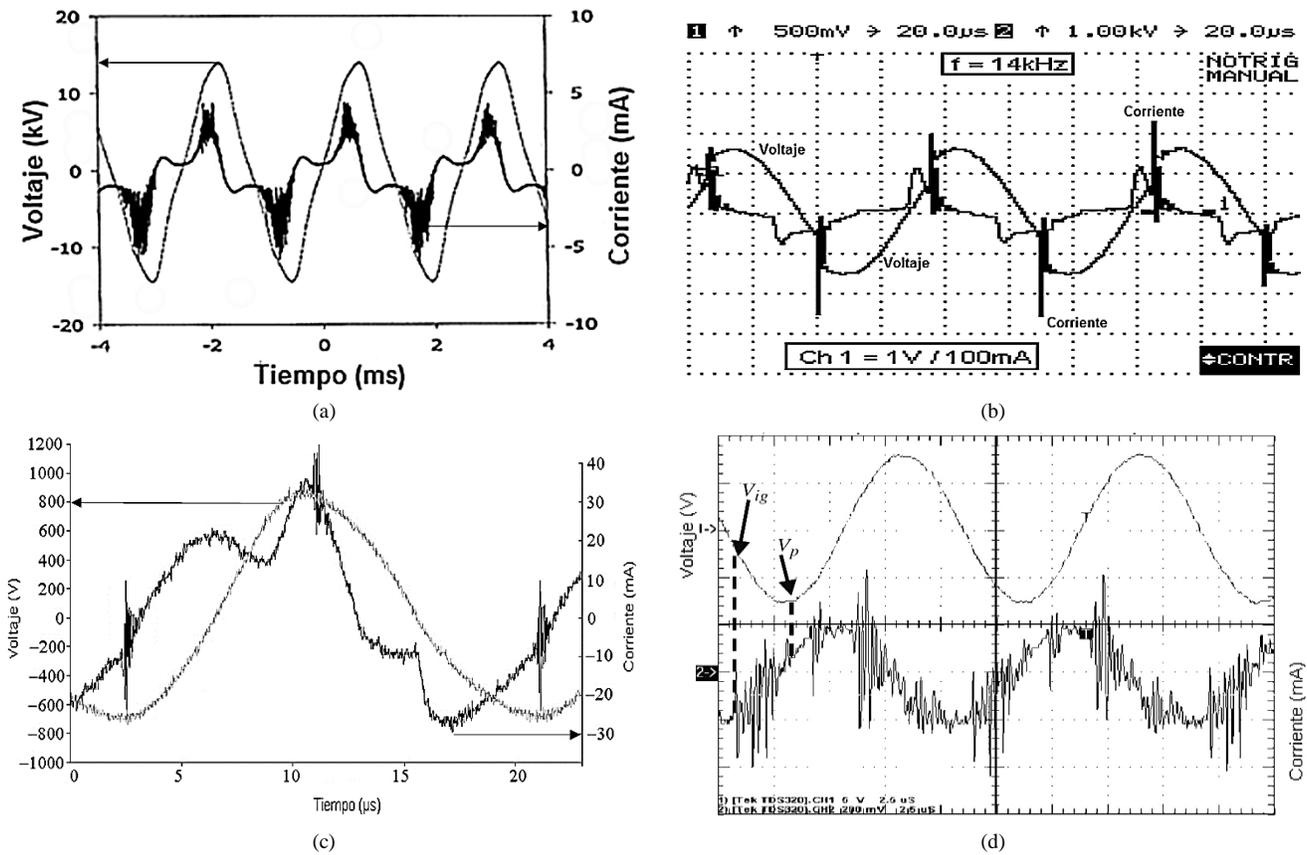


Figura 2.20. Formas de onda voltaje-corriente empleadas en diferentes investigaciones. (a) Mok [66]. (b) Pacheco [81]. (c) Valdivia [82]. (d) Godoy [83].

2.8 Conclusiones

Se realizó un estudio bibliográfico del plasma, agudizado en las descargas de barrera dieléctrica (plasma frío) y en la fuente de excitación bipolar. Se mostraron diagramas de las configuraciones que serán empleadas en el desarrollo experimental de la investigación.

Un sistema de plasma artificial se integra principalmente por una fuente de alimentación, un reactor con al menos dos electrodos para realizar la descarga eléctrica, un sistema de flujo de gases y dispositivos de diagnóstico y control; en muchos de ellos se incluyen bombas de vacío, debido a que se obtienen mejores resultados o facilitan el proceso de ignición y sostenimiento de la descarga, sin embargo, los plasmas que se generan y sostienen a presión atmosférica son más deseables, aunque no siempre son posibles debido a las características que ofrece cada condición de presión.

Se desarrolló una sección enfocada al diseño de un inversor tipo *push-pull*, donde fue resaltada la importancia de la

frecuencia de excitación, ya que permite desde reducir el tamaño de la fuente hasta determinar el comportamiento electroquímico de las descargas.

El trabajo de investigación documental proporcionó un panorama del desenvolvimiento de especies químicas y, lo más importante, se conocen los posibles subproductos por medio de los mecanismos de reacción, y se destaca la importancia de la humedad en el efluente como principal aportadora de los radicales que intervienen en el tratamiento de los gases de combustión. Como el proceso de degradación se realiza en lapsos menores a 1 s, se supone un diseño compacto del reactor. Se añade que cuando el plasma enciende, las primeras especies creadas son las cargadas y poseen vida corta (de 1 y 100 μs): iones positivos y negativos, electrones y moléculas en estado excitado; después de unos pocos milisegundos, las únicas partículas que quedan son el ozono y los óxidos de nitrógeno, que tienen tiempos de vida que superan varias horas.



Fueron descritas las principales aplicaciones del plasma frío: precipitador electrostático y ozonizador; se desarrolló un Estado del Arte actualizado de las DBD en temas ambientales, con hincapié en el tratamiento de NO_x, y fueron resumidos múltiples experimentos desde escala laboratorio hasta pilotos industriales.

Una configuración notoria es la DBD-corona porque el dieléctrico del reactor evita la corrosión prematura de los electrodos y el efecto de corona concentra la energía en el electrodo central, hecho que resulta en una mayor remoción de contaminantes.

En diversas de las investigaciones referenciadas se utilizan materiales adicionales que requieren de una energía de activación o, que al no estar presentes en el efluente, deben ser proporcionadas por un recurso adicional. Esta situación coloca a estas tecnologías en desventaja.

Se identificaron los patrones de las formas de onda para la corriente y el voltaje aplicados en reactores de barrera dieléctrica, mismos que serán de utilidad al momento de la elaboración y puesta en prueba del inversor.

Los resultados publicados para prototipos de laboratorio señalan porcentajes de degradación/remoción superiores al 90% para NO_x, valor que se reduce en aplicaciones industriales con mayor cantidad de material a tratar.

Se establecieron algunas de las limitantes del escalamiento de tecnologías de plasma, como la elección de materiales para operar a largo plazo, la energía requerida, la ampliación de los reactores de laboratorio con tasas de litros por minuto (o menos) a unidades industriales de metros cúbicos por segundo, la caracterización completa y el control de la formación de subproductos, la dependencia en la concentración, entre otras.

2.9 Literatura Citada

- [1] Roth, J. R. (1995). *Industrial Plasma Engineering. Volume 1: Principles*. Institute of Physics Publishing, ISBN 0750303174.
- [2] Ludwig, P., *et al.* (2010). *Complex Plasmas*. Chapter 1, 3-13. En: Bonitz, M., *et al.* (Eds.). *Introduction to Complex Plasmas*. Springer, ISBN 9783642105913.
- [3] Home, R. W. (1966). *Francis Hauksbee's Theory of Electricity*. Archive for History of Exact Sciences, DOI: 10.1007/BF00412960.
- [4] Hauksbee, F. (1709). *Physico-mechanical Experiments on Various Subjects, Containing an Account of Several Surprising Phenomena Touching Light and Electricity, Producing on the Attrition of Bodies: With Many Other Remarkable Appearances, not Before Observ'd*. R. Brugis, ISBN ND.
- [5] Wikipedia (2013, 8 de agosto). Benjamin Franklin. Recuperado de es.wikipedia.org/wiki/Benjamin_franklin.
- [6] Langmuir, I. (1928). *Oscillations in Ionized Gases*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, DOI: 10.1073/pnas.14.8.627.
- [7] Mott-Smith, M. C. (1971). *History of "Plasmas"*. Nature, DOI: 10.1038/233219a0.
- [8] Fridman, A. (2008). *Plasma Chemistry*. Cambridge University Press, ISBN 9780511398575.
- [9] Stern, D. P. y Peredo, M. (2013, 9 de agosto). *Física del Plasma - Historia*. Recuperado de www-spf.gsf.nasa.gov/Education/Mhplasma.html.
- [10] Hurricane, O. A., *et al.* (2014). *Fuel Gain Exceeding Unity in an Inertially Confined Fusion Implosion*. Nature, DOI: 10.1038/nature13008.
- [11] Boulos, M. I., *et al.* (1994). *Thermal Plasmas. Volume 1: Fundamentals and Applications*. Springer Science & Business Media, ISBN 9780306446078.
- [12] Heberlein, J. y Murphy, A. B. (2008). *Thermal Plasma Waste Treatment*. Journal of Physics D: Applied Physics, DOI: 10.1088/0022-3727/41/5/053001.
- [13] Tapia, J., *et al.* (2007). *Mixed Wastes Vitrification by Transferred Plasma*. Plasma Science and Technology, DOI: 10.1088/1009-0630/9/6/19.
- [14] Pacheco, J. O., *et al.* (2014). *An Environmental Application in Acid Gas Cracking With a High-Frequency Pulsed Gliding Arc*. IEEE Transactions on Plasma Science, DOI: 10.1109/TPS.2014.2299732.
- [15] Pourali, M., (2010). *Application of Plasma Gasification Technology in Waste to Energy Challenges and Opportunities*. IEEE Transactions on Sustainable Energy, DOI: 10.1109/TSTE.2010.2061242.
- [16] Circeo, L. J., *et al.* (1997). *Evaluation of Plasma Arc Technology for the Treatment of Municipal Solid Wastes in Georgia*. The Construction Research Center, ID: 30332-0159.
- [17] Leal, E. y Villafañe, C. R. (2007). *An Assessment of the Power Generated with Plasma Processing of Sludge From Wastewater Treatment Plants*. IEEE Transactions on Plasma Science, DOI: 10.1109/TPS.2007.904826.
- [18] Meichsner, J. (2010). *Nonthermal Reactive Plasmas*. Chapter 11, 267-298. En: Bonitz, M., *et al.* (Eds.). *Introduction to Complex Plasmas*. Springer, ISBN 9783642105913.
- [19] Fridman, A. y Fridman, G. (2012). *Plasma Medicine*. John Wiley & Sons, ISBN 9781118437698.
- [20] Roth, J. R. (2001). *Industrial Plasma Engineering. Volume 2: Applications to Nonthermal Plasma Processing*. Institute of Physics Publishing, ISBN 0750305452.
- [21] Federal-Mogul (2013, 15 de septiembre). *Advanced Corona Ignition System*. Recuperado de www.federalmogul.com/en-US/OE/Leading-Technologies/Pages/Product-Details.aspx?CategoryId=2&ProductId=224#U8nUp-N5PAF.
- [22] Inan, U. S. y Golkowski, M. (2011). *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*. Cambridge University Press, ISBN 9780521193726.
- [23] Kaganovich, I. D. (2010). *Principles of Transport in Multicomponent Plasmas*. Chapter 2, 17-39. En: Bonitz, M., *et al.* (Eds.). *Introduction to Complex Plasmas*. Springer, ISBN 9783642105913.



- [24] Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, DOI: 10.1023/A:1022470901385.
- [25] Kang, W. S., *et al.* (2003). Numerical Study on Influences of Barrier Arrangements on Dielectric Barrier Discharge Characteristics. *IEEE Transactions on Plasma Science*, DOI: 10.1109/TPS.2003.815469.
- [26] Kogelschatz, U., *et al.* (1999). From Ozone Generators to Fat Television Screens: History and Future Potential of Dielectric-Barrier Discharges. *Pure and Applied Chemistry*, DOI: 10.1351/pac199971101819.
- [27] Bhosle, S., *et al.* (2004). Calculation of the Impedance of an Axisymmetric DBD Lamp for Power Supply Design Purpose. 39th IAS, DOI: 10.1109/IAS.2004.1348694.
- [28] Valdivia, R. (2008). Efecto de la Frecuencia de Excitación en la Conductividad Eléctrica de Gases Ionizados: Estudio y Desarrollo Electrotécnico. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca, México.
- [29] Mohan, N. (2013). *Power Electronics: First Course*. Wiley, ISBN 9781118074800.
- [30] Pressman, M. H., *et al.* (2009). *Switching Power Supply Design*. McGraw-Hill, ISBN 9780071594325.
- [31] Rashid, M. H. (2001). *Power Electronics Handbook. Devices, Circuits and Applications*. Elsevier, ISBN 9781613441640.
- [32] Paschen, F. (1889). Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz. *Annalen der Physik*, DOI: 10.1002/andp.18892730505.
- [33] Ivensky, G., *et al.* (1997). Current-Fed Multiresonant Isolated CD-CD Converter. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, DOI: 10.1109/7.570708.
- [34] Mohammad, K. (2007). *Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies (Part I)*. Microchip Technology Inc., ID: AN1114.
- [35] Bersani, A. (2009). *Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies (Part II)*. Microchip Technology Inc., ID: AN1207.
- [36] McLyman, C. W. T. (2004). *Transformer and Inductor Design*. Third Edition, Revised and Expanded. Marcel Dekker, ISBN 0824753933.
- [37] Gulko, M. y Ben-Yaakov, S. (1993). Current-Sourcing Push-Pull Parallel-Resonance Inverter (CS-PPRI): Theory and Application as a Fluorescent Lamp Driver. *APEC '93*. DOI: 10.1109/APEC.1993.290693.
- [38] Madawala, U. K. y Thrimawithana, D. J. (2008). Mathematical Model for Split-Capacitor Push-Pull Parallel Resonant Converter in Buck Mode. *Power Electronics (IET)*, DOI: 10.1049/iet-pel:20070032.
- [39] Peretz, M. M. y Ben-Yaakov, S. (2005). The Self-Adjusting Current-Fed Push-Pull Parallel Resonant Inverter as a High Frequency CA Bus Driver. 23rd IEEE Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. DOI: 10.1109/EEEI.2004.1361086.
- [40] Thrimawithana, D. J., *et al.* (2006). A Novel Buck-Boost Control Technique for Push-Pull Parallel-Resonant Converters. *IECON 2006*, DOI: 10.1109/IECON.2006.347640.
- [41] Thrimawithana, D. J. y Madawala, U. K. (2008). Analysis of Split-Capacitor Push-Pull Parallel-Resonant Converter in Boost Mode. *IEEE Transactions on Power Electronics*, DOI: 10.1109/TPEL.2007.911860.
- [42] Thrimawithana, D. J. y Madawala, U. K. (2009). Modelling and Analysis of Split-Capacitor Push-Pull Parallel-Resonant Converter in Normal Mode. *International Journal of Industrial Electronics and Drives*, DOI: 10.1504/IJIED.2009.025345.
- [43] Manley, T. C. (1943). The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, DOI: 10.1149/1.3071556.
- [44] WolframAlpha (2013, 17 de octubre). Lissajous Curve. Recuperado de www.wolframalpha.com/input/?i=bowditch+curve.
- [45] Kunhardt, E. E. (2000). Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure, Nonequilibrium Plasmas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, DOI: 10.1109/27.842901.
- [46] Becker, K. H. (2010). The Use of Nonthermal Plasmas in Environmental Applications. Chapter 2, 17-39. En: Bonitz, M., *et al.* (Eds.). *Introduction to Complex Plasmas*. Springer, ISBN 9783642105913.
- [47] E.P.A. (2005). Using Non-Thermal Plasma to Control Air Pollutants. U.S. Environmental Protection Agency, ID: EPA-456/R-05-001.
- [48] Deminsky, M. (2002). Plasma-Assisted Production of Hydrogen from Hydrocarbons. *Pure and Applied Chemistry*, DOI: 10.1351/pac200274030413.
- [49] Mutaf-Yardimci, O. (2001). Plasma-Catalysis in Hydrocarbon Processing by Using Non-Equilibrium Plasma Discharges. Tesis Doctoral. University of Illinois at Chicago, U.S.A.
- [50] Heintze, M. y Pietruszka, B. (2002). Plasma Catalytic Conversion of Methane into Syngas: the Combined Effect of Discharge Activation and Catalysis. *Catalysis Today*, DOI: 10.1016/j.cattod.2003.11.006.
- [51] Xu, F., *et al.* (2009). Simultaneous Oxidation of NO, SO₂ and Hg⁰ From Flue Gas by Pulsed Corona Discharge. *Journal of Environmental Sciences*, DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62272-X.
- [52] Shang, K. F., *et al.* (2006). Reduction of NO_x/SO₂ by Wire-Plate Type Pulsed Discharge Reactor with Pulsed Corona Radical Shower. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, DOI: 10.1007/s11090-006-9026-2.
- [53] Jaramillo, B., *et al.* (2009). Reduction of SO₂ in a Pulsed Corona Discharge Reactor: Nitrogen, Oxygen and Hydrogen Sulphur Effect. 19th ISPC, DOI: ND.
- [54] Zhang, Z., *et al.* (2012). Removal of SO₂ from Simulated Flue Gases Using Non-Thermal Plasma-Based Microgap Discharge. *Journal of the Air & Waste Management Association*, DOI: 10.1080/10473289.2006.10464501.
- [55] Gottschalk, C., *et al.* (2010). *Ozonation of Water and Waste Water. A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications*. Wiley, ISBN 9783527319626.
- [56] Siemens, W. (1857). Ueber die Elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähnen. *Annalen der Physik*, DOI: 10.1002/andp.18571780905.
- [57] Ohlmüller, W. (1893). Ueber die Einwirkung des Ozons auf Bakterien. Springer. ISBN ND.
- [58] Brosés, R., *et al.* (2009). Ozone Oxidation of Pharmaceuticals, Endocrine Disruptors and Pesticides During Drinking Water Treatment. *Water Research*, DOI: 10.1016/j.watres.2009.07.031.
- [59] Hua, W., *et al.* (2006). Ozone Treatment and the Depletion of Detectable Pharmaceuticals and Atrazine Herbicide in Drinking Water Sourced from the Upper Detroit River, Ontario, Canada. *Water Research*, DOI: 10.1016/j.watres.2006.04.033.
- [60] Vieno, N. M., *et al.* (2007). Occurrence of Pharmaceuticals in River Water and their Elimination in a Pilot-Scale Drinking Water Treatment Plant. *Environmental Science & Technology*, DOI: 10.1021/es062720x.
- [61] Penetrante, B. M., *et al.* (2002). Plasma-Assisted Catalytic Storage Reduction System. Patente, US6038853 A.
- [62] Jeon, S. G., *et al.* (2007). Effective Combination of Non-Thermal Plasma and Catalyst for Removal of Volatile Organic Compounds and NO_x. *Korean Journal of Chemical Engineering*, DOI: 10.1007/s11814-007-0092-9.
- [63] Niu, J., *et al.* (2006). Plasma-Assisted Selective Catalytic Reduction of NO_x by C₂H₂ Over Co-HZSM-5 Catalyst. *Catalysis Communications*, DOI: 10.1016/j.catcom.2005.10.016.
- [64] Nie, Y., *et al.* (2007). Synergy Study for Plasma-Facilitated C₂H₄ Selective Catalytic Reduction of NO_x Over Ag/γ-Al₂O₃ Catalyst. *IEEE Transactions on Plasma Science*, DOI: 10.1109/TPS.2007.896764.



- [65] Wang, X. Q., *et al.* (2009). Characteristics of NO_x Removal Combining Dielectric Barrier Discharge Plasma with Selective Catalytic Reduction by C₂H₅OH. *Journal of Applied Physics*, DOI: 10.1063/1.3160294.
- [66] Mok, Y. S. y Huh, Y. J. (2005). Simultaneous Removal of Nitrogen Oxides and Particulate Matters from Diesel Engine Exhaust Using Dielectric Barrier Discharge and Catalysis Hybrid System. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, DOI: 10.1007/s11090-005-6817-9.
- [67] Cha, M. S., *et al.* (2007). NO_x and Soot Reduction Using Dielectric Barrier Discharge and NH₃ Selective Catalytic Reduction in Diesel Exhaust. *International Journal of Plasma Environmental Science & Technology*, DOI: ND.
- [68] Rajanikanth, B. S. y Srinivasan, A. D. (2007). Pulsed Plasma Promoted Adsorption/Catalysis for NO_x Removal from Stationary Diesel Engine Exhaust. DOI: 10.1109/TDEL.2007.344608.
- [69] Okubo, M., *et al.* (2010). Single-Stage Simultaneous Reduction of Diesel Particulate and NO_x Using Oxygen-Lean Nonthermal Plasma Application. *IEEE Transactions on Industry Applications*, DOI: 10.1109/TIA.2010.2071070.
- [70] Song, C. L., *et al.* (2009). Simultaneous Removals of NO_x, HC and PM from Diesel Exhaust Emissions by Dielectric Barrier Discharges. *Journal of Hazardous Materials*, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.11.068.
- [71] Kuwahara, T., *et al.* (2011). Improvement of NO_x Reduction Efficiency in Diesel Emission Control Using Nonthermal Plasma Combined Exhaust Gas Recirculation Process. *IEEE Transactions on Industry Applications*, DOI: 10.1109/TIA.2011.2168590.
- [72] Moreno, H., *et al.* (2006). Toxic Gas Removal by Dielectric Discharge with Corona Effect. *AIP* 2005, DOI: 10.1063/1.2405941.
- [73] Moreno, H., *et al.* (2007). Modeling and Experimental Study on Nitric Oxide Treatment Using Dielectric Barrier Discharge. *IEEE Transactions on Plasma Science*, DOI: 10.1109/TPS.2007.905951.
- [74] Moreno, H. (2008). Degradación de Gases Tóxicos, NO_x y SO₂, Mediante Descarga de Barrera Dieléctrica-Corona. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca, México.
- [75] Wang, T., *et al.* (2013). Effect of Water Vapor on NO Removal in a DBD Reactor at Different Temperatures. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, DOI: 10.1007/s11090-013-9452-x.
- [76] Pacheco, M. J., *et al.* (2007). DBD-Corona Discharge for Degradation of Toxic Gases. *Plasma Science and Technology*, DOI: 10.1088/1009-0630/9/6/09.
- [77] Pacheco, M. J., *et al.* (2008). Application of Non-Thermal Plasma on Gas Cleansing. *Physica Scripta*, DOI: 10.1088/0031-8949/2008/T131/014017.
- [78] Pacheco, M. J., *et al.* (2008). OES Analysis in a Nonthermal Plasma Used for Toxic Gas Removal: Rotational and Excitation Temperature Estimation. *Laser Physics*, DOI: 10.1134/S1054660X08030183.
- [79] Pacheco, M. J., *et al.* (2012). Removal of Main Exhaust Gases of Vehicles by a Double Dielectric Barrier Discharge. *14th LAWPP*, DOI: 10.1088/1742-6596/370/1/012023.
- [80] Pacheco, M. J., *et al.* (2013). Tratamiento de Emisiones de Motores Diesel por Plasma Fuera de Equilibrio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, DOI: ND.
- [81] Pacheco, J. O., *et al.* (2004). A Universal Resonant Converter for Equilibrium and Nonequilibrium Plasma Discharges, *IEEE Transactions on Plasma Science*, DOI: 10.1109/TPS.2004.835968.
- [82] Valdivia, R., *et al.* (2006). Analysis and Electrical Modeling of a Cylindrical DBD at Different Operating Frequencies. *Plasma Sources Science and Technology*, DOI: 10.1088/0963-0252/15/2/008.
- [83] Godoy, O., *et al.* (2004). High-Voltage and High-Frequency Inverter Controlled by DPLL for Cold Plasma Applications. *International Journal of Electronics*, DOI: 10.1080/0020721050014813.
- [84] Flores, A. A., *et al.* (2006). A Multicell Converter Model of DBD Plasma Discharges. *American Institute of Physics*, DOI: 10.1063/1.2405927.
- [85] Mercado, A., *et al.* (2006). NO_x Treatment by Dielectric Barrier Discharge. *American Institute of Physics*, DOI: 10.1063/1.2405939.
- [86] Mercado, A., *et al.* (2008). NO_x Removal Enhancement by a Jerks – and – Jumps Type Electrode in a Dielectric Barrier Discharge. *IVC-17/ICSS-13/ICN+T 2007*, DOI: 10.1088/1742-6596/100/6/062014.
- [87] Mercado, A., *et al.* (2008). Jerks-and-Jumps Type Electrode Diagnostics in a DBD Reactor by OES. *Laser Physics*, DOI: 10.1134/S1054660X0803016X.
- [88] Flores, A. A., *et al.* (2009). Three Cell Flying Capacitor Inverter for Dielectric Barrier Discharge Plasma Applications. *Brazilian Journal of Physics*, DOI: ND.
- [89] Flores, M. M., *et al.* (2009). NO_x Chemical Reduction in a Cylindrical DBD Reactor: Theoretical and Experimental Analysis. *6th Conference of the SFE*, DOI: ND.
- [90] López, J. A., *et al.* (2012). DBD Reactor Instrumentation for NO_x Degradation. *The European Physical Journal Applied Physics*, DOI: 10.1051/epjap/2011110178.
- [91] Quiroz, V. E., *et al.* (2012). Power Supply Instrumentation for Pulsed Dielectric Barrier Discharges. *14th LAWPP*, DOI: 10.1088/1742-6596/370/1/012064.
- [92] Takaki, K., *et al.* (2004). Effect of Electrode Shape in Dielectric Barrier Discharge Plasma Reactor for NO_x Removal. *IEEE Transactions on Plasma Science*, DOI: 10.1109/TPS.2004.823973.
- [93] Estrada, N., *et al.* (2011). Chemical and Electrical Diagnosis of Two Configurations of Dielectric Barrier Discharges Applied to Nitric Oxides Degradation. *Superficies y Vacío*, DOI: ND.
- [94] Estrada, N. (2012). Estudio de un Reactor de Doble Barrera Dieléctrica y su Aplicación en el Tratamiento de Efluentes Gaseosos. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México.
- [95] Kambara, S., *et al.* (2009). DeNO_x Characteristics Using Two Staged Radical Injection Techniques. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, DOI: 10.1109/TDEL.2009.5128518.
- [96] Obradovic, B. M., *et al.* (2011). A Dual-Use of DBD Plasma for Simultaneous NO_x and SO₂ Removal from Coal-Combustion Flue Gas. *Journal of Hazardous Materials*, DOI: 10.1016/j.jhazmat.2010.10.043.
- [97] Khacef, A. y Cormier, J. M. (2006). Pulsed Sub-microsecond Dielectric Barrier Discharge Treatment of Simulated Glass Manufacturing Industry Flue Gas: Removal of SO₂ and NO_x. *Journal of Physics D: Applied Physics*, DOI: 10.1088/0022-3727/39/6/013.
- [98] Fujishima, H., *et al.* (2010). Performance Characteristics of Pilot-Scale Indirect Plasma and Chemical System Used for the Removal of NO_x From Boiler Emission. *IEEE Transactions on Industry Applications*, DOI: 10.1109/TIA.2010.2057490.
- [99] Fujishima, H., *et al.* (2010). Improvement in NO_x Removal Performance of the Pilot-Scale Boiler Emission Control System Using an Indirect Plasma–Chemical Process. *IEEE Transactions on Industry Applications*, DOI: 10.1109/TIA.2010.2058079.





CAPÍTULO



DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

El desarrollo experimental de este trabajo se realizó en el Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas, Departamento de Estudios del Ambiente/Gerencia de Ciencias Ambientales, del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, bajo el Centro de Costos AM-109. Se debe tener presente que el Instituto se localiza a una altitud de 3.10 km snm, con una presión atmosférica de 73.97 kPa (0.73 atm).

En este proyecto se emplearon dos reactores $C - DBD_2$ elaborados de alúmina, el suministro de gas fue a través de dos válvulas de control y un mezclador; para ionizar el gas se diseñó y construyó un sistema de potencia integrado por una fuente de voltaje de CD y un inversor de alto voltaje y alta frecuencia. Dentro de la caracterización eléctrica se ocuparon osciloscopios, sondas de alto voltaje y corriente. La eficiencia de degradación del reactor se evidenció con los datos proporcionados por un analizador de gases residuales (RGA). Una vez instalados los dispositivos, se iniciaron las pruebas con diferentes mezclas de gases adquiridos en INFRA®.

La mayoría de los dispositivos empleados fueron instalados para ser operados *in situ*. Con el fin de facilitar su ajuste durante las pruebas, adicionalmente se programaron instrumentos virtuales (VI) y se unificaron en una interfaz virtual (GUI) que permite su manipulación desde un panel central de lazo abierto, que al estar en red habilita su control

desde cualquier parte de mundo. Esta instrumentación virtual se facilitó mediante el desarrollo gráfico de sistemas (GSD), que conjunta la programación en lenguaje G y una tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

Como software de apoyo para diagnóstico se utilizaron códigos y simulaciones desarrollados en las versiones de prueba de MathCAD® para obtener numéricamente el valor de la potencia entregada al reactor mediante su cálculo por Figuras de Lissajous, y en Simulink® para reproducir el circuito eléctrico, el cual se diseñó con Eagle® e IsoPro® y se manufacturó con un Quick Circuit QC5000®.

A continuación se describen cada una de las partes que componen el experimento.

3.2 Reactor de Barrera Dieléctrica

Se implementaron dos reactores con geometría coaxial compuestos de tubos concéntricos de alúmina (aislante) y acero (electrodos), donde en la capa más exterior se ubica el electrodo GND que envuelve a la primera capa del aislante y en el centro se encuentra la segunda capa de alúmina que recubre al electrodo HV. La decisión de utilizar estos reactores de doble capa dieléctrica se basa en investigaciones

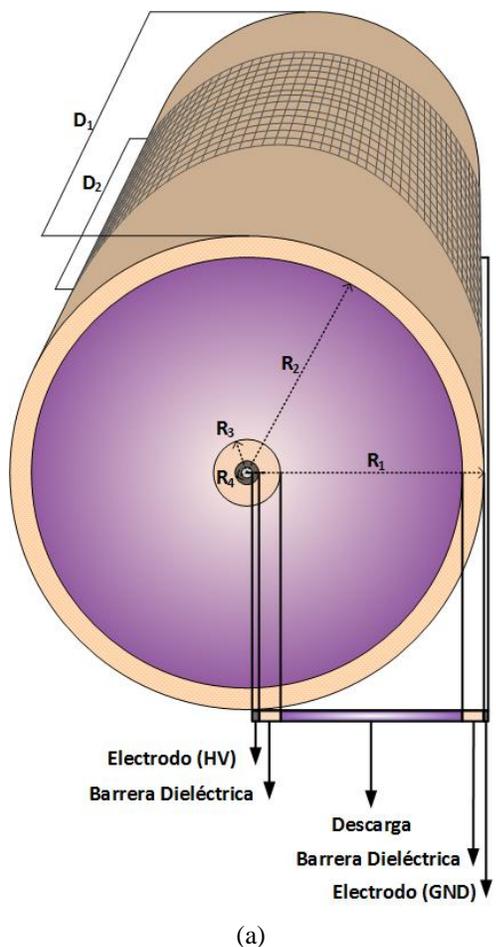


previas realizadas por Estrada [1] y Valdivia [2], donde se muestra su estabilidad durante las descargas, a diferencia de otras geometrías como las planas o las coaxiales con un único dieléctrico.

De acuerdo con la Figura 3.1.a, las dimensiones y características físicas del primer reactor ($C - DBD_2^A$) son: 15.40 mm de radio exterior (R_1), 12 mm de radio interno (R_2), 19.30 cm de longitud (D_1), 4.85 mm de radio del aislante interno (R_3); **HV** está hecho de un tubo hueco de acero inoxidable de 13.62 cm de longitud y 1.57 mm de grosor, con un radio de 3.16 mm (R_4). En el segundo caso, el reactor dos ($C - DBD_2^B$) mide 6.26 mm de radio exterior (R_1), 4.45 mm de radio interno (R_2), 19.50 cm de longitud (D_1), 3.23 mm de radio del aislante interno (R_3); el electrodo **HV** es una varilla de acero de 21.60 cm de longitud y radio de 2.2 mm (R_4). En ambos casos, el electrodo **GND** es una malla de acero inoxidable de 0.8 mm de grosor con 11.37 y 12.30 cm de longitud (D_2), respectivamente.

Como se observa en la Figura 3.1.b, los reactores tienen una boquilla de entrada de gas en la parte superior y otra en la parte inferior de desfogue del gas ya tratado. La entrada está conectada directamente a un mezclador y el gas de salida se distribuye con un conector tipo T: una vía hacia una válvula manual con la que se regula el flujo de la muestra de entrada hacia el RGA, y la otra vía hacia el respiradero.

En pruebas iniciales realizadas con un reactor $C - DBD_2^B$ de pírex se causó daño a su estructura, debido a que se hizo fluir nitrógeno y las condiciones de la descarga propiciaron un cambio tal en el dieléctrico que provocó su fisuramiento (Figura 3.2). Ésta es una razón más por la que se seleccionó la alúmina como material de los nuevos reactores, ya que ofrece mayor resistencia al experimento; sin embargo, una de las desventajas que presenta es su alta constante dieléctrica (para el pírex es de ~ 4.89 y para la alúmina de ~ 9.55 [3]) y significa un reto mayor en el diseño de la fuente de voltaje.



3.3 Líneas de Gas

A partir de los estudios previos realizados en [4], que establecen la composición y concentraciones de una muestra

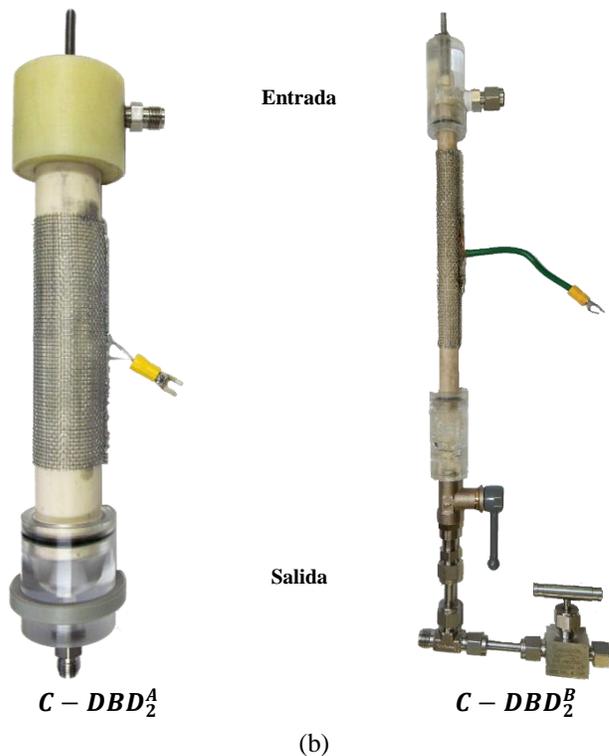


Figura 3.1. Reactor coaxial de doble barrera dieléctrica. (a) Esquema del reactor. (b) Fotografías de los reactores implementados.



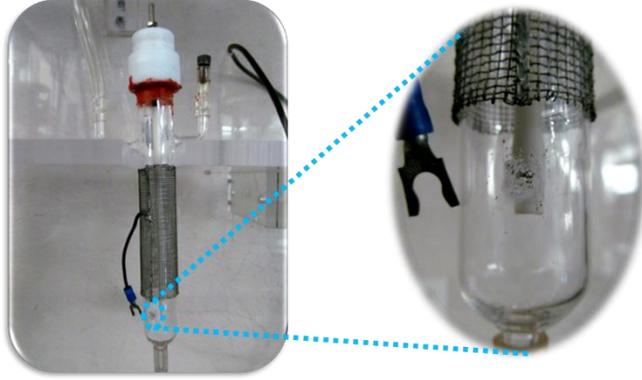


Figura 3.2. Reactor $C - DBD_2$ de pírax. Daño ocasionado por la descarga en atmósfera de nitrógeno.

sin-tética de gas de combustión, en este trabajo se usaron dos gases adquiridos en INFRA@: la mezcla CAM 96 Middle Range (CAM), compuesta de propano (C_3H_8), CO, CO_2 y NO, balanceados en N_2 (ver las concentraciones en la Tabla 3.1), y Helio Industrial (He). Para suministrar la mezcla gaseosa se instalaron dos válvulas de flujo másico (MFC), una MKS™ MFC-M1000B con capacidad de 0 a 10 $l\ min^{-1}$ para la CAM (MFC₁), y una Omega™ FMA-A2315 con capacidad de 0 a 40 $l\ min^{-1}$ para el gas de acarreo (MFC₂), en este caso He; ambas válvulas fueron conectadas a un controlador MKS™ 247D (Figura 3.3). Debido a que los MFC están calibrados para flujos de N_2 , se deben ajustar las mediciones para el gas correspondiente con ayuda de las Ecuaciones (3.1)-(3.4) [5]-[7]. Los ajustes realizados se agrupan en la Tabla 3.1.

$$GCF_{CAM} = 0.3106 \sum_{i=1}^n a_i s_i \left(\sum_{i=1}^n a_i d_i Cp_i \right)^{-1} \quad (3.1)$$

$$SCF = (GF)(GCF_{CAM}) \quad (3.2)$$

$$Flujo_{CAM} = (GCF_{CAM})(Flujo_{N_2}) \quad (3.3)$$

$$Flujo_{He} = 1.454 Flujo_{N_2} \quad (3.4)$$

donde:

- GCF_{CAM} = factor de corrección de la mezcla CAM compuesta de n gases,
- d_i = densidad del i -ésimo gas [$g\ l^{-1}, 0\ ^\circ C @ 760\ mmHg$],
- Cp_i = calor específico del i -ésimo gas [$cal\ g^{-1}\ ^\circ C^{-1}$],

- 0.3106 = $(d_{N_2})(Cp_{N_2})$,
- a_i = fracción de flujo del i -ésimo gas,
- s_i = factor de corrección debido a la estructura molecular del i -ésimo gas, igual a:
 - 1.030 para gases monoatómicos,
 - 1.000 para gases diatómicos,
 - 0.941 para gases triatómicos,
 - 0.880 para gases poliatómicos,
- SCF = factor de corrección de escala, y
- GF = factor de corrección de la válvula.

Los MFC se controlan con el 247D mediante conexiones DB₁₅ localizadas en su panel trasero, donde también se ubican potenciómetros que ajustan el SCF. Estas resistencias son divisores de voltaje de la señal de control (0-5 V) y al mismo tiempo permiten obtener la medición respectiva del transductor flujo-voltaje o MFC (0-5 V). Las dos señales de control/monitoreo se visualizan en el display del 247D, que por defecto muestra la lectura del flujo a través del MFC, pero al cambiar de estado el interruptor *Set Pt.* despliega el valor de la señal de control, representada en $l\ min^{-1}$. El 247D cuenta adicionalmente con opciones de ajuste de posición a cero, indicadores de estado de los MFC y un selector de comunicación manual/remota.

Conforme al valor nominal de cada MFC y con uso de las Ecuaciones 3.3 y 3.4, se determinó que el flujo máximo de la mezcla He-CAM es de 67.754 $l\ min^{-1}$, en una relación de porcentaje 85.84-14.16 % (58.15 $l\ min^{-1}$ de He y 9.59 $l\ min^{-1}$ de CAM).

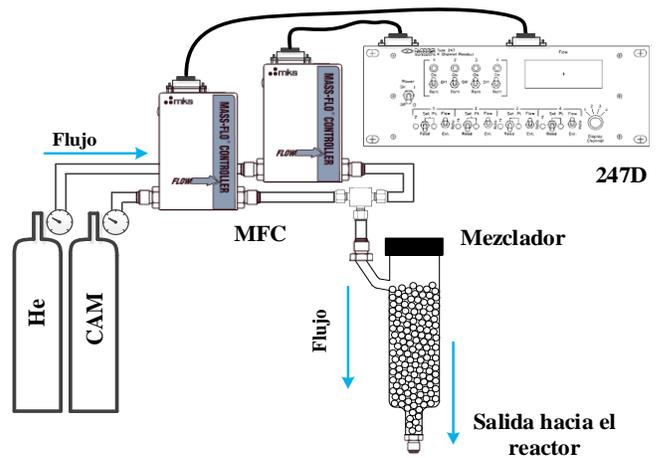


Figura 3.3. Representación de las líneas de gas.



TABLA 3.1
FLUJOS Y CONCENTRACIONES GENERALES DE LA MEZCLA DE GAS

Gas	d_i [g l ⁻¹]	Cp_i [cal g ⁻¹ °C ⁻¹]	GCF individual	Concentración [%vol.]	Error [%]	Factor de Corrección	MFC [l min ⁻¹]
Helio	0.1786	1.2410	-	100	-	1.4540	58.15
CAM						0.9594	9.59
C ₃ H ₈	1.9670	0.3885	0.36	0.119988	± 1.0	-	-
CO	1.2500	0.2488	1.00	3.99	± 1.0	-	-
CO ₂	1.9640	0.2016	0.70	11.99	± 1.0	-	-
NO	1.3390	0.2328	0.99	0.30006	± 1.0	-	-
N ₂	1.2500	0.2485	1.00	83.599952	± 4.0	-	-

Elaboración propia con datos obtenidos de [5]-[7].

3.4 Inversor Push-Pull

El diagrama eléctrico del PPI se bosqueja en la Figura 3.4, tanto el diseño como los valores y las matrículas de los dispositivos involucrados se discutirán en esta sección y se agregan vínculos a sus hojas de datos en el Anexo A.

Los transistores Q_1 y Q_2 son dos MOSFET modelo IXFN80N50, como características principales presentan un $V_{DS(M\acute{A}x)} = 500\text{ V}$, una $I_{DS(M\acute{A}x)} = 80\text{ A}$ y una $R_{DS(M\acute{A}x)} = 55\text{ m}\Omega$. Estos dispositivos están encapsulados en un empaque tipo SOT-227 que disipa el calor por medio de una base de cobre acoplada a un ventilador. Este método de disipación de calor es preventivo, puesto que la carga final no demanda corrientes relacionadas a temperatura alta.

C_{PP} es un condensador de poliéster de 3.2 nF y forma el circuito tanque resonante con T_{PP} ; este último está compuesto por L_1 , L_2 y L_3 , con una ganancia estimada M de 100 cada vez que se activa uno de los devanados primarios. El valor de M se determinó experimentalmente al introducir voltajes en el devanado primario y medir el voltaje inducido al devanado secundario. Las bobinas primarias, L_1 y L_2 , tienen una inductancia similar de 320 μH , mientras que el secundario L_3 de 50 mH. En paralelo al secundario está la carga R_{PP} de 100 $\text{M}\Omega$ @ 10 W, esta resistencia sirve para proporcionar una vía de descarga a la corriente en L_3 una vez que se han extinguido las descargas. Con estos valores, al aplicar la Ecuación 2.21 se determina que $f_R = 111.21\text{ kHz}$. Cada una de las tres bobinas de T_{PP} están arrolladas sobre ferrita grado 3C94, Ferroxcube© U126/91/20-3C94. Este núcleo tiene como características: $L_{UPP} = 48\text{ cm}$, $A_{UPP} = 5.6\text{ cm}^2$ y $\mu_{PP} = 2050$, con un peso de 1.36 kg.

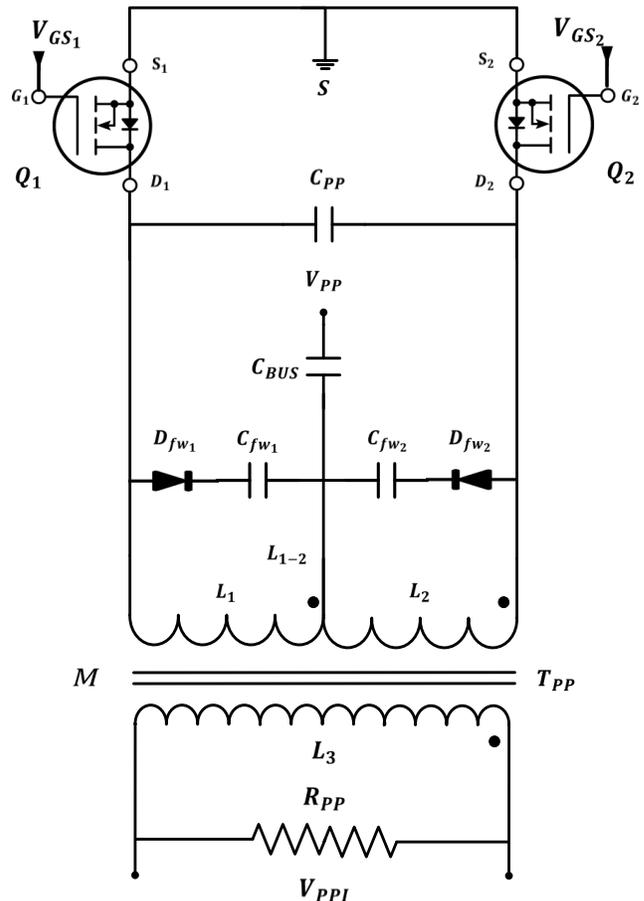


Figura 3.4. Inversor push-pull elaborado.

V_{PP} se obtiene de la SMPS B&K® PRECISION XLN10014, que puede proporcionar una potencia máxima de 1.44 kW (100 V @ 14.4 A); está conectada en cascada con el PPI, pero



como consecuencia de las conmutaciones de ambas SMPS, V_{PP} presenta un riso bastante considerable que va desde 0 V hasta más de dos veces el voltaje establecido conforme aumenta f_{PWM} . Para disminuir este efecto, se colocó un filtro capacitivo (C_{BUS}) conformado de un condensador electrolítico de 5 mF en paralelo con un capacitor de poliéster de 100 nF. Con C_{BUS} , V_{PP} oscila en un máximo de $\pm 5\%$ del voltaje establecido (Figura 3.5).

Para ofrecer un camino a la corriente una vez que el transistor MOSFET está en el estado ABIERTO y evitar el almacenamiento de energía en el primario de T_{PP} , en cada uno de los devanados L_1 y L_2 se colocó un circuito de rodamiento libre compuesto por un capacitor (C_{fw}) y un diodo (D_{fw}). Este arreglo reduce los efectos de variación de la corriente di/dt . $C_{fw1} = C_{fw2} = 500$ pF y tanto D_{fw1} como D_{fw2} son diodos de recuperación rápida, matrícula: STPR1620CT, que operan hasta 200 V @ 16 A. De igual forma, se reduce el pico de voltaje que se genera por la inductancia de fuga durante el flanco de bajada de V_{GS} .

3.4.1 Pulsos de Control

Para generar las señales de control V_{GS} se elaboró un circuito oscilador en el cual f_{PWM} y D_{PWM} se manipulan mediante la variación de potenciómetros a través del integrado TL594. Como consecuencia de la demanda de corriente en las compuertas de los MOSFET en cada cambio de estado, las sa

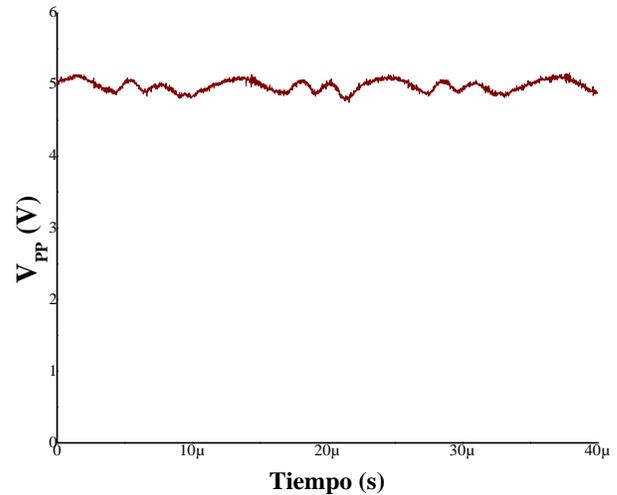


Figura 3.5. Riso de $V_{PP} = 5$ V en C_{BUS} , con $f_{pwm} = 41$ kHz.

lidas E_1 y E_2 (V_{GS}') del oscilador se conectan a un arreglo *totem pole* encapsulado en el TC4422 (Figura 3.6), capaz de manejar corrientes en estado estacionario de 2 A con variaciones de hasta 9 A. La salida de este circuito es un par de pulsos V_{GS} conectados en serie a una resistencia de potencia de 4.7 Ω para limitar la corriente en la compuerta (G) de cada MOSFET.

De acuerdo con la Figura 3.6, el TL594 se polarizó de tal forma que en C_T exista una señal de diente de sierra con una frecuencia de oscilación $\sim \frac{1.1}{R_T C_T}$; se escogió una capacitancia

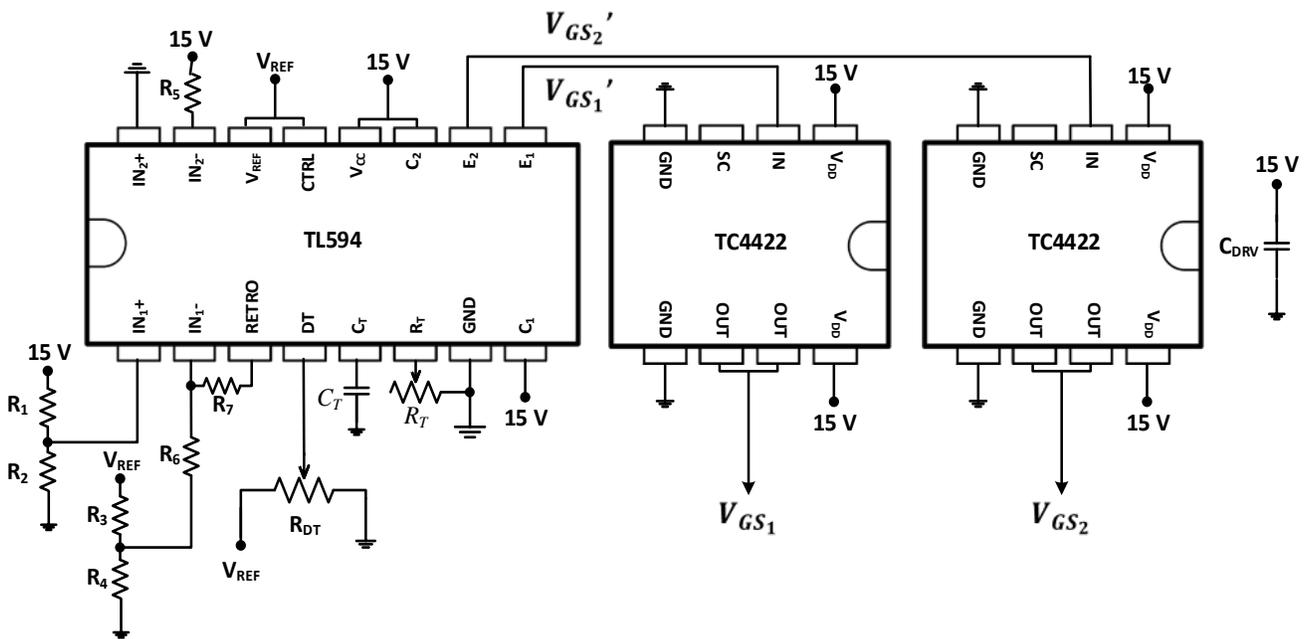


Figura 3.6. Circuito oscilador y controlador de los pulsos de control de compuerta V_{GS} .



de 470 pF y un potenciómetro $7.8\text{ k}\Omega \leq R_T \leq 500\text{ k}\Omega$. Con estos valores la frecuencia de los pulsos varía en el rango: $300\text{ kHz} \geq f_{PWM} \geq 4.70\text{ kHz}$. Por otro lado, el ciclo de trabajo se opera mediante un divisor de voltaje de $V_{REF} = 5\text{ V}$ con $R_{DT} \leq 5\text{ k}\Omega$ en la terminal **DT**, donde V_{REF} y $CTRL$ deben ser iguales para asegurar que $D_{PWM(MAX)}$ sea de 0.5. Los valores del resto de los elementos son: $R_1 = 47\text{ k}\Omega$, $R_{2,3,4} = 3.3\text{ k}\Omega$, $R_5 = 10\text{ k}\Omega$, $R_6 = 100\text{ k}\Omega$, $R_7 = 27\text{ k}\Omega$ y $C_{DRV} = 100\text{ nF}$. Se debe procurar que este último capacitor se coloque lo más cerca posible entre cada V_{DD} y GND , para obtener un pulso estable con buena forma de onda. Aunque en el esquema de la Figura 3.6 la alimentación eléctrica es de 15 V, el circuito opera desde 7 hasta 20 V.

En la Figura 3.7 se grafican las formas de onda de los trenes de pulsos a una amplitud de 12 V, con frecuencia y ciclo de servicio aproximados de 41.3 kHz y 25.5% (los datos se obtuvieron de los osciloscopios AEMC® OX 7104 III y GW® Instek GDS-122 con el programa *Oscilloscope PC Suite*). Con estos ajustes de control se realizaron los experimentos.

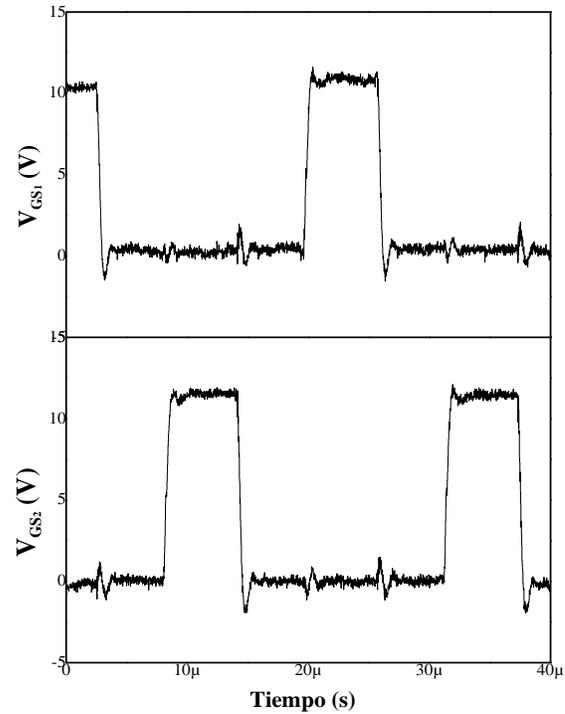


Figura 3.7. Formas de onda de los pulsos V_{GS} .

3.4.2 Simulación y Elaboración del PPI

Para anticipar el comportamiento del PPI, se simuló el circuito mostrado en la Figura 3.8 mediante Simulink®; los pulsos de control se generan en los bloques Vgs1 y Vgs2 a una frecuencia de 41.66 kHz al 25% del ciclo de trabajo, con una amplitud de 5 V. El resto de los elementos se

configuraron apegados a las especificaciones descritas anteriormente, más el transformador se simplificó al no incluir parámetros de saturación del núcleo. El indicador Vfr sirve únicamente para visualizar la frecuencia de resonancia, mientras que las señales de interés se despliegan en los nodos

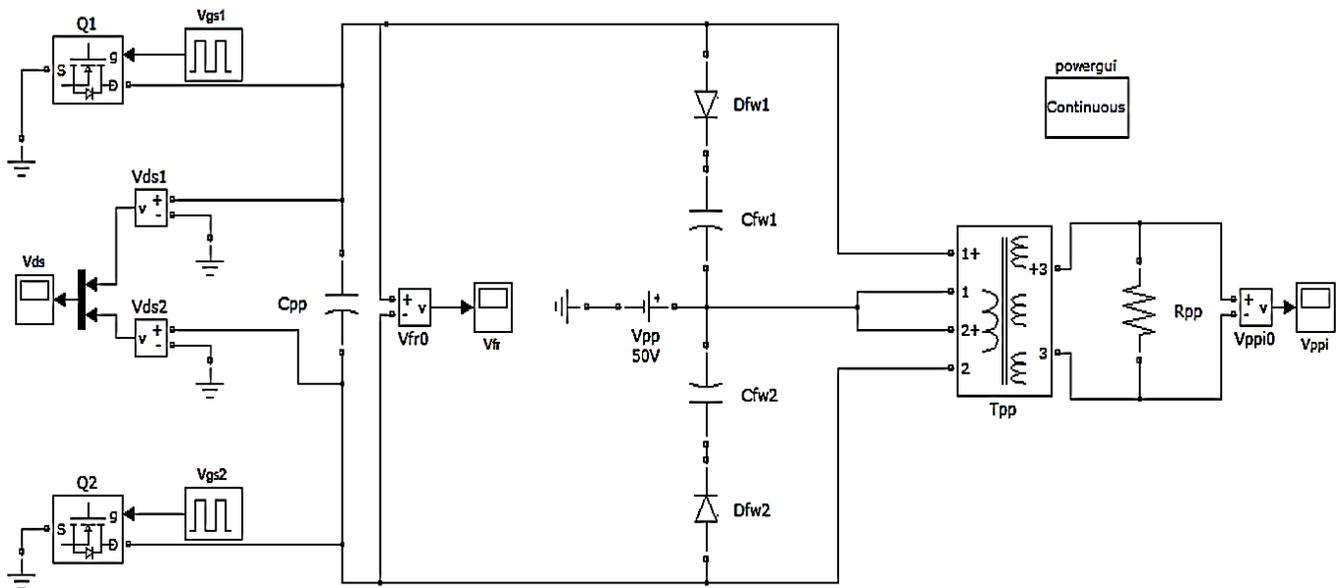


Figura 3.8. Diagrama de simulación del PPI en Simulink®.



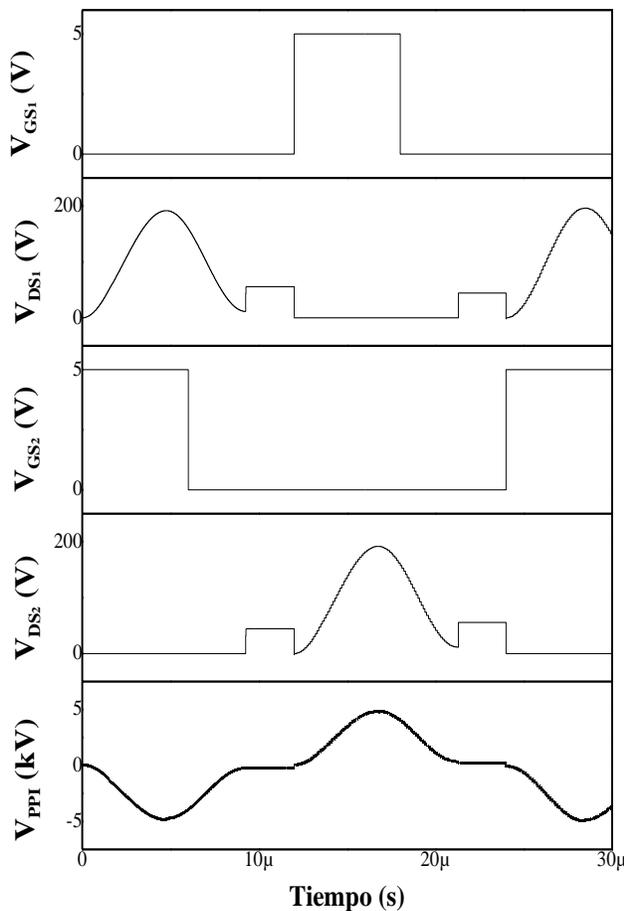
V_{pp} y V_{ds} . Los datos finales son agrupados en vectores que posteriormente se asocian a una hoja de cálculo desde la Ventana de Comandos de MATLAB® con la instrucción `csvwrite('Simulación.csv', [Vds.time Vds.signals.values Vppi.signals.values])`.

Con la información proveniente del software y de los osciloscopios, en la Figura 3.9 se comparan las formas de onda del circuito simulado y del convertidor construido. En ambos casos se introdujo un V_{PP} de 50 V y las condiciones de control fueron muy similares. En lo concerniente a las gráficas de la Figura 3.9.a, se observa que después del flanco de bajada el voltaje V_{DS} en el MOSFET, debido a la inductancia de fuga (referenciada en la Figura 2.10 del Capítulo 2), es absorbido por el capacitor de rodamiento libre; aunque en la simulación desaparece por completo, en la Figura 3.9.b se observa que realmente sólo se reduce hasta un voltaje similar a V_{PP} ; V_{DS} también exterioriza un voltaje de ruido asociado al rizo de V_{PP} .

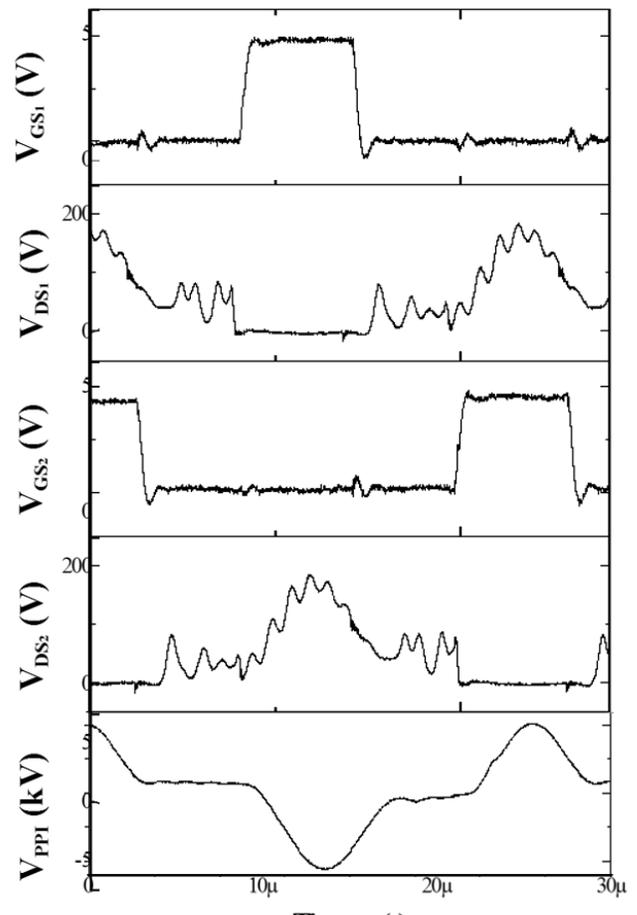
Por otra parte, el voltaje resultante V_{PPI} es de gran similitud: una señal senoidal modificada con un valor máximo de 100 veces V_{PP} . El semiciclo negativo del inversor físico exhibe una ganancia mayor que resulta en un voltaje poco menor a 6 kV.

El circuito impreso (PCB, *printed circuit board*) de la etapa de control se diseñó con Eagle®, software que generó los archivos CAD-CAM (GERBER_RS274X y EXCELLON) para ser interpretados por IsoPro® y así ser manufacturado con el CNC *Quick Circuit QC5000*® (ver el Video 1 del Anexo C, donde también se adjuntan imágenes de la tarjeta de control elaborada). En la Figura 3.10 se presenta el plano completo del circuito eléctrico final.

A continuación se describirá la interfaz gráfica de usuario programada para controlar y monitorear los dispositivos involucrados en la experimentación.



(a)



(b)

Figura 3.9. Formas de onda del PPI obtenidas (a) por simulación y (b) con osciloscopio (reales).



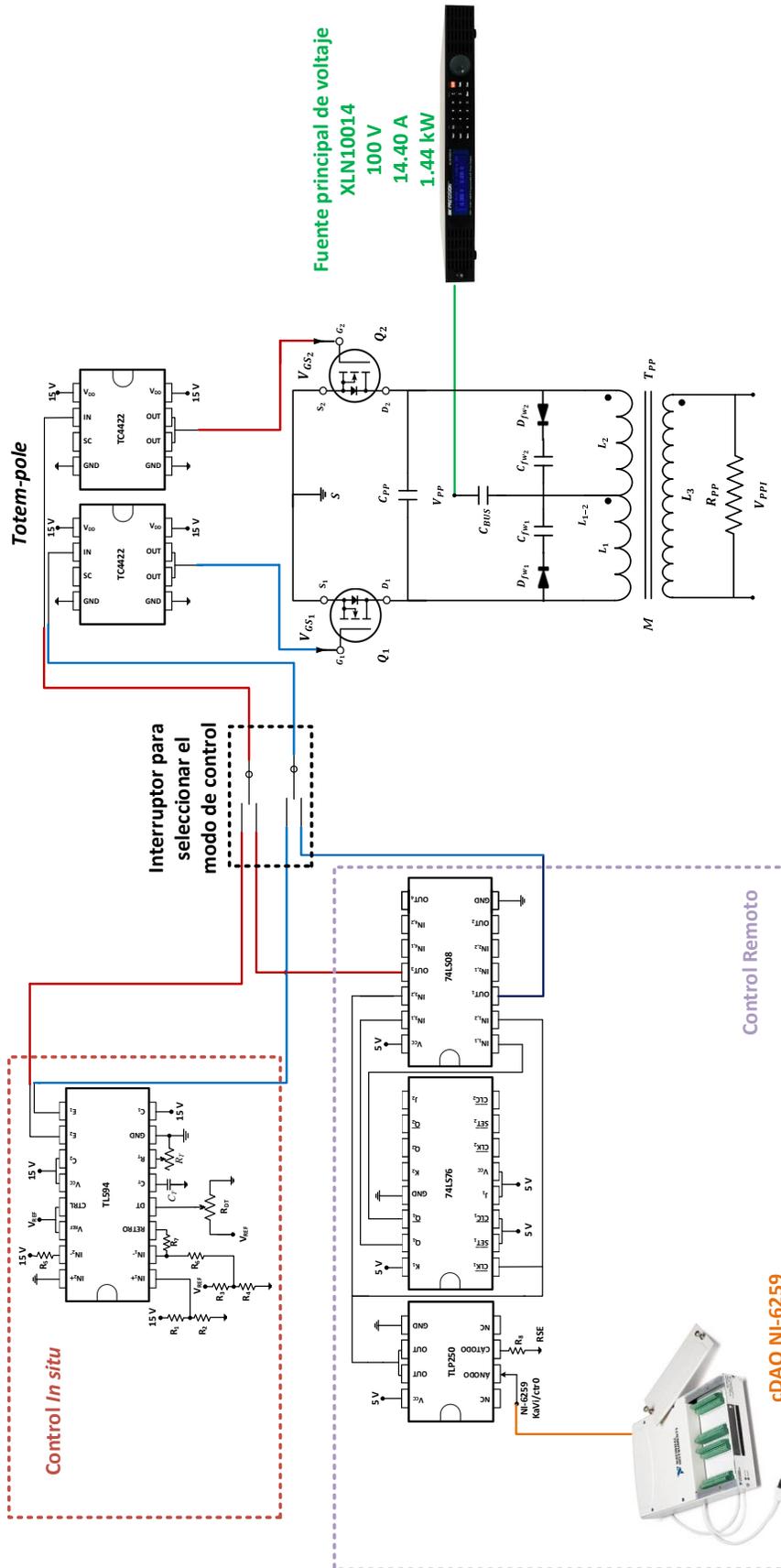


Figura 3.10. Representación del diagrama eléctrico para el PCB de control. (Clic izquierdo sobre la imagen para seguir el vínculo).



3.5 Instrumentación Virtual

Los instrumentos virtuales son programas computacionales que hacen posible el desempeño controlado y el diagnóstico del proceso a distancia para elevar el grado de seguridad del personal, ya que en el experimento se utilizan altas concentraciones de la mezcla CAM que pueden causar alguno de los síntomas descritos en el Capítulo 1. Para lograr este objetivo, con el enfoque GSD se programó una interfaz gráfica de usuario (GUI) con LabVIEW™ 2013, misma que permite el control/monitoreo de datos mediante la DAQ USB-6259 (Figura 3.11), nombrada en el *Measurement & Automation Explorer* como *KaVi*. Este dispositivo cuenta con 128 conectores de entrada/salida en tiempo real, que incluyen puertos de señales analógicas (± 10 V) y digitales (TTL), que pueden ser referenciadas a una tierra común (RSE) o estar aisladas unas de otras (Diff), más información técnica en [8].

Enseguida se detalla cada uno de los VI y se describe cómo la GUI se conecta en una red de usuarios.

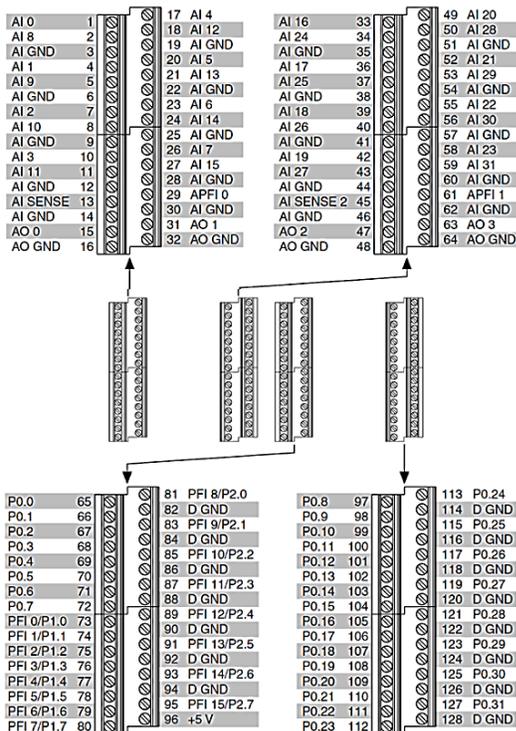


Figura 3.11. Terminales de la tarjeta USB-6259 [8].

⁹ La primera versión del programa se presentó 9th *International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control*; posteriormente se sometió a evaluación por parte de la compañía *National Instruments*, la cual la dictaminó en 2013 como el mejor programa de

3.5.1 Interfaz Gráfica del Control Principal

El VI que centraliza el lazo de control y permite visualizar las variables se nombró *KaVi_v.2.04*, está compuesto de varios módulos (sub-VI) para su mantenimiento fácil y escalamiento. Se recomienda consultar a [9] y [10] como referencia básica del proceso de instrumentación, del modo de programación y la ejecución de la GUI. *KaVi_v.2.04* ha sido constantemente depurada para la difusión del proyecto de tesis⁹, actualmente se integra por cuatro sub-VI que 1) permiten el acceso del personal (Registro.vi), 2) configuran los puertos de la USB-6259 y procesan los datos (Principal.vi), 3) comunican con el equipo de diagnóstico (PG250.vi) y, 4) guardan información (Bitácora.vi). Al usuario únicamente se le muestra el panel de control, a medida que avanza dentro del programa se despliegan mensajes de ayuda e información. La GUI principal se presenta en la Figura 3.12, consta de los siguientes controles/indicadores (enumerados en la imagen):

1. **Operador.** Al iniciar el programa un cuadro de diálogo aparece para solicitar los datos **Nombre** y **Clave**, que son comparados con una base de datos para saber si el solicitante tiene autorización de utilizar el equipo, de no tenerla el programa se detiene y cierra la ventana; caso contrario, se inicia la rutina de control y estas casillas se rellenan con la información proporcionada.
2. **Encendido.** Una vez pasado el control de acceso, este indicador se muestra de color verde y comienza la configuración de los puertos de la USB-6259. Para terminar la prueba se debe presionar y un cuadro emergente pide la confirmación de la instrucción.
3. **Logotipo.** Despliegan ventanas con información de las instituciones relacionadas al tema de investigación: a) Universidad Autónoma del Estado de México, b) Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.
4. **Ayuda.** Activa/desactiva las etiquetas de ayuda que aparecen al mover el cursor sobre la GUI.
5. **Congelar.** Mantiene estática la pantalla de control, así se evita su modificación por error.
6. **Esquema.** Sobrepone un diagrama con los voltajes y las corrientes en puntos estratégicos. Los valores provienen de lecturas del osciloscopio, de la fuente de voltaje, de sensores y/o son aproximados por fórmula.

Ingeniería para un Mundo Mejor (Ingeniería Ambiental y Ciencias Ambientales) en el 6^o certamen Reto Académico. También se exhibió en el *NIDays 2013: Graphical System Design Technical Symposium* y en el *NI Academic Days 2014* (Anexo B).



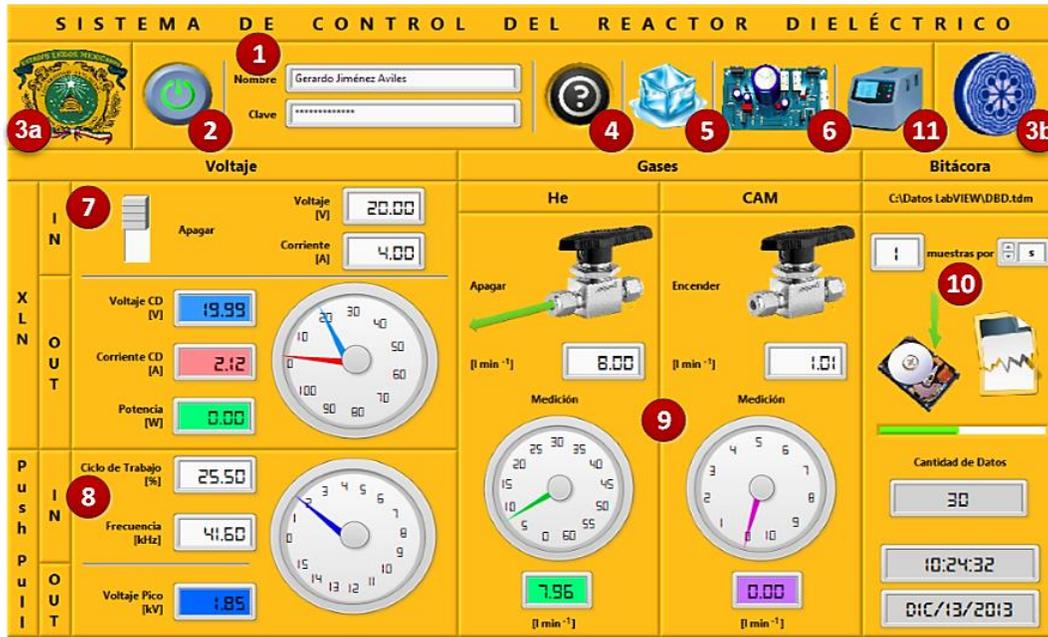


Figura 3.12. Panel principal de la interfaz gráfica de usuario para control del reactor C – DBD₂.

7. **XLN.** Estos tres controles interactúan vía USB con la fuente XLN10014, para lo cual es necesario instalar el *toolkit* correspondiente (provisto en la página *web* del distribuidor). Posibilitan habilitar/inhibir la salida de potencia, mientras establecen límites de corriente y voltaje. A su vez, cuenta con indicadores que muestran los valores reales de voltaje, corriente y potencia suministrados a la carga. Adicionalmente se dispone de un sub-VI que puede simular condiciones de voltaje, como rampas de ascenso/descenso suave o abrupto.
8. **Push Pull.** En el circuito de control se integró un interruptor mecánico que determina el modo de trabajo: manual (explicado anteriormente) o remoto, que emplea

un oscilador base de 80 MHz y un circuito divisor de frecuencia (Figura 3.13). En el puerto **ctr0** de la tarjeta 6259 se genera un tren de pulsos, con rangos: $140 \text{ Hz} \leq f_{PWM} \leq 160 \text{ kHz}$ y $0.01 \leq D_{PWM} \leq 0.99$. La señal **ctr0** se envía por los pines 10 (señal) y 11 (tierra en serie con $R_g = 390 \Omega$) al TLP250, la salida del optoacoplador sirve como reloj para el *flip-flop* 7476, que tiene sus entradas **JK** = 5 V, este arreglo provee los pulsos **Q** y **Q̄** desfasados 180° entre sí, a los que se les aplica la función AND con la señal **ctr0** para obtener los pulsos V'_{GS} : $Q \wedge \text{ctr0} = V'_{GS1}$ y $\bar{Q} \wedge \text{ctr0} = V'_{GS2}$, con rangos de la mitad de **ctr0**: $70 \text{ Hz} \leq f_{PWM} \leq 80 \text{ kHz}$ y $0.005 \leq D_{PWM} \leq 0.495$ (Figura 3.14).

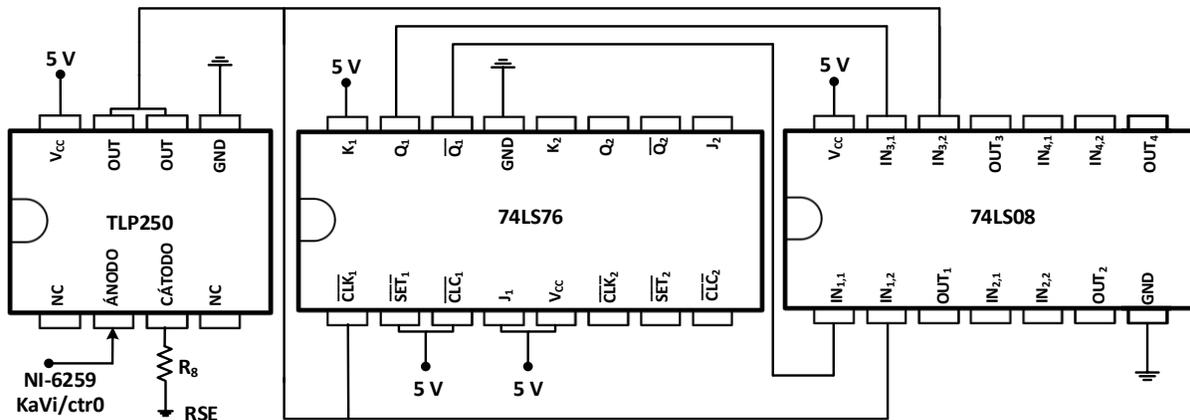


Figura 3.13. Circuito divisor de frecuencia para el control remoto de los MOSFET, donde $R_g = 390 \Omega$.





Figura 3.14. Procesamiento de la señal *ctr0* para obtener V_{GS}' mediante el circuito divisor de frecuencia.

(Clic izquierdo sobre la imagen para seguir el vínculo).

La sección **Push Pull** también aproxima el voltaje resultante y la corriente consumida, que se visualizan en el tacómetro adjunto. Una ventaja es que el programa detiene automáticamente el suministro de potencia al reactor en caso de una sobrecorriente, frena las instrucciones en **XLN**, deja de generar datos en el puerto **ctr0** y apaga las válvulas de gas.

9. **Gases.** Para acceder al control remoto de las válvulas de gas se utiliza el conector DB₂₅ ubicado en la parte trasera del controlador 247D y en su panel frontal se ajustan las palancas de nivel de flujo y de modo de control a las posiciones *Rem* y *Ext*, respectivamente. *Rem* marca que el cambio de estado del MFC será por medio de TTL, un “0” lo enciende y un “1” lo cierra. *Ext* permite el control de la señal de flujo desde un dispositivo externo. Cada uno de los MFC requiere de dos señales de control: un pulso TTL y un voltaje entre 0 y 5 V que es linealmente proporcional al flujo; éstas señales se envían por el puerto DB₂₅ y se recibe una para de corroboración del flujo. Para ambos MFC siguen procedimiento: 1) presionar la imagen de la válvula y el indicador cambia de color para apuntar que el MFC permitirá el flujo de gas, y 2) se digita el valor máximo del caudal deseado (en l min⁻¹) que es verificado en el tacómetro o con el indicador numérico bajo este. De igual forma se puede establecer primero el flujo y después encender el MFC.
10. **Bitácora.** Guarda archivos *.tdm en el directorio C:\Datos DBD*.tdm con datos de las variables por intervalos de segundo, minuto u hora. Sirve como herramienta de diagnóstico posterior a cada prueba, Al finalizar el programa comprime la carpeta Datos DBD, la envía por correo (a gerjimav@gmail.com, aunque se pueden incluir varias direcciones) y elimina el archivo *.zip creado, esto con motivos de respaldo y de dar a conocer inmediatamente los resultados a los interesados.

3.5.2 Monitoreo de Gases Residuales

Adicional a la pantalla general de control, el panel de monitoreo de gases residuales (PG250.vi) recibe datos del Analizador de Gases Residuales Horiba© PG-250 (para que aparezca la ventana es necesario presionar el botón **11** en el panel principal). Este VI permite modificar los rangos de medición de los gases, en escalas que van de 0 a 5000 ppm y de 0 a 25 % vol., habilitar y personalizar las gráficas de los canales de medición. En el panel se pueden ver simultáneamente las siete mediciones posibles del PG-250 (NO_x, Co.¹⁰ NO_x, SO₂, Co.¹⁰ SO₂, CO, CO₂ y O₂) a diferencia de la pantalla integrada en el analizador que despliega cinco valores a la vez.

En el diagrama eléctrico de la Figura 3.10 se distingue un conector DB₂₅ con los pines 1 al 9 conectados en paralelo a potenciómetros que sirven para ajustar el valor de 250 Ω que demanda la USB-6259 en lecturas máximas de 10 mA (aunque únicamente se utilizan los pines del 1 al 7 para las señales y el 9 para la referencia), pero el PG-250 entrega 20 mA linealmente proporcionales a las concentraciones en la muestra, por lo tanto la resistencia es de 125 Ω para mantener la relación de voltaje (Ley de Ohm).

Se conectan en paralelo los pines del DB₁₅ localizado en la parte posterior del PG-250, las entradas analógicas de la USB-6259 y el potenciómetro. El orden de conexión es similar al desplegado en la sección **Rangos** de la Figura 3.15.

3.5.3 Versiones de la Interfaz

Dos versiones adicionales de *KaVi_v.2.04* fueron programadas. La primera en formato *.exe para distribuir el VI en computadoras que no cuentan con licencia de LabVIEW™, tiene como ventaja ser ligera, requerir sólo los controladores de la USB-6259 con el soporte *Run-Time* 2013 y ser compatible con sistemas de 32 y 64 bits. Para la elaboración de esta versión se utilizó la función *Application Builder* desde la Ventana de Proyectos de LabVIEW™. La segunda versión permite manipular el sistema desde clientes remotos, necesita la activación de los servicios *Web Server* y *Web Publishing Tool* para configurar como servidor a la PC donde se ejecuta el VI y generar un archivo *.html que contiene las interfaces a las que se puede acceder desde la intranet institucional [9].

¹⁰ Referirse a [11] para mayor detalle de estos datos proporcionados.



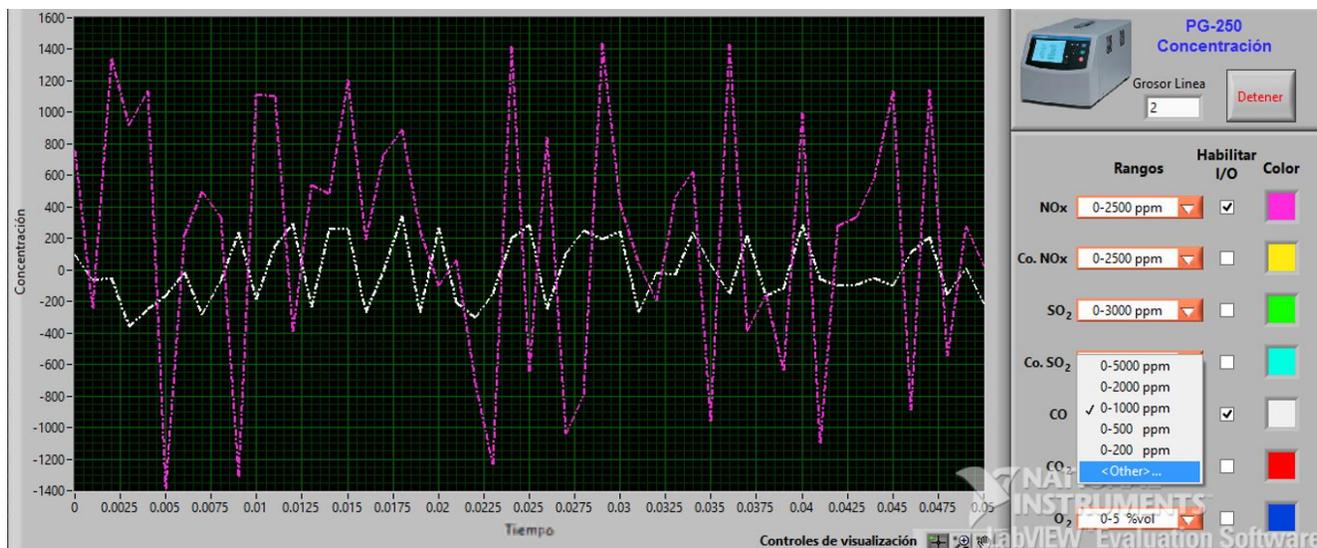


Figura 3.15. Interfaz gráfica para monitoreo de gases.

El panel frontal está disponible en el sitio http://200.15.118.244/KaVi_v.2.04.html; puede ser operado por un número indefinido de clientes, uno a la vez y organizados desde el servidor. El documento *.html que entregó la herramienta *Web Publishing* fue modificado con el software de prueba Adobe Dreamweaver®, y se incluyeron los *plugins* necesarios para poder ver el panel frontal desde la PC remota y las direcciones electrónicas de las instituciones participantes. Este último modo de control requiere considerar con más cautela el tiempo de respuesta del sistema por parte del operario: un limitado ancho de banda en la red podría ocasionar retrasos considerables en la ejecución de las instrucciones. En la Figura 3.16 se encuentra la ventana de la página con el panel frontal de *KaVi_v. 2.04*.

Para no perder el sentido del tema inicial, en este Capítulo no se abunda más en los detalles de programación de la interfaz virtual.

3.6 Cálculo de Potencia

Para calcular la potencia en la descarga se utilizó como herramienta el programa Método de Manley.xmcd que se ejecuta desde MathCAD®¹¹ (Anexo E). El programa requiere únicamente de tres parámetros iniciales:

¹¹ Un agradecimiento especial al equipo *Plasma Froids* del *Laboratoire de Physique des Plasmas* de *École Polytechnique*, París, Francia, que me proporcionaron el archivo *.xmcd para el cálculo de potencia por el Método

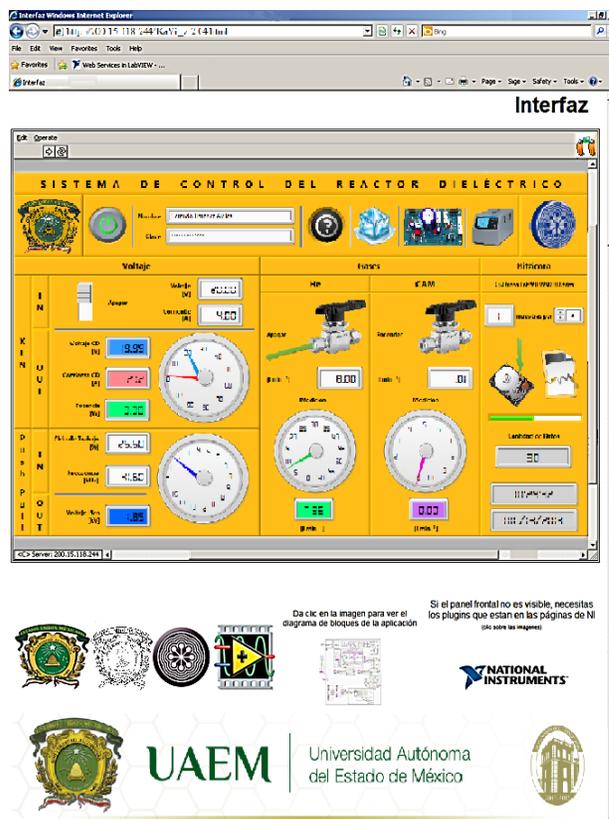


Figura 3.16. Página en red con la GUI de *KaVi_v. 2.04* anidada y disponible para clientes remotos.

de Manley, en especial a mis asesores de estancia M.Sc. Christelle Barakat, Ph.D. Olivier Guaitella y M.Sc. Marguerite Dang Van Sung. (Anexos B y D).



1. dos documentos *.txt o *.csv que contienen los valores en el tiempo de los voltajes medidos en el $C - DBD_2$ y en C_L , ambos archivos los proporciona el osciloscopio; dependiendo del dispositivo empleado se deben ajustar la columna y el renglón a partir de los cuales el programa iniciará a leer los datos,
2. el valor nominal de C_L , y
3. la frecuencia de la señal de voltaje en la descarga.

Cuando los valores anteriores han sido ajustados, se presiona la tecla de funciones $F9$ y el resultado de la potencia junto con su figura de Lissajous son mostrados en pantalla. De forma alterna, en el osciloscopio (de canales aislados) se activa la función XY y se obtiene la figura de Lissajous; colocar una resistencia de muy bajo valor ($<0.5 \Omega$) en serie a la descarga también es factible para determinar la potencia a través de la corriente.

3.7 Esquema General del Experimento

En esta etapa de montaje del experimento se procuró que los dispositivos empleados pudieran ser ejecutados directamente con los controles de fábrica (*in situ*) y por un instrumento virtual de forma complementaria, que tiene como objetivo principal permitir la interacción con diversos instrumentos físicos de forma amigable y centralizada, con la consecuente reducción de los tiempos de reacción del operador y la garantía de un ambiente de trabajo más seguro para el personal que está a cargo del reactor cuando se utilizan altas concentraciones de gases que pudieran repercutir en su salud. En la Figuras 3.17 y 3.18 se esquematiza la estación virtual de control, con el montaje final del sistema para las pruebas, en el que hay que destacar el uso de las sondas de medición de alto voltaje Tektronix® P6015A y de corriente Fluke® 80i-1000s; C_L es de 1 nF.

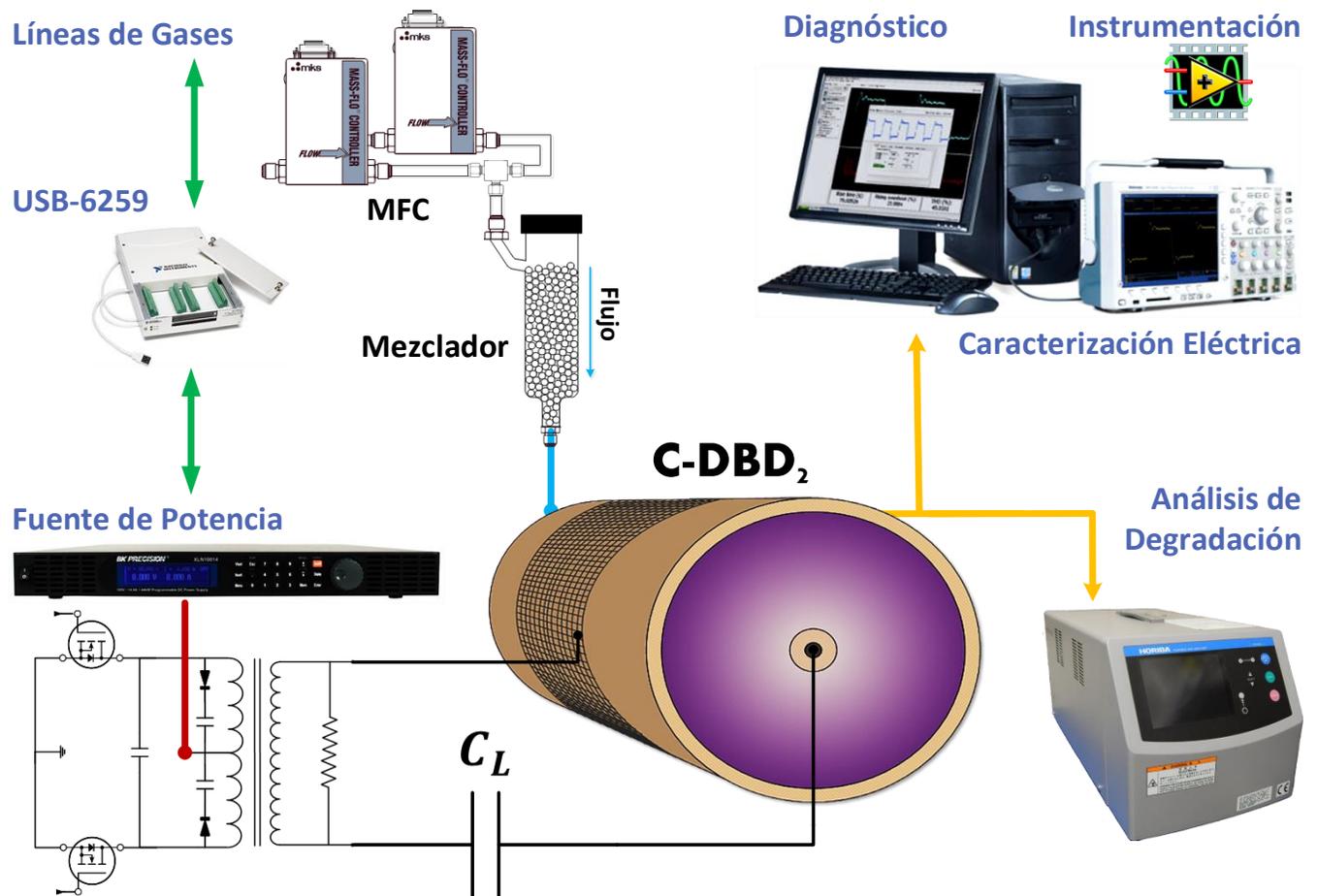


Figura 3.17. Esquema del experimento montado.



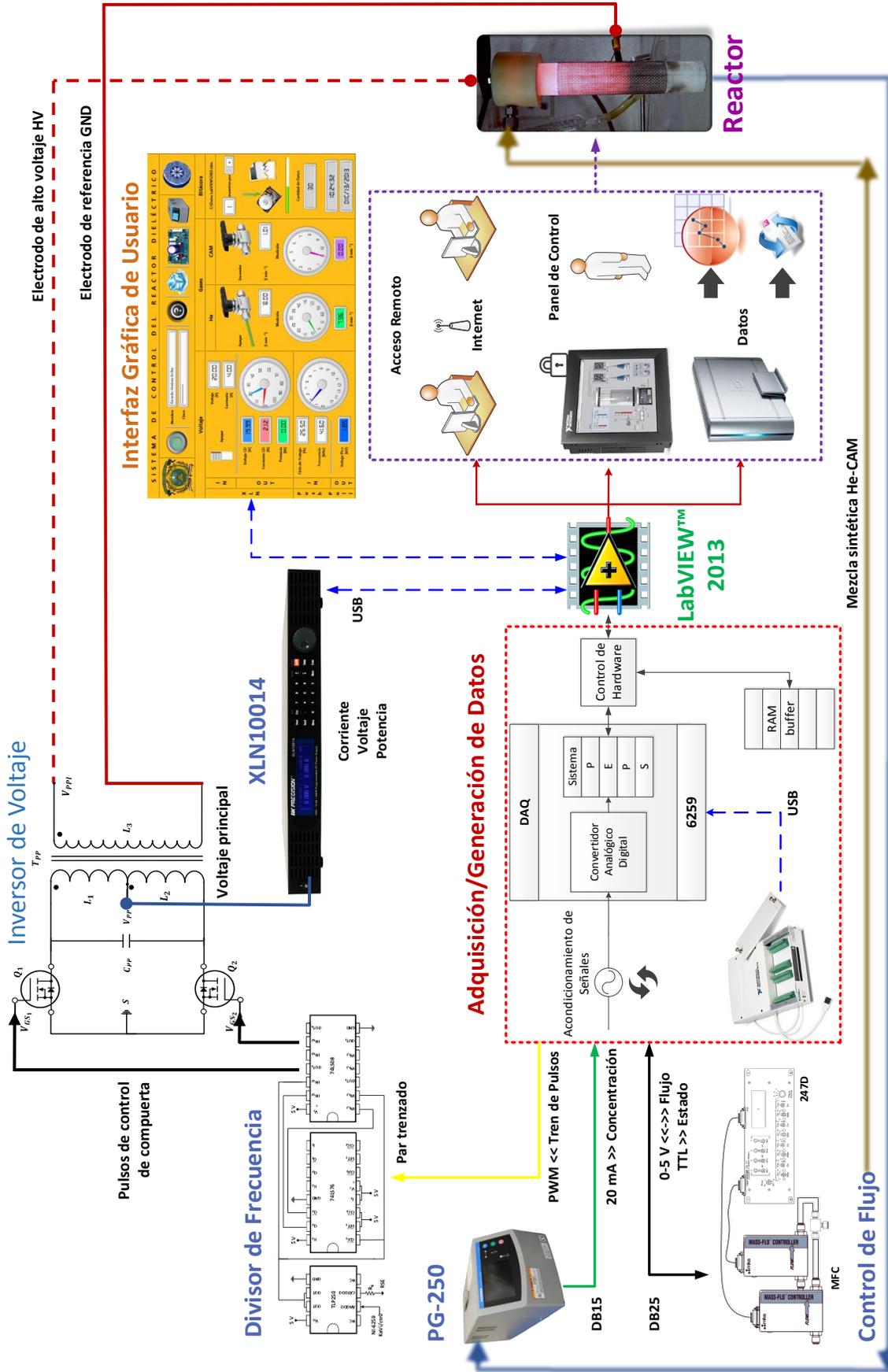


Figura 3.18. Esquema de la estación virtual de control programada en LabVIEW™ 2013.

3.8 Literatura Citada

- [1] Estrada, N. (2012). Estudio de un Reactor de Doble Barrera Dieléctrica y su Aplicación en el Tratamiento de Efluentes Gaseosos. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México.
- [2] Valdivia, R. (2008). Efecto de la Frecuencia de Excitación en la Conductividad Eléctrica de Gases Ionizados: Estudio y Desarrollo Electrotécnico. Tesis Doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca. Metepec, México.
- [3] Askeland, D. R., *et al.* (2011). The Science and Engineering of Materials, 6th Edition. Cengage Learning, ISBN 978-1-133-41730-9.
- [4] Pacheco, M., *et al.* (2012). Removal of Main Exhaust Gases of Vehicles by a Double Dielectric Barrier Discharge. 14th LAWPP, DOI: 10.1088/1742-6596/370/1/012023.
- [5] MKS (2013, 3 de enero). MKS Type 247D Four-Channel Readout, Instruction Manual. Recuperado de www.mksinst.com/docs/R/247Dman.pdf.
- [6] MKS (2013, 3 de enero). MKS Type M100B Mass-Flo Controller and M10B Mass-Flo Meter, Instruction Manual. Recuperado de www.mksinst.com/docs/R/M100B-M10MBman.pdf.
- [7] Omega (2013, 3 de enero). FMA-A2100's, FMA-A2300's Massflow Meters, User's Manual. Recuperado de www.omega.com/Manuals/manualpdf/M2842.pdf.
- [8] NI (2013, 5 de febrero). NI 625x Specifications. Recuperado de www.ni.com/pdf/manuals/371291h.pdf.
- [9] Jiménez, G. (2011). Diseño, Programación e Instrumentación de una Interfaz de LabVIEW para Control y Diagnóstico del Proceso de Plasma Centrífugo Deslizante. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca de Lerdo, México.
- [10] Jiménez, G., *et al.* (2012). Instrumenting and Programming a Virtual Instrument for an Open Loop System to Control Gliding Centrifugal Thermal Plasma. 9th CCE, DOI: 10.1109/ICEEE.2012.6421110.
- [11] Horiba (2013, 3 de enero). PG-250 Portable Emission Analyzer. Recuperado de http://www.horiba.com/fileadmin/uploads/Process-Environmental/Documents/HRE2849G_-_PG250.pdf.





CAPÍTULO



RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1 Introducción

En esta sección se muestran y discuten los resultados de degradación de los NO_x y de los CO_x presentes en la CAM, que fue diluida en He a diferentes concentraciones y sometida a varios potenciales en los reactores $C - \text{DBD}_2^A$ y $C - \text{DBD}_2^B$. Los datos de degradación se obtuvieron con el PG-250 al introducir flujos de 0.5, 0.6 y 1.5 l min^{-1} en su celda de medición. Además, con la información proporcionada por los osciloscopios y por el instrumento virtual, se analiza el comportamiento eléctrico del sistema durante las descargas.

En la parte final de la sección se localizan las conclusiones de la investigación y las recomendaciones para continuar con el trabajo.

4.2 Resultados y Discusión

En primer lugar serán comentados los resultados y observaciones del circuito eléctrico, posteriormente lo mismo sucederá con lo referente a la etapa de degradación.

Con el reactor $C - \text{DBD}_2^A$, la CAM se diluyó con He en concentraciones que parten del 0.38 al 13.95 %vol. y se aplicaron voltajes de 25 a 55 V con la XLN10014 (ver Tabla 4.1). Después de realizar estas pruebas se concluyó utilizar el reactor $C - \text{DBD}_2^B$ sin gas de acarreo (ver Tabla 4.2).

4.2.1 Sistema Eléctrico

Como punto de partida se determinó, mediante mediciones de corriente y voltaje, que el circuito de control manual requiere de 0.96 W para proporcionar pulsos de 12 V de amplitud.

Las condiciones mínimas para que inicien las descargas en el $C - \text{DBD}_2^A$ son: $He = 1.236 \text{ l min}^{-1}$ y $V_{PP} = 19 \text{ V}$, con un consumo de potencia de 3.7 W y $V_{PPI(pk)} = 1.88 \text{ kV}$. Una vez iniciada la descarga, el sistema trabaja de forma estacionaria con un flujo reducido de 0.15 l min^{-1} de He y un consumo de 3.2 W. En la Figura 4.1.a se observan las formas de onda del voltaje aplicado, la corriente y la potencia demandadas; al incrementar gradualmente el flujo decae la corriente y las descargas se extinguen (zona de *standby*). En el caso del $C - \text{DBD}_2^B$, los ajustes mínimos son: $V_{PP} = 10 \text{ V}$, $He = 0.15 \text{ l min}^{-1}$ y consumo de 1.4 W.

La transferencia máxima de potencia a las microdescargas se logra con trenes de pulsos de 41.3 kHz al 25.5% de servicio, si se varían estos dos parámetros el voltaje máximo a la salida del inversor será mayor, sin embargo, las descargas serán inestables y la fase (factor de potencia) entre las señales de voltaje y corriente incrementa. Las gráficas de la Figura 4.2 representan este caso, entre más se alejan los valores f_{PWM} y D_{PWM} de sus ideales es mayor el voltaje de salida, pero



también el desfase. Además, el voltaje visto por los transistores se eleva hasta 4.5 veces el suministrado; a este respecto, la Ecuación 2.13 establece que el voltaje mínimo que debe soportar el transistor durante las conmutaciones es de aproximadamente 2.6 veces V_{PP} , al detectar los valores máximos de V_{DS} (en la Figura 4.1.b se graficó un valor V_{DS} como ejemplo) se concluyó que la constante para esta aplicación es 3.7, es decir (Ecuación 4.1):

$$V_{DS(MIN)} \approx 3.7 V_{PP} \quad (4.1)$$

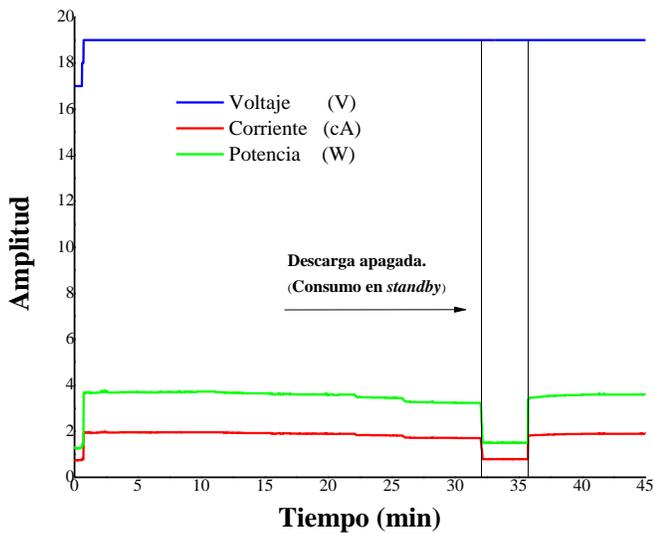


Figura 4.1.a. Identificación de las condiciones mínimas de potencia para iniciar las descargas.

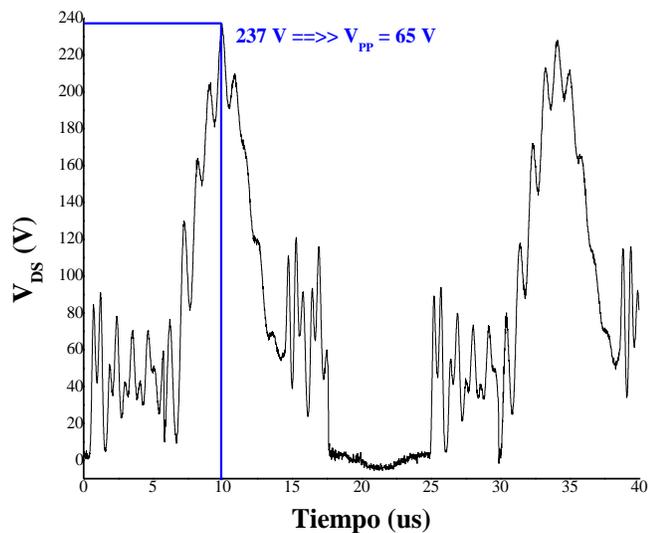


Figura 4.1.b. Detección de valores pico para estimar el voltaje mínimo de operación requerido para el MOSFET.

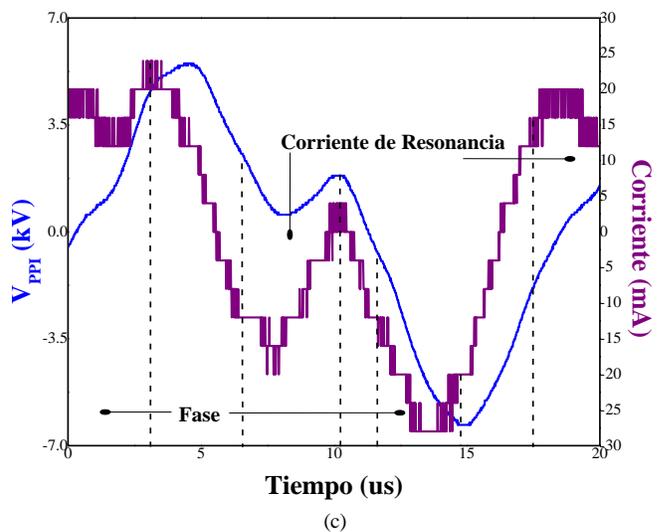
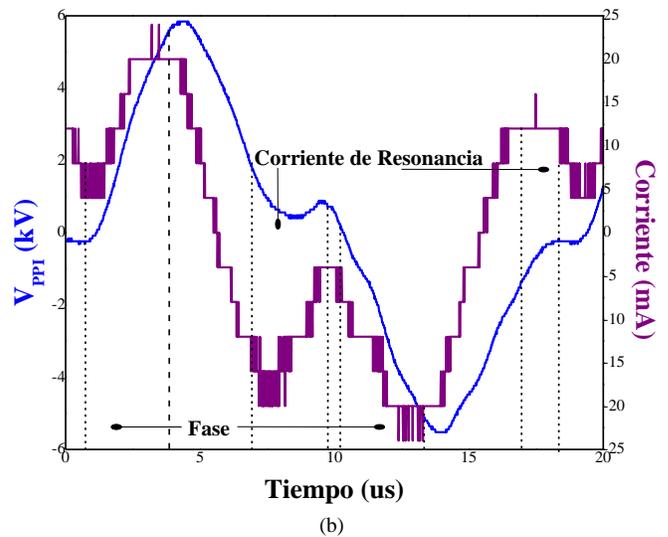
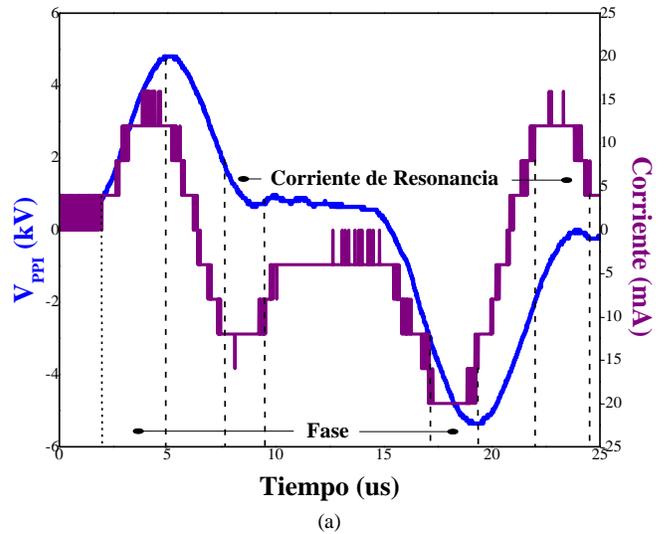


Figura 4.2. Variación de f_{PWM} y D_{PWM} para determinar la transferencia máxima de potencia. (a) Valores correctos. (b) $f_{PWM} = 56 \text{ kHz}$ y $D_{PWM} = 25.5\%$. (c) $f_{PWM} = 56 \text{ kHz}$ y $D_{PWM} = 20\%$.



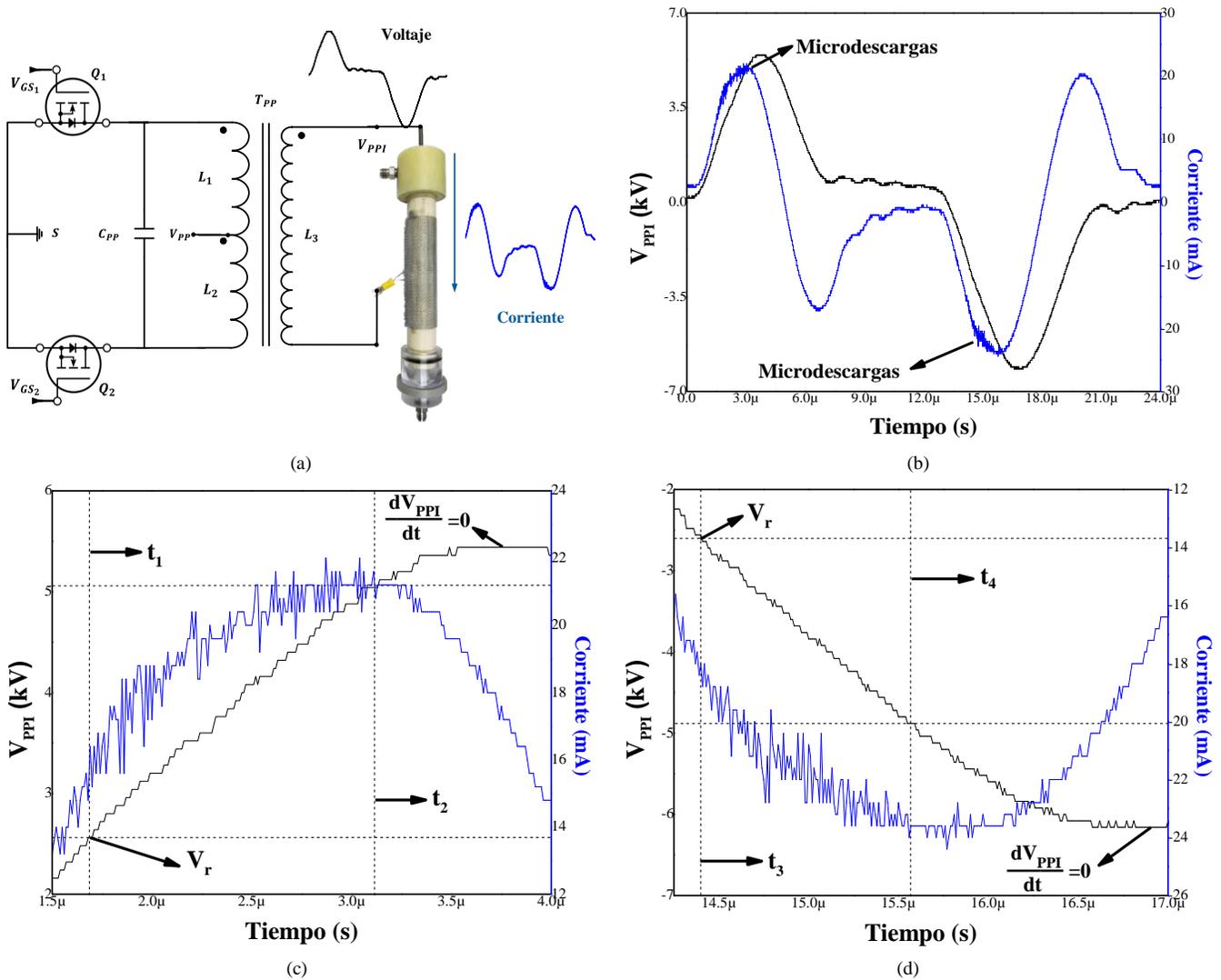


Figura 4.3. Formas de onda del voltaje proporcionado a la descarga. (a) Puntos de medición. (b) Formas de onda características. (c) Identificación de las microdescargas en el semiciclo positivo. (d) Identificación de las microdescargas en el semiciclo negativo.

En la Figura 4.3.a se muestran los puntos de medición en el circuito eléctrico de la corriente y voltaje a la salida del convertidor de voltaje conectado el reactor, en cuyas formas de onda se aprecia que las microdescargas se superponen en la corriente de desplazamiento en forma de pequeñas oscilaciones (Figura 2.3.b); su tiempo de inicio y extinción se determinó a partir de la magnitud del V_r (identificada en la Figura 4.3.c.d para ambos semiciclos como t_1 y t_3 , respectivamente), hasta los momentos en el que V_{PPI} alcanza sus valores máximo y mínimo, que es cuando $\frac{dV_{PPI}}{dt} = 0$, (t_2 y t_4 en la Figura 4.3.b.c). La duración total de estas variaciones es de 1.1 a 1.5 μ s.

Posteriormente se hizo fluir una mezcla de He-CAM a diferentes concentraciones y flujos que fueron sometidos a

potenciales de 25 a 65 V (como datan en la Tabla 4.1, donde cada una de las concentraciones enlistadas corresponde a los tiempos t_x identificados en la Figura 4.4). Al aplicar 25 V (Figura 4.4.a), de $0 - t_5$ fluye únicamente He, el pico antes de finalizar este periodo se debe al aumento de corriente que es inmediatamente suavizado al incluir 0.38 % vol. de CAM. El proceso de degradación sucede en un tiempo breve (tal como lo anticiparon los estudios referenciados en la Sección 2.7). En este primer caso, de $t_5 - t_7$ se consideraron dos muestras, la de 0.38 y una de 1.14 % vol. de CAM, que se dejaron trabajar en estado estacionario durante un tiempo mayor con un consumo promedio de 7 W. Seguidamente se aumentó la concentración de CAM, la potencia decayó instantáneamente con la consecuente extinción de las microdescargas.



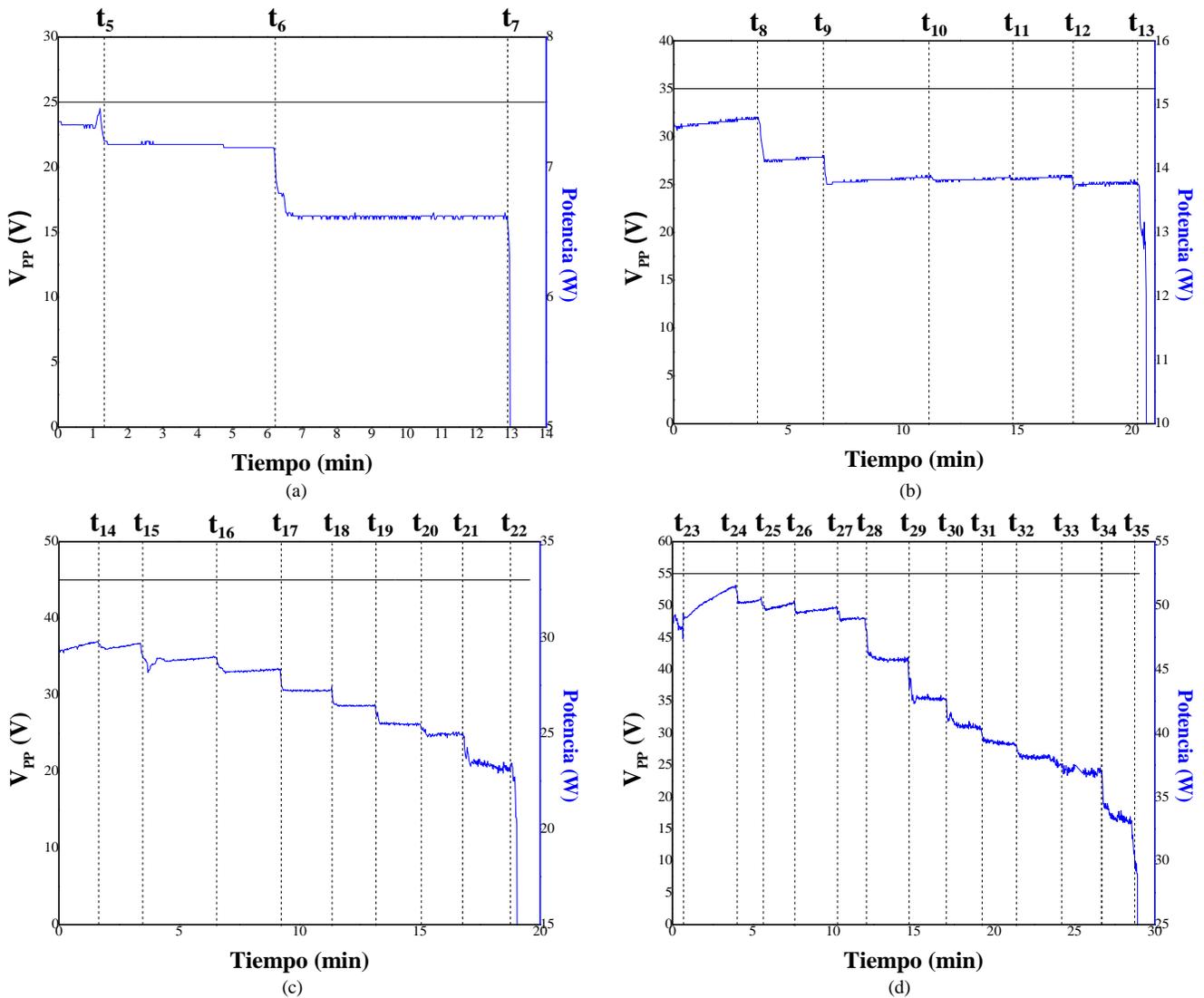


Figura 4.4. Voltajes y potencias aplicados al $C - DBD_2^A$. (a) 25 V. (b) 35 V. (c) 45 V. (d) 55 V.

Para el caso de 35 V, de $0 - t_9$ se repiten las concentraciones anteriores, en la Figura 4.4.b se distingue un comportamiento ascendente de la potencia (sin que esto se refleje en un aumento de degradación, como se observa en la Tabla 4.2); de $t_9 - t_{13}$ las descargas no presentan alteraciones y, al igual que en el caso anterior, la descarga se extingue al incrementar la concentración de CAM en t_{13} .

El procedimiento anterior se repite para 45 y 55 V. En la Figura 4.4.d, de $0 - t_{24}$ la rampa de potencia aumenta 8 W y la descarga se vuelve filamental y heterogénea, que son fenómenos debidos a la elevada densidad volumétrica de potencia (DVP, que es la potencia distribuida por unidad de volumen disponible dentro del reactor) en el $C - DBD_2^A$ y a la baja concentración de CAM. En los lapsos $t_{21} - t_{22}$ y

$t_{30} - t_{35}$ se notan oscilaciones incorporadas, derivadas de la filamentación homogénea de las microdescargas. En t_{34} la CAM está presente al 13.95 % vol. y se eleva a 15.61 % vol., el sistema permanece por un tiempo hasta que la potencia decae naturalmente en t_{35} . Más allá de esta última concentración, las DBD tienden a ser localizadas dentro del reactor y a extinguirse.

Como comprobación del decaimiento de potencia, se aplicaron 65 V a la mezcla de gas con 15.61 % vol. de CAM (Figura 4.5). De $0 - t_{36}$ la potencia promedio es de 75 W (máximo valor alcanzado) y presenta picos de 80W relacionados a la filamentación de las DBD. En t_{36} el presente es de 86 % vol. y la descarga se estabiliza a partir de t_{37} ; para t_{38} la CAM está al 17 % vol. y la potencia decae



hasta 23 W. De $t_{39} - t_{40}$ se inyectaron cantidades adicionales de He para tratar de reactivar la descarga, a pesar de ello en t_{40} las microdescargas se agotan.

Se prosiguieron las pruebas bajo el mismo procedimiento con la instalación del $C - DBD_2^B$, en las que la CAM se diluyó en concentraciones que parten del 2.57 al 100 %vol. y voltajes de 25 a 65 V (ver Tabla 4.2). A diferencia del reactor anterior, se trataron concentraciones de CAM mayores (hecho favorecido por la alta DVP) y se eliminaron casos por arrojar resultados similares.

En las gráficas (a), (b) y (c) de la Figura 4.6 se distinguen rampas de potencia hasta t_{44} como consecuencia de una mayor DVP que hace propensa a las DBD hacia la filamentación y a la formación de pequeños arcos eléctricos.

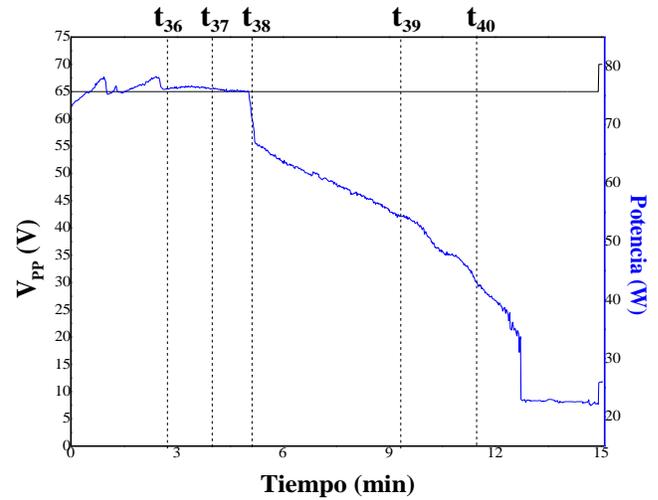
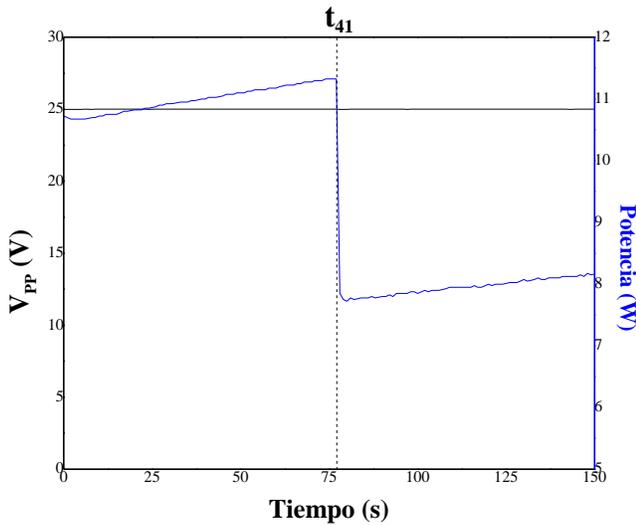
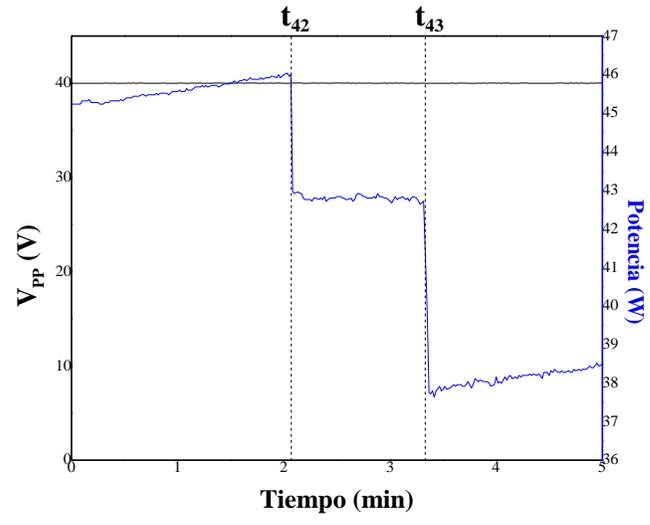


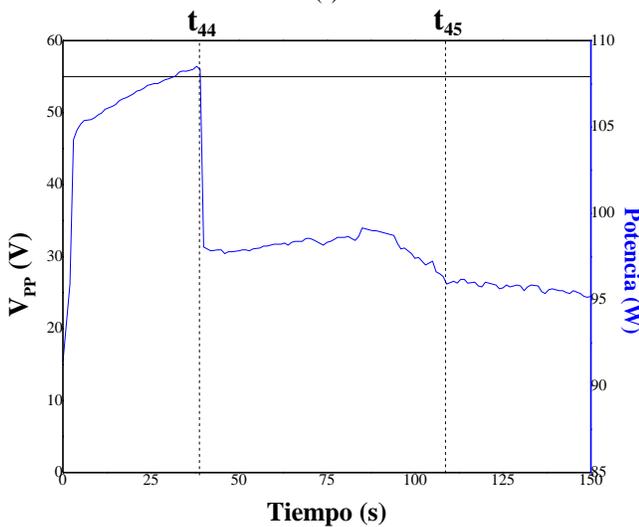
Figura 4.5. Decaimiento de potencia en el $C - DBD_2^A$ con 65 V aplicados.



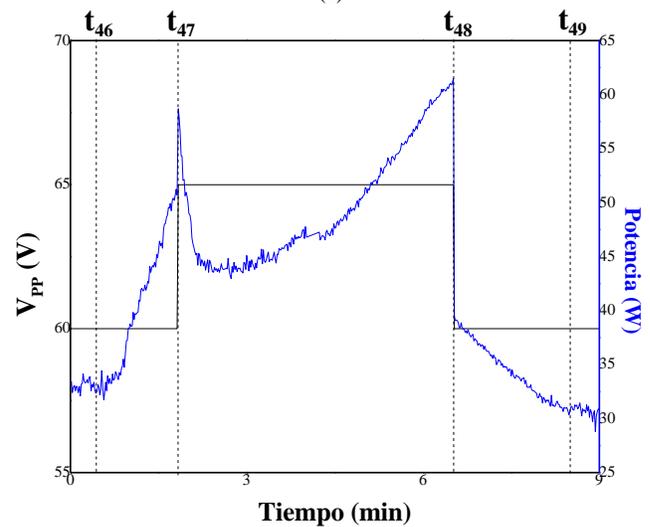
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.6. Voltajes y potencias aplicados al $C - DBD_2^B$. (a) 25 V. (b) 40 V. (c) 55 V. (d) 60, 65 y 60 V.



Es justo en t_{44} cuando se supera la concentración máxima alcanzada en el $C - DBD_2^A$, en la primera sección de éste gráfico de potencia se nota un valor máximo de 108 W, que desciende y se estabiliza a 95 W después de disminuir el flujo y reajustar la CAM al 16.52 % vol. Finalmente y de forma progresiva, V_{PP} se elevó a 60 V (Figura 4.6.d) y hasta t_{46} el experimento requiere de He en un 45.41 % vol. por aproximadamente 30 s, momento en el que se suspende el canal de He y las descargas se mantiene con CAM al 100 % vol. Debido al gradual aumento de potencia, en t_{47} el flujo de CAM disminuye un 43.57% y $V_{PP} = 65 V$ para que la potencia descienda de 58 a 44 W; no obstante, el ascenso continua y en t_{48} circulan 1.99 l min⁻¹ de CAM, lo que fuerza un cambio de 61 a 39 W. De $t_{48} - t_{49}$ las DBD buscan su estabilización, que consiguen en 30 W.

4.2.2 Degradación

De las dimensiones del reactor enunciadas en el Capítulo 3 se deduce un volumen de descarga para el reactor $C - DBD_2^A$ de 50.60 μm^3 y de 29.44 μm^3 para el $C - DBD_2^B$. Con estos datos se complementan las Tablas 4.1 y 4.2, ya que permiten calcular la DVP en cada reactor. Adicionalmente, se introduce el parámetro Densidad de Energía de Entrada (DEE, resultado de la potencia dividida por el flujo de gas a tratar), definida como la cantidad de energía aplicada por litro de gas. Con ambos conceptos, DVP y DEE, se construye el concepto Valor Fuente que permite visualizar las cantidades de potencia y energía necesarias por unidad volumétrica (l y μm^3) para cada dato de degradación obtenido.

El valor máximo de degradación de NO_x con el $C - DBD_2^A$ es de 88.24% para una concentración del 0.38% (9 ppm), en un flujo total de 12.48 l min⁻¹ y con $V_{PP} = 25 V$ (DVP=141.50 $\text{mW } \mu\text{m}^{-3}$ @ DEE=34.42 J l^{-1}); este caso en específico no refleja una mayor degradación para $V_{PP} = 35$ y 45 V, a pesar de que la DVP y la DEE se intensifican cada una 2 y 4 veces su valor inicial, respectivamente (ver Tabla 4.1). Con referencia a las gráficas de la Figura 4.7, se identifica que el porcentaje de degradación aumenta en cada experimento para la misma muestra conforme se incrementa V_{PP} para flujos mayores a 0.14 l min⁻¹ de CAM (1.14 % vol., 24 ppm de NO_x); en estos casos sí es congruente el aumento de la DVP y la DEE. El valor máximo es de 74.07% de degradación cuando $V_{PP} = 55 V$; sin embargo, cuando el flujo de CAM es máximo (2.02 l min⁻¹) únicamente alcanza un 19.27%. La tendencia clara en el tratamiento de los NO_x está encaminada a un descenso en la capacidad del sistema a

su degradación con respecto al aumento en la concentración de CAM, acompañada de altos niveles de DVP y DEE para bajas concentraciones, mismos que disminuyen conforme se agrega más CAM a la mezcla hasta las 300 ppm de NO_x .

En cuanto a los CO_x , el periodo de degradación más estable para el CO_2 , con los potenciales (a) y (b) de la Figura 4.7, es para flujos de 0.5 hasta 1.0 l min⁻¹ de CAM, tiempo en el que la curva asciende suavemente y al final decae del mismo modo hasta 0%; su máximo nivel de 10.81% de degradación es a los 55 V (DVP=994.07 $\text{mW } \mu\text{m}^{-3}$, DEE=238.20 J l^{-1} , CAM=1.89 % vol., CO_2 inicial de 0.165 % vol.). Por otra parte, el CO con $V_{PP} = 35 V$ tiene un máximo de degradación de 4.76% (DVP=279.64 $\text{mW } \mu\text{m}^{-3}$, DEE=67.49 J l^{-1} , CAM al

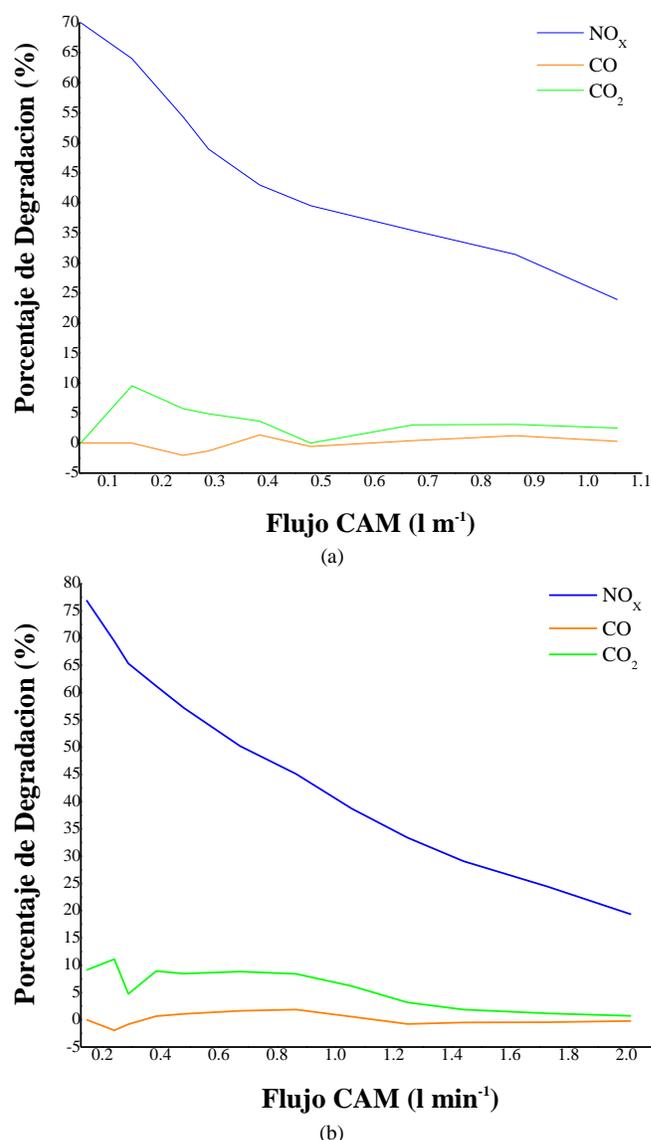


Figura 4.7. Resultados de las pruebas de degradación con el $C - DBD_2^A$. (a) 45 V. (b) 55 V.



1.14 %vol., CO inicial de 62 ppm). Para $V_{PP} > 45 V$ el sistema empieza a generar CO (puntos marcados con rojo en la Tabla 4.1), situación que se vuelve constante a los 55 V con flujos de CAM mayores a 0.5 hasta 1.35 l min⁻¹, cuando el CO y el CO₂ regresan a cero.

Como se dilucida en la Tabla 4.2, la generación de CO se extiende a las pruebas con el $C - DBD_2^B$ y, más aún, hacia el CO₂ de forma discreta. El caso más crítico es en $V_{PP} = 40 V$, situación en la que se suman 11.68 ppm a la condición inicial (-17.69%); etapa que contrasta con los resultados alentadores del 99.09% de degradación para los NO_x, valor máximo que conserva potencias por debajo de los consumidos por el $C - DBD_2^A$. En la Figura 4.8 se presentan los resultados de degradación de NO_x y CO_x para 25, 40, 55, 60 y 65 V de entrada, todos ellos tratados con más detalle en la Tabla 4.2.

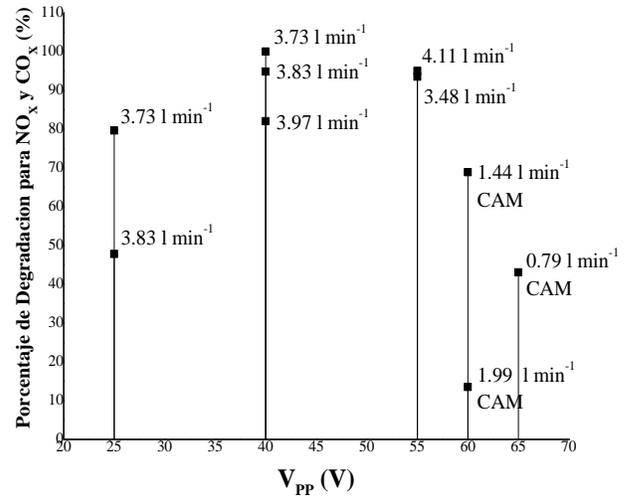


Figura 4.8. Resultados de las pruebas de degradación con el $C - DBD_2^B$.

Tabla 4.1
DATOS DE DEGRADACIÓN DE NO_x Y CO_x PRESENTES EN LA MEZCLA CAM CON EL REACTOR $C - DBD_2^A$

V_{PP} [V]	DVP [mW μm ⁻³]	DEE [J l ⁻¹]	Flujo Total [l min ⁻¹]	CAM [%vol.]	Concentración Inicial			Porcentaje de Degradación		
					NO _x [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [%vol.]	NO _x	CO	CO ₂
25	141.50	34.42	12.48	0.38	9.00	25.00	0.035	88.24	4.08	0.00
	130.83	31.57	12.58	1.14	24.00	62.00	0.105	40.43	4.03	9.52
35	290.91	70.77	12.48	0.38	9.00	25.00	0.035	61.11	2.00	0.00
	279.64	67.49	12.58	1.14	24.00	62.00	0.105	55.10	4.76	9.52
	273.12	65.45	12.67	1.89	39.00	97.00	0.165	41.03	1.03	3.03
	273.32	65.24	12.72	2.26	47.50	115.00	0.205	37.89	0.87	4.88
	273.72	64.82	12.82	2.99	62.50	146.00	0.275	34.40	0.00	3.64
	272.13	64.00	12.91	3.72	80.00	178.00	0.345	33.13	2.25	5.80
45	583.79	142.02	12.48	0.38	9.00	25.00	0.035	70.00	0.00	0.00
	583.79	140.90	12.58	1.14	24.00	62.00	0.105	64.00	0.00	9.52
	570.35	136.67	12.67	1.89	39.00	97.00	0.165	54.32	-2.04	5.71
	558.50	133.30	12.72	2.26	47.50	115.00	0.205	48.96	-1.30	4.88
	538.14	127.44	12.82	2.99	62.50	146.00	0.275	42.97	1.34	3.64
	522.33	122.84	12.91	3.72	80.00	178.00	0.345	39.51	-0.56	0.00
	503.56	116.70	13.10	5.13	115.00	238.00	0.500	35.37	0.42	3.03
	492.89	112.51	13.30	6.49	148.00	289.00	0.650	31.42	1.21	3.10
	460.67	103.68	13.49	7.82	185.00	339.00	0.800	23.89	0.30	2.52
55	996.64	240.52	12.58	1.14	24.00	62.00	0.105	74.07	0.00	8.70
	994.07	238.20	12.67	1.89	39.00	97.00	0.165	67.82	-1.90	10.81
	986.56	235.47	12.72	2.26	47.50	115.00	0.205	64.08	-0.81	4.65
	980.83	232.28	12.82	2.99	62.50	146.00	0.275	60.29	0.65	8.77
	967.39	227.50	12.91	3.72	80.00	178.00	0.345	56.47	1.07	8.33
	904.55	209.63	13.10	5.13	115.00	238.00	0.500	49.79	1.62	8.74
	843.87	192.63	13.30	6.49	148.00	289.00	0.650	44.81	1.86	8.33
	801.19	180.31	13.49	7.82	185.00	339.00	0.800	38.52	0.58	6.13
	775.69	172.15	13.68	9.12	219.00	382.00	0.880	33.26	-0.78	3.14
	752.37	164.69	13.87	10.38	248.00	417.00	1.080	28.97	-0.48	1.84
	731.23	156.78	14.16	12.20	287.00	462.00	1.255	24.35	-0.43	1.19
661.46	138.98	14.45	13.95	330.00	504.00	1.440	19.27	-0.20	0.69	



TABLA 4.2
DATOS DE DEGRADACIÓN DE NO_x Y CO_x PRESENTES EN LA MEZCLA CAM CON EL REACTOR C – DBD₂^B

V _{PP} [V]	DVP [mW μm ⁻³]	DEE [J l ⁻¹]	Flujo Total [l min ⁻¹]	CAM [%vol.]	Concentración Inicial			Porcentaje de Degradación		
					NO _x [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [%vol.]	NO _x	CO	CO ₂
25	373.30	176.78	3.73	2.57	24.60	66.00	0.09	79.67	-3.79	-11.11
	270.38	124.70	3.83	5.01	49.00	122.00	0.20	47.85	-2.87	2.50
40	1548.91	733.51	3.73	2.57	24.60	66.00	0.09	99.09	-17.69	7.51
	1453.80	670.50	3.83	5.01	49.00	122.00	0.20	94.88	-12.25	-2.49
	1295.18	576.27	3.97	8.46	89.00	205.00	0.37	82.04	-8.10	0.21
55	3633.15	1561.46	4.11	11.66	130.00	278.00	0.54	93.53	-9.35	1.85
	3251.70	1650.52	3.48	16.52	170.00	344.00	0.67	95.05	-9.59	2.78
60*	1367.53	1677.50	1.44	54.59 100.00	421.00	635.00	1.81	68.88	-3.31	1.10
65	1663.04	3718.48	0.79	100.00	634.00	776.00	2.69	43.06	-1.68	-0.74
60	1166.78	1035.68	1.99	100.00	928.00	880.00	4.03	13.49	-1.14	0.74

*Al inicio requiere de He al 45.41 % vol.

El tratamiento de la muestra sintética con el C – DBD₂^B se inclina hacia los NO_x, ya que no hay un patrón concluyente acerca del CO₂ y los resultados para el CO no son del todo satisfactorios. A pesar de ello, los NO_x se degradan en un gran porcentaje y su comportamiento eléctrico es estable (Figura 4.6.b), pero la formación de CO es una complicación.

Si se inyecta CAM al 100% se diezma este comportamiento y se elimina el empleo de un gas adicional, parte de los objetivos de esta investigación.

Se culminaron las series de pruebas (Figura 4.9) y se dispuso el equipo para su adecuación y mejoramiento.

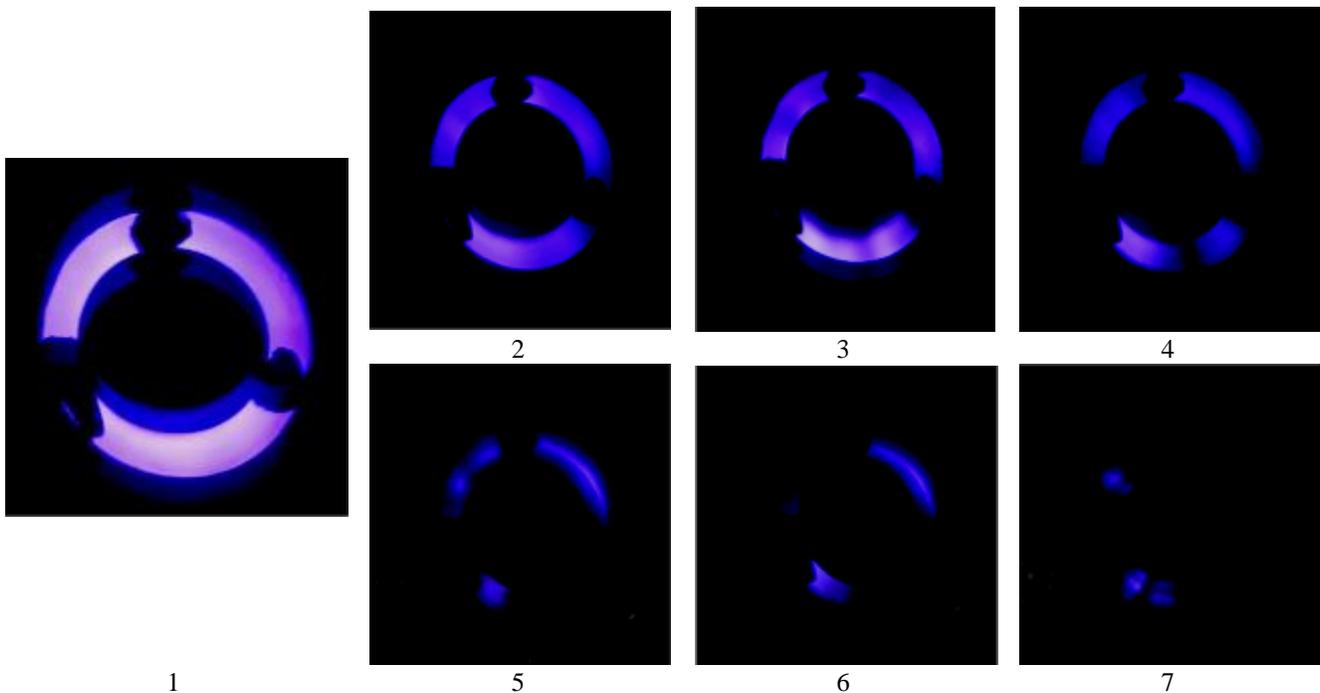


Figura 4.9. Fotografías del comportamiento general de las DBD cuando la concentración de CAM incrementa gradualmente (ver el Videos 2 y 3 del Anexo C). En 1 las microdescargas son homogéneas. Se vuelve filamental en 3 y se acumulan las cargas en la parte donde GND posee mayor volumen. A partir de 5 las DBD son filamentosas y heterogéneas; decaen en número hasta su extinción en 7.

4.3 Conclusiones Finales

Se diseñó y elaboró un sistema de instrumentación y control para equipos de plasma frío tipo descargas de barrera dieléctrica, que incluyó el acondicionamiento de líneas de suministro de gases, la programación de una interfaz virtual basada en el desarrollo gráfico de sistemas, y un inversor con topología *push-pull* de alta frecuencia y alto voltaje.

Se identificaron, mediante barrido de frecuencias, las condiciones idóneas del circuito de control a 41.3 kHz con 25.5% de ciclo de trabajo, con el que se obtuvo una señal senoidal modificada en la etapa de potencia. Fuera de estos parámetros la descarga se vuelve inestable; la modificación del D_{PWM} genera un cambio directo en la amplitud de salida, mientras que la frecuencia provoca cambios en la capacitancia equivalente del reactor, que es inversamente proporcional a la frecuencia de operación.

Se realizó el estudio para comparar el desempeño de dos reactores coaxiales de doble barrera dieléctrica elaborados de alúmina, que fueron aplicados al proceso de degradación de tres gases que componen la mezcla sintética CAM 96 Middle Range diluida en helio industrial, estos son: los óxidos de nitrógeno, el monóxido y el dióxido de carbono. Las corridas experimentales de mezcla He:CAM arrojaron porcentajes de degradación superiores al 99% para los NO_x , del 4.5% para el CO y del 10.5% para el CO_2 . Al trabajar con únicamente CAM, el porcentaje fue cercano a 69% de degradación para los NO_x . Los resultados de la experimentación con CAM al 100% no muestran una degradación simultánea de los gases.

En las gráficas de degradación es notoria la dependencia de degradación respecto a su concentración inicial.

El CO producido con el $C - DBD_2^A$ se debe directamente al mecanismo de reacción del CO_2 , pues ambos tienen un comportamiento opuesto y convergen a cero al mismo tiempo, cuando el flujo de la CAM es de 1.35 l min^{-1} . Se argumenta también el aumento de O_2 , que ha sido marcado como factor negativo en la degradación de contaminantes.

La tecnología de plasma frío generado mediante descargas de barrera dieléctrica es una alternativa para el tratamiento de los NO_x , debido a que es posible obtener porcentajes de degradación elevados.

Las ventajas que presenta el sistema son:

- Opera a temperatura ambiente y a presión atmosférica; asimismo se ha probado que pueden prescindir de gas plasmógeno, por lo que se puede utilizar aire como medio principal de ionización.
- Equipo con consumo de potencia bajo y diseño compacto, características que potencializan su empleo a bordo de fuentes móviles, en las que el plasma frío puede trabajar en conjunto al convertidor catalítico para tratar a los gases que escapan durante el arranque del automóvil.

Por otro lado, las desventajas son:

- Consumo de potencia adicional como consecuencia de las dos barreras que forman el reactor; sin embargo, esta geometría propicia homogeneidad y reduce la forma filamental de las DBD, lo que a su vez facilita el empleo de flujos de gas mayores.
- El plasma frío es bastante reactivo química y eléctricamente, pero carece de selectividad. Se pueden acoplar materiales (zeolitas o compuestos de carbono) para aumentar la capacidad de tratamiento de los gases.

En la Figura 4.2 es notorio el pico de corriente durante la conmutación a cero voltaje. Este comportamiento es característico de las descargas de barrera, en la Figura 2.20 también se percibe y, de hecho, Manley lo menciona en su trabajo de caracterización eléctrica ([43], Capítulo 2).

4.4 Observaciones y Recomendaciones

Durante el proceso de elaboración del inversor se notó una interferencia electromagnética alta, ocasionada por los largos tramos de cable que servían como antenas y ocasionaban arcos recurrentes en las DBD. Esto se solucionó al colocar lo más cerca posible las etapas de control, potencia y el reactor; esto se puede mejorar aún más con la instalación de ferritas (bobinas de choque) en la etapa de control, y con cables apantallados entre cada sección.

Para el proceso de análisis se recomienda una cámara de aislamiento para el reactor, ya que el ruido que emiten las DBD interfiere severamente en las herramientas de diagnóstico.

Conviene disminuir el grosor de las paredes dieléctricas para reducir la potencia de consumo, y adecuar un centrador para la sección central del $C - DBD_2^B$ porque ésta se inclina hacia



un costado del reactor y provoca acumulación de la descarga en ese punto del reactor.

Se podría implementar un reactor con el electrodo HV muy delgado y cubierto parcialmente con el dieléctrico, con la intención de generar descargas corona sobre la parte expuesta y estudiar el tratamiento de SO_x, que en ninguna de las pruebas mostró alteración alguna y, que por lo tanto, no fue reportado.

Entre el electrodo de referencia GND y la barrera externa se generan descargas que no aportan ningún beneficio al proceso de degradación, por consiguiente representan pérdidas de potencia (Figura 4.10).

En ocasiones la descarga es más intensa en la sección del reactor donde GND posee mayor volumen. Por lo tanto se propone utilizar tinta conductora para sustituir este electrodo y, así, reducir las pérdidas de potencia y distribuir homogéneamente la descarga, ya que la tinta se adheriría uniformemente a la superficie del dieléctrico.

Finalmente, en la Figura 4.11 se plantea la ubicación del prototipo para el tratamiento de NO_x ligado al catalizador. Se podrían colocar varios reactores en paralelo (como los ozonizadores industriales) para distribuir el flujo, con electrodos HV bien balanceados con el fin de garantizar una repartición equitativa de corriente. La fuente primaria es la batería del automóvil con un circuito *buck-boost* para multiplicar su voltaje. El circuito de control bien puede ser



Figura 4.10. Pérdidas de potencia por la formación de microdescargas fuera del reactor.

alimentado en la fase estacionaria por una celda termoeléctrica. La etapa de control debe ser de lazo cerrado para compensar la potencia durante los cambios de rapidez del vehículo.

En este punto termina el trabajo de investigación; el artículo del Anexo A.B.1 expone particularidades adicionales.

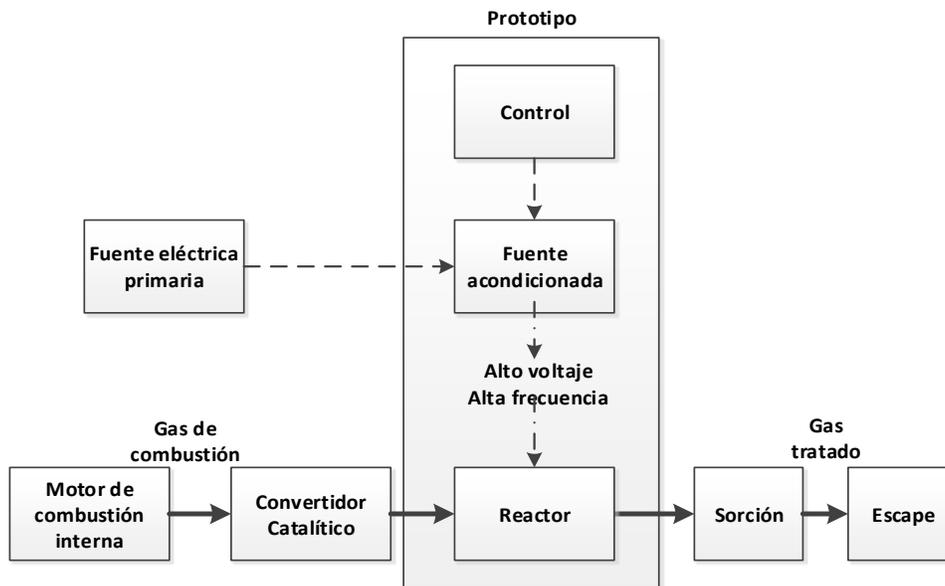


Figura 4.11. Esquema propuesto para la instalación en serie de un sistema de DBD al convertidor catalítico.



ANEXOS



ANEXO A. DOCUMENTACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

Para evitar la acumulación de páginas, a continuación se agregan los enlaces a las hojas de datos y manuales de usuario del equipo y dispositivos empleados en el desarrollo del trabajo (Clic izquierdo sobre el texto en negritas para seguir el vínculo):

- ✓ **7408.** Circuito integrado de 4 compuertas AND.
- ✓ **7476.** Circuito integrado con 2 *flip-flop* J-K.
- ✓ **78XX.** Regulador lineal de voltaje de XX volts.
- ✓ **80i-1000s.** Sonda de corriente.
- ✓ **CAM 96 Middle Range.** Mezcla sintética tratada.
- ✓ **GDS-122.** Osciloscopio de 2 canales.
- ✓ **IXFN 80N50.** Transistor MOSFET.
- ✓ **MKS 247D.** Controlador general de las válvulas de gas.
- ✓ **MKS MFC-M1000B.** Válvula de control de gas CAM.
- ✓ **Omega FMA-A2315.** Válvula de control de gas He.
- ✓ **OX 7104 III.** Osciloscopio de 4 canales.
- ✓ **P6015A.** Punta de prueba de alto voltaje.
- ✓ **PC-2115.** Panel táctil de control.
- ✓ **PG-250.** Analizador portable de gases residuales.
- ✓ **QC5000.** CNC para elaboración de circuitos impresos.
- ✓ **STPR1620CT.** Diodo de rodamiento libre en el inversor.
- ✓ **TC4422.** Driver de compuerta del MOSFET.
- ✓ **TL594.** Circuito oscilador para pulsos de control.
- ✓ **TLP250.** Optoacoplador.
- ✓ **U126/91/20-3C94.** Núcleo del transformador.
- ✓ **USB-6259.** Tarjeta de adquisición de datos.
- ✓ **XLN10014.** Fuente principal para suministro de potencia. Para obtener el *toolkit* de LabVIEW™ ir a la dirección:
<http://www.bkprecision.com/products/power-supplies/XLN10014-100v-144a-144kw-programmable-dc-power-supply.html>



ANEXO B. PRODUCTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

B.1 Documentación del Artículo Enviado



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

REVISTA INGENIERÍA INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA



Ref. 1147

DOCTOR RICARDO VALDIVIA BARRIENTOS
INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES
LABORATORIO DE APLICACIONES DE PLASMAS
DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DEL AMBIENTE
P R E S E N T E

Estimado Doctor Valdivia Barrientos

Hemos recibido el artículo "Control de un Sistema de Descargas de Barrera Dieléctrica basado en el Diseño Gráfico de Sistemas" cuyos autores son Gerardo Jiménez Aviles, Ricardo Valdivia Barrientos, Arturo Colín Cruz, Marquidia Pacheco Pacheco y Joel Pacheco Sotelo para su posible publicación en Ingeniería Investigación y Tecnología.

Una vez que el artículo sea inspeccionado por el Comité Evaluador de la revista, será puesto a consideración por tres árbitros reconocidos como autoridades en el campo del conocimiento respectivo, quienes lo estudiarán y dictaminarán sobre su publicación.

Tan pronto nos envíen sus comentarios, le informaremos sobre dicho dictamen. El monitoreo del estado de la evaluación es responsabilidad de usted, por lo que si no recibe una notificación por parte nuestra en un tiempo razonable, deberá solicitarla vía correo electrónico.

Agradecemos cumplidamente su colaboración con la Revista Ingeniería Investigación y Tecnología.

Atentamente:

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Ciudad Universitaria, 21 de mayo de 2015.

ING. CUITLÁHUAC E. SÁNCHEZ BASILIO

Coordinador de Arbitraje

ACUSE DE RECIBO

Revista Ingeniería, Investigación y Tecnología. ISSN: 1405-7743

Facultad de Ingeniería, UNAM. Cd. Universitaria 04510, México, D. F. Tel. (55) 5622-0876 / Fax (55) 5616-1899

e-mail: iit.revista@gmail.com

www.ingenieria.unam.mx/~revistafi



Control de un Sistema de Descargas de Barrera Dieléctrica basado en el Diseño Gráfico de Sistemas

Control of a Dielectric Barrier Discharge Reactor based on Graphical System Design

Gerardo Jiménez-Aviles^{1,2}

gerjimav@gmail.com, 7222608001, Paseo Colón esq. Paseo Tollocan, Toluca, C. P. 50120.

Ricardo Valdivia-Barrientos²

ricardo.valdivia@inin.gob.mx, 5553297200. Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, C.P. 52750.

Arturo Colín-Cruz²

acolinc@uaemex.mx, 7222173890. Paseo Colón esq. Paseo Tollocan, Toluca, C. P. 50120.

Marquidia Pacheco-Pacheco²

marquidia.pacheco@inin.gob.mx, 5553297200. Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, C.P. 52750.

Joel Pacheco-Sotelo²

joel.pacheco@inin.gob.mx, 5553297200. Carretera México-Toluca s/n, La Marquesa, Ocoyoacac, C.P. 52750.

¹ Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, Departamento de Ciencias Ambientales, Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas.

² Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Departamento de Posgrado.

RESUMEN

Este trabajo describe el desarrollo e implementación de un sistema de monitoreo y control de los parámetros físicos involucrados en las etapas de inicio, sostenimiento y apagado de descargas de barrera dieléctrica generadas dentro de un reactor de geometría coaxial. En el proceso se empleó el diseño gráfico de sistemas (GSD) para conjuntar eficientemente una interfaz gráfica de usuario (GUI), la tarjeta de adquisición de datos DAQ-6259 con canal de comunicación USB, una fuente de voltaje conmutado *push-pull*, controladores de flujo gaseoso y equipo de diagnóstico químico y electrónico. El núcleo del enfoque GSD se encuentra en el código de programación G de LabVIEW™; de esta manera, se recopilaron datos precisos y en tiempo real de las variables (vgr.: flujo de aire y potencia aplicada), mismos que permitieron realizar un análisis del desempeño de las descargas.

Durante las pruebas se emplearon diferentes concentraciones de una mezcla de helio contaminada con óxidos de nitrógeno, con la finalidad de cuantificar el porcentaje de degradación/destrucción de los últimos. Los resultados indican un valor mayor al 88%.

Por seguridad, a la GUI se accede a través de la intranet institucional, debido a que los compuestos generados pueden representar un riesgo para la salud humana.

PALABRAS CLAVE: Contaminación atmosférica, descargas de barrera dieléctrica, diseño gráfico de sistemas, fuentes móviles, óxidos de nitrógeno, plasma frío.

ABSTRACT

This paper describes the development and implementation of a control and monitoring system for the physical parameters involved in the stages of initiation, maintenance and shutdown of dielectric barrier discharges generated within a coaxial geometry reactor. In the process, the graphical system design (GSD) was employed to efficiently combine a graphical user interface (GUI), the data acquisition card DAQ-6259 with USB communication channel, a switch-mode power supply in push-pull configuration, drivers for gas flow, chemical and electronic equipment for diagnosis. The core of the GSD approach is located in the G code from LabVIEW™, in this way, accurate data was collected in real time (e.g., airflow and power applied), which allowed to perform an analysis of the discharges performance.

During testing, different concentrations of a mixture of helium contaminated with nitrogen oxides, in order to quantify the percentage of its degradation. The results indicate a value greater than 88%.

For safety reasons, the GUI can be accessed remotely through institutional intranet, because of the generated compounds that may represent a risk to human health.



KEYWORDS: Atmospheric pollution, dielectric barrier discharges, graphical system design, mobile sources, nitrogen oxides, cold plasma.

1 INTRODUCCIÓN

Sólido-líquido-gas es una secuencia conocida de los estados de agregación de la materia al considerar aumentos graduales de la energía cinética de las moléculas que la componen. Desde la rigidez y orden de un sólido se puede conseguir que sus uniones se rompan totalmente y que cada molécula se mueva libremente hasta formar un gas, medio que generalmente tiene carga eléctrica neutra y se comporta como un aislante eléctrico. Para producir conductividad eléctrica en un gas se suministra energía suficiente para disociar sus moléculas en los átomos que las componen y, así, extraer a los electrones de sus estados fundamentales hacia niveles superiores, generando un flujo de partículas cargadas cuyo comportamiento dinámico es dominado por fuerzas electromagnéticas (Conrads, 2000). Esta materia ionizada es plasma, comúnmente obtenida por compresión adiabática, al incidir un haz de fotones o por colisiones atómicas, a escala industrial se utiliza energía eléctrica por ser económica y técnicamente más viable (Becker, 2010).

El estudio del plasma suele dividirse de acuerdo al equilibrio térmico de las partículas que lo componen: plasmas térmico y frío. En esta última clasificación se encuentran las descargas corona, luminiscentes y de barrera dieléctrica (DBD) (Conrads, 2000; Becker, 2010). Los plasmas fuera de equilibrio termodinámico local, no térmicos o fríos (NTP, *non-thermal plasma*) se caracterizan por la alta divergencia en las energías de sus electrones libres y especies pesadas (átomos, iones (T_+), partículas neutras (T_n) y moléculas). Generalmente, la temperatura de las partículas pesadas permanece entre 300 y 400 K, mientras que la de los electrones (T_e) comprende el orden de 10^4 a 10^5 K (Meichsner, 2010). El NTP resulta útil para muchas aplicaciones técnicas (focos, televisores, tratamiento de superficies, fabricación de nanomateriales, la ingeniería espacial, la medicina o la nanolitografía) porque es posible controlar separadamente a T_+ y T_n de T_e . Las características que diferencian al NTP son: 1) su alta desviación cinética de equilibrio: $T_e \approx 10^4$ K $\gg T_+ > T_n$; 2) su baja densidad electrónica, de 10^{14} a 10^{18} m $^{-3}$; y 3) la temperatura promedio ($T_g = T_+ + T_n$) se mantiene similar a la ambiente, debido a que la masa de las especies pesadas es mucho mayor que la de los electrones, de aquí el nombre de NTP (Becker, 2010).

Son pocos los avances en el campo del NTP que se han traducido con éxito del laboratorio a tecnologías aplicables en la vida cotidiana; impedidos, entre otros factores, por la falta de identificación, cuantificación y control de los subproductos producidos en el proceso, además de que a altas presiones es difícil mantener la descarga debido a su inestabilidad y a su susceptibilidad a la filamentación, seguida de una transición a arco eléctrico (Kunhardt, 2000). La aplicación ambiental histórica e ideal de las DBD se enfoca a la generación de ozono (gas oxidante), pues necesita funcionar a temperatura baja porque las moléculas de O $_3$ decrecen rápido a temperaturas elevadas y, al mismo tiempo, requiere una presión relativamente alta (Gottschalk *et al.*, 2010). Del mismo modo, sistemas en serie NTP-catalizador se han combinado para tratar óxidos de nitrógeno (NO $_x$) provenientes de automóviles: comprenden una etapa oxidativa (NTP) que convierte monóxido de nitrógeno (NO) a dióxido de nitrógeno (NO $_2$), y una fase de reducción y almacenamiento (catalizador), que convierte el NO $_2$ a nitrógeno (N $_2$), dióxido de carbono (CO $_2$), hidrógeno (H $_2$) y oxígeno (O) (Penetrante *et al.*, 2002). Dado que las DBD operan a niveles altos de potencia y tratan flujos grandes de gas a presión atmosférica con caída de presión insignificante (basado en la tecnología madura de O $_3$), potenciales aplicaciones en el control de la contaminación atmosférica se han examinado sistemáticamente y en el presente trabajo se presenta la instrumentación basada en el Diseño Gráfico de Sistemas (GSD, *graphical system design*) de un reactor para DBD aplicado al tratamiento de NO $_x$.

1.1 Descargas de Barrera Dieléctrica

En el NTP la T_e es el factor determinante al iniciar las reacciones químicas, que en técnicas activadas térmicamente resultarían ineficientes o imposibles de realizar. Una vez iniciada la ionización, la distribución de energía la ejecutan los electrones (e^-), más ligeros que cualquier partícula y con alta energía cinética adquirida, por lo que pueden acelerarse eficazmente para repartir la energía al resto del gas mediante colisiones, dentro de las cuales se encuentran: las elásticas, que cambian la energía cinética de las especies neutras, y las inelásticas, que convierten a las especies neutras en especies reactivas e inducen una serie de reacciones químicas (Tabla 1) que producen simultáneamente portadores de carga y especies altamente reactivas en el NTP (Meichsner, 2010).

Las DBD, descargas de barrera o silenciosas, son un conjunto de canales de conducción (microdescargas) en el espacio existente entre dos electrodos, separados por una o varias capas dieléctricas (vidrio, sílice, polímeros o cerámicos), sobre los cuales se aplica voltaje alterno para iniciar y sostener las microdescargas. Las geometrías típicas en los reactores son: de placas paralelas (planar o coplanar) o cilíndricas (coaxial) (Kogelschatz, 2003).



Tabla 1. Reacciones en la Región Activa del NTP

Ionización	$X_2 + e^- \rightarrow X_2^+ + 2e^-$
Captura de electrones	$X_2 + e^- \rightarrow X_2^-$
Captura disociativa de electrones	$X_2 + e^- \rightarrow X^- + X$
Disociación	$X_2 + e^- \rightarrow X + X + e^-$
Excitación	$X_2 + e^- \rightarrow X_2^* + e^-$
Ionización disociativa	$X_2 + e^- \rightarrow X^+ + X + 2e^-$
Liberación de electrones	$X_2^- + e^- \rightarrow X_2 + 2e^-$
Recombinación	$X_2^+ + e^- \rightarrow X_2$

Datos extraídos de (Meichsner, 2010).

Pacheco *et al.* (2008; 2012; 2013) reportan investigaciones teórico-experimentales de tratamiento para gases de combustión mediante DBD y es puntualizado el interés de emplearse a bordo de fuentes móviles (vehículos). En su trabajo de 2008 realizaron el análisis de cinética química, obtuvieron el mecanismo de degradación de los NO_x y determinaron el comportamiento de las especies en la descarga. Los reactores utilizados fueron coaxiales, de una y dos paredes de pírex, con brecha de 1.4 cm y volumen para descarga de 65 μm³. En la investigación de Estrada *et al.* (2011), con un consumo de 20 W, se trató la mezcla de He (gas de acarreo), aire, vapor de agua y NO_x en un reactor de pírex, con una remoción de 99.74% para una concentración inicial de 50 ppm de NO_x; porcentaje reducido a 96.66% con 300 ppm.

En las diversas aplicaciones de las DBD es importante conocer su comportamiento para poder cuantificar y analizar los diversos fenómenos que ocurren durante el proceso por acción de las variables involucradas (flujo, voltaje aplicado o corriente demandada). Existen diversos dispositivos para realizar esta tarea, que van desde sensores individuales hasta controladores automatizados muy sofisticados (Jiménez *et al.*, 2012).

1.2 Diseño Gráfico de Sistemas

El GSD es una técnica de diseño (embebido), prototipo, prueba, control y despliegue de aplicaciones, que combina programación gráfica en paralelo con hardware COTS (*commodity off-the-shelf*) para obtener la mayor cantidad de cálculo útil con un costo comercial bajo y simplificar el desarrollo de una aplicación, dando como resultado diseños robustos personalizados. El GSD permite diseñar sin la necesidad de hacer uso del hardware final, posibilitando la realización de simulaciones y acortando los ciclos de integración e implementación (Bishop, 2007). En este proceso de instrumentación se emplearon: 1) LabVIEW™ 2013 para programar una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI, *graphical user interface*) de un instrumento virtual (VI); 2) la tarjeta de adquisición de datos reconfigurable NI USB-6259 M Series; y 3) una computadora de 8 núcleos a 2 GHz. La GUI centraliza el monitoreo y control de los dispositivos asociados a las DBD, mientras recopila datos precisos en tiempo real.

2 MONTAJE DEL EXPERIMENTO

Esencialmente, para generar DBD se emplea un flujo gaseoso, una fuente de voltaje alterno y un reactor que confine las microdescargas. En el proyecto se empleó un reactor coaxial (C-DBD₂) elaborado de alúmina, el suministro de gas fue a través de dos válvulas de control y un mezclador. Como fuente de excitación se diseñó y construyó un sistema de potencia integrado por una fuente de voltaje de CD y un inversor de alto voltaje a alta frecuencia, caracterizado con osciloscopios (AEMC® OX 7104 III y GW® Instek GDS-122), sondas de alto voltaje (Tektronix® P6015A) y corriente (Fluke® 80i-1000s). El porcentaje de degradación del reactor se calculó con los datos proporcionados por el Analizador de Gases Residuales (RGA, *residual gas analyzer*) Horiba® PG-250. Una vez instalado el experimento, se iniciaron las pruebas con diferentes concentraciones en la mezcla gaseosa, a 3.10 km smm, con una presión atmosférica de 73.97 kPa y temperatura promedio de 294 K.

2.1 Líneas de gas

A partir de los estudios realizados por Pacheco *et al.* (2012), que establecen la composición y concentraciones de una muestra sintética de gas de combustión, en este trabajo se usaron dos gases adquiridos en INFRA®: la mezcla



CAM 96 Middle Range (CAM), compuesta de propano (C_3H_8), monóxido de carbono (CO), CO_2 y NO, balanceados en N_2 y Helio Industrial (He). Para suministrar la mezcla gaseosa se instalaron dos válvulas de flujo másico (MFC), una MKS™ MFC-M1000B (MFC₁) para la CAM, y una Omega™ FMA-A2315 (MFC₂) para el gas de acarreo, en este caso el He; ambas válvulas fueron conectadas a un controlador MKS™ 247D. Debido a que los MFC están calibrados para flujos de N_2 , se ajustaron las escalas para el gas correspondiente con ayuda de las Ecuaciones 1-4 (MKS, 2013a; MKS, 2013b; Omega, 2013). Los ajustes realizados se agrupan en la Tabla 2, donde al sumar los valores de la última columna se determina que el flujo máximo de la mezcla He-CAM es de 67.75 l min^{-1} , en una relación porcentual 85.84-14.16 %.

$$GCF_{CAM} = 0.3106 \sum_{i=1}^n a_i s_i \left(\sum_{i=1}^n a_i d_i C p_i \right)^{-1} \quad (1)$$

$$SCF = (GF)(GCF_{CAM}) \quad (2)$$

$$Flujo_{CAM} = (GCF_{CAM})(Flujo_{N_2}) \quad (3)$$

$$Flujo_{He} = 1.454 Flujo_{N_2} \quad (4)$$

donde:

GCF_{CAM}	=	factor de corrección de la mezcla CAM compuesta de n gases,
d_i	=	densidad del i -ésimo gas [g l^{-1} , 0°C @ 760mmHg],
Cp_i	=	calor específico del i -ésimo gas [$\text{cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$],
a_i	=	fracción de flujo del i -ésimo gas,
s_i	=	factor de corrección debido a la estructura molecular del i -ésimo gas, igual a:
		1.030 para gases monoatómicos,
		1.000 para gases diatómicos,
		0.941 para gases triatómicos,
		0.880 para gases poliatómicos,
SCF	=	factor de corrección de escala,
GF	=	factor de corrección de la válvula, y

Tabla 2. Flujos y Concentraciones Máximos para la Mezcla Gaseosa

Gas	d_i [g l^{-1}]	Cp_i [$\text{cal g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$]	GCF individual	Concentración [% vol.]	Error [%]	Factor de Corrección	MFC [l min^{-1}]
Helio	0.1786	1.2410	-	100	-	1.4540	58.15
CAM						0.9594	9.59
C_3H_8	1.9670	0.3885	0.36	0.119988	± 1.0	-	-
CO	1.2500	0.2488	1.00	3.99	± 1.0	-	-
CO_2	1.9640	0.2016	0.70	11.99	± 1.0	-	-
NO	1.3390	0.2328	0.99	0.30006	± 1.0	-	-
N_2	1.2500	0.2485	1.00	83.599952	± 4.0	-	-

2.2 Fuente de voltaje

Para generar y mantener las DBD es necesario alimentar continuamente el sistema con una fuente bipolar, en caso contrario el medio retorna a la fase gaseosa. La amplitud mínima de voltaje para que sucedan las descargas se denomina Voltaje de Rompimiento (V_r), cuando su valor es inferior al requerido la ionización es prácticamente nula, una vez superado ligeramente ese nivel comienza a existir un flujo de corriente entre los electrodos (plasma parcialmente ionizado). El valor de V_r depende del gas, la presión de trabajo (p) y de la distancia entre los electrodos (d), parámetros vinculados con la Fórmula de Paschen (Ecuación 5, en la que δ y σ son constantes específicas del gas inyectado) (Fridman, 2008).



$$V_r(pd) = \frac{\delta pd}{\sigma + \ln(pd)} \quad (5)$$

Si al C-DBD₂ se acopla una fuente de voltaje alterno de alta frecuencia, tanto la eficiencia como la conductividad eléctrica aumentan y el tamaño del equipo final se reduce notablemente. La importancia de la frecuencia de excitación radica en su influencia en el comportamiento general de la descarga, en el orden de kHz los electrones y los iones siguen las oscilaciones del campo eléctrico, mientras que en un orden superior, MHz o GHz, sólo los electrones siguen dicho campo (Roth, 1995). Una fuente conmutada (SMPS, *switch-mode power supply*) permite trabajar con frecuencias de kHz mediante el cambio de estado de transistores. En este trabajo se ocupa como fuente principal de voltaje (V_{PP}) la SMPS B&K® PRECISION XLN10014, que puede proporcionar una potencia máxima de 1.44 kW (100 V @ 14.4 A), el diseño del sistema de excitación se enfoca en desarrollar un inversor con topología *push-pull* (PPI, *push-pull inverter*) con base en la teoría expuesta por Bersani (2009) y Mohammad (2007) (Figura 1).

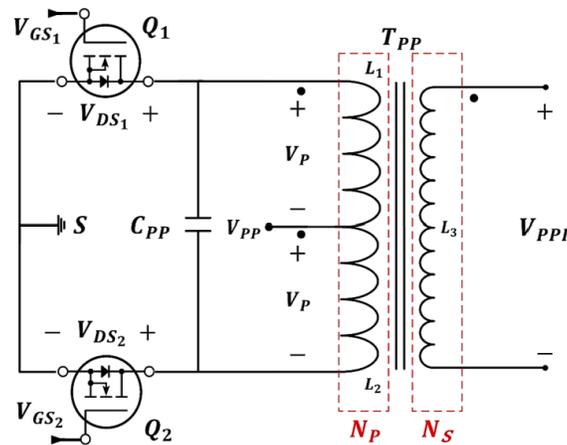


Figura 1. Circuito eléctrico del inversor *push-pull*.

En el diagrama eléctrico del PPI se ubican los MOSFET Q_1 y Q_2 , matrícula IXFN80N50 ($V_{DS(MÁX)} = 500$ V, $I_{DS(MÁX)} = 80$ A y $R_{DS(MÁX)} = 55$ m Ω), C_{PP} es un condensador de poliéster de 3.2 nF y forma el circuito taque resonante con el transformador T_{PP} , compuesto por las bobinas L_1 , L_2 (ambas de 320 μ H) y L_3 (5 mH), con una ganancia M determinada experimentalmente de 100 cada vez que se activa uno de los devanados primarios. El núcleo de T_{PP} (U_{PP}) se compone de ferrita grado 3C94, Ferroxcube® U126/91/20-3C94 ($L_{U_{PP}} = 48$ cm, $A_{U_{PP}} = 5.6$ cm² y $\mu_{pp} = 2050$, con un peso de 1.36 kg) (Ferroxcube, 2013). En paralelo a L_3 se conectó una resistencia R_{PP} de 100 M Ω @ 10 W para proporcionar una vía de descarga a la corriente en el devanado secundario una vez que se han extinguido las microdescargas. Con estos valores, al aplicar la Ecuación 6 se determina el valor de la frecuencia de resonancia $f_R = 111.21$ kHz.

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{PP} L_{PP}}} \quad (6)$$

2.3 Reactor

De acuerdo con la Figura 2, las dimensiones y características físicas del C-DBD₂ son: 15.40 mm de radio exterior (R_1), 12 mm de radio interno (R_2), 19.30 cm de longitud (D_1), 4.85 mm de radio del aislante interno (R_3); el voltaje de salida de PPI (V_{PPI}) se conecta a HV, que es un tubo hueco de acero inoxidable de 13.62 cm de longitud, 1.57 mm de grosor y radio de 3.16 mm (R_4); el electrodo GND es una malla de acero inoxidable de 0.80 mm de grosor y 11.37 cm de longitud (D_2). El volumen de las microdescargas es de 50.60 μ m³. El reactor se elaboró con dos capas aislantes de alúmina, ya que propician una descarga más homogénea respecto a reactores con una barrera.



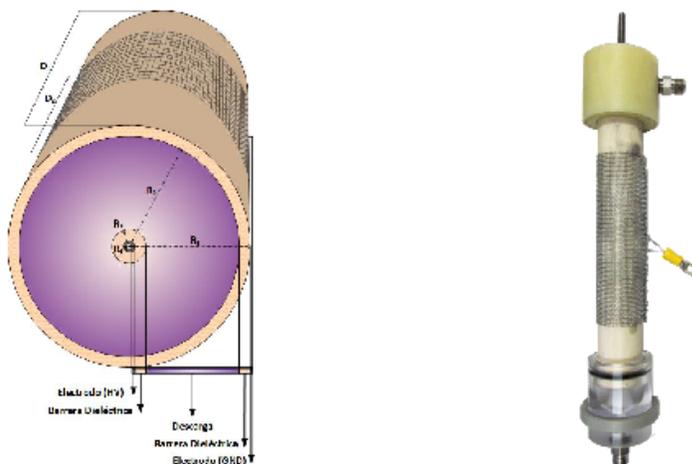


Figura 2. Reactor coaxial de doble barrera dieléctrica.

2.4 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta 6259 cuenta con 128 conectores de entrada/salida en tiempo real, que incluyen 36 puertos analógicos: 4 salidas de 16 bits (AO, $\pm 10\text{ V}$) @ 2.00 MS s^{-1} , y 32 entradas (AI, $\pm 10\text{ V}$) @ 1.00 MS s^{-1} , que pueden ser referenciadas a una tierra común (RSE) o estar aisladas unas de otras (Diff). También posee 48 puertos digitales (DIO) y 2 contadores/temporizadores (ctr) de 32 bits basados en el oscilador interno de 80 MHz (National Instruments, 2013).

Para acceder al control remoto de las válvulas de gases se utiliza el conector DB₂₅ ubicado en la parte trasera del controlador 247D, desde su panel frontal se ajustan las palancas de nivel de flujo y de modo de control a las posiciones *Rem* y *Ext*, respectivamente. *Ext* permite el control de la señal de flujo desde un dispositivo externo y *Rem* especifica que el cambio de estado del MFC será con lógica inversa TTL. Cada uno de los MFC requiere de dos señales de control: un pulso TTL (DIO) y un voltaje entre 0-5 V que es linealmente proporcional al flujo (AO). Por el mismo puerto DB₂₅ se envían estas dos señales y se recibe una más para corroborar el flujo (AI).

Para controlar el PPI, en la tarjeta se configura un tren de pulsos continuos en el puerto *ctr0*, con rangos para el control por Modulación de Ancho de Pulso (PWM, *pulse width modulation*): $140\text{ Hz} \leq f_{PWM} \leq 160\text{ kHz}$ y $0.01 \leq D_{PWM} \leq 0.99$, para la frecuencia y el ciclo de trabajo, respectivamente. La señal de *ctr0* se envía por los pines 10 (señal) y 11 (tierra en serie con $R_g = 390\ \Omega$) al optoacoplador TLP250, cuya salida sirve como reloj para el *flip-flop* 7476, que tiene sus entradas $JK = 5\text{ V}$; este arreglo proporciona los pulsos Q y \bar{Q} desfasados 180° entre sí, a los que se les aplica la función AND con la señal *ctr0* para obtener pulsos, V_{65_1} y V_{65_2} , con rangos de la mitad de *ctr0*: $70\text{ Hz} \leq f_{PWM} \leq 80\text{ kHz}$ y $0.005 \leq D_{PWM} \leq 0.495$ (Figura 3).

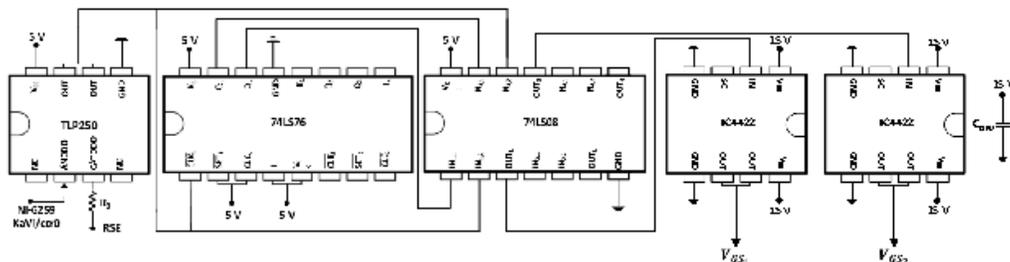


Figura 3. Circuito de control de compuerta para los MOSFET.



Para la etapa de caracterización, se integraron los datos del RGA PG-250 que entrega mediciones para 7 gases, sin embargo, sólo se presentan los resultados para los NO_x. La señal recibida es de 0 a 10 mA para las escalas ajustables que van de 0 a 5000 ppm y de 0 a 25 %vol.

Tabla 3. Distribución de los Puertos de la Tarjeta USB-6259

Canal Analógico de Salida		Canal Analógico de Entrada		Canal Digital		Contador Temporizador	
<i>Puerto</i>	<i>Dispositivo</i>	<i>Puerto</i>	<i>Dispositivo</i>	<i>Puerto</i>	<i>Dispositivo</i>	<i>Puerto</i>	<i>PWM</i>
AO ₀	MFC ₁	AI ₀ -AI ₈	MFC ₁	DIO ₀	MFC ₁	ctr ₀	Q ₁
AO ₁	MFC ₂	AI ₁ -AI ₉	MFC ₂	DIO ₁	MFC ₂		Q ₂
		AI ₂ -AI ₁₀	RG A NO _x				
		AI ₃ -AI ₁₁					
		AI ₄ -AI ₁₂					
		AI ₅ -AI ₁₃	RG A				
		AI ₆ -AI ₁₄					
		AI ₇ -AI ₁₅					
		AI ₁₆ -AI ₂₄					

2.5 Interfaz Gráfica de Usuario

El VI final se compone por cuatro sub-VI que permiten: a) acceder al personal (Registro.vi), b) configurar los puertos de la USB-6259 y procesar los datos (Principal.vi), c) comunicar con el equipo de diagnóstico (PG250.vi) y d) guardar información (Bitácora.vi). La información y los controles pueden ser consultados y modificados *in situ* o se puede ingresar remotamente a través de la dirección http://200.15.118.244/KaVi_v.2.04.html; simultáneamente, la rutina puede guardar información en hojas de cálculo a tasas configurables que van de 1 S h⁻¹ a 1 S s⁻¹. El programa detiene automáticamente el suministro de potencia al reactor en caso de una sobrecorriente, frena las instrucciones en XLN, deja de generar datos en el puerto ctr₀ y apaga las válvulas de gas. La GUI principal se advierte en la Figura 4, consta de los siguientes controles/indicadores (enumerados en la Figura 4):

1. **Operador.** Al inicio una ventana pide complementar los campos Nombre y Clave de usuario, son autenticados con una base de datos para autorizar el uso del equipo, el programa se detiene al no coincidir.
2. **Encendido.** Una vez pasado el control de acceso, este indicador se muestra de color verde y comienza la configuración de los puertos de la USB-6259. Para terminar la prueba se debe presionar y un cuadro emergente pide la confirmación de la instrucción, misma que apaga los dispositivos.
3. **Logotipo.** Al presionarlo despliega una ventana con información de la institución colaboradora.
4. **Ayuda.** Activa/desactiva las etiquetas de ayuda mostradas al mover el cursor sobre los controles/indicadores.
5. **Congelar.** Mantiene estática la pantalla de control para evitar su modificación por error.
6. **Esquema.** Sobrepone un diagrama con los voltajes y las corrientes en puntos estratégicos. Los valores provienen de lecturas del osciloscopio, de la fuente de voltaje, de los sensores y/o son calculados.
7. **XLN.** Estos tres controles interactúan vía USB con la fuente XLN10014. Posibilitan habilitar/inhibir la salida de potencia, mientras establecen límites de corriente y voltaje. Cuenta con indicadores que muestran los valores reales de voltaje, corriente y potencia suministrados al reactor.
8. **Push Pull.** Permite modificar los parámetros del control por PWM.
9. **Gases.** Permite modificar las concentraciones y el flujo de gas.
10. **Bitácora.** Guarda en el directorio *C:\Datos DBD*.tdm* los datos de las variables, por intervalos de segundo, minuto u hora. Al finalizar la prueba comprime la carpeta *Datos DBD*, la envía por correo electrónico y elimina el archivo *.zip creado.
11. **RG A.** Abre la interfaz de control y adquisición del PG-250.

Con estas herramientas instaladas se creó un sistema basado en el enfoque GSD (Figura 5) y se prosiguió con una serie experimental, en la que se preparó una mezcla de CAM diluida con He en concentraciones que parten del 0.38 al 13.95 %vol., aplicando voltajes desde la fuente principal de 25 a 55 V (Tabla 4).





Figura 4. Panel principal de la interfaz gráfica de usuario para control del reactor C-DBD₂.

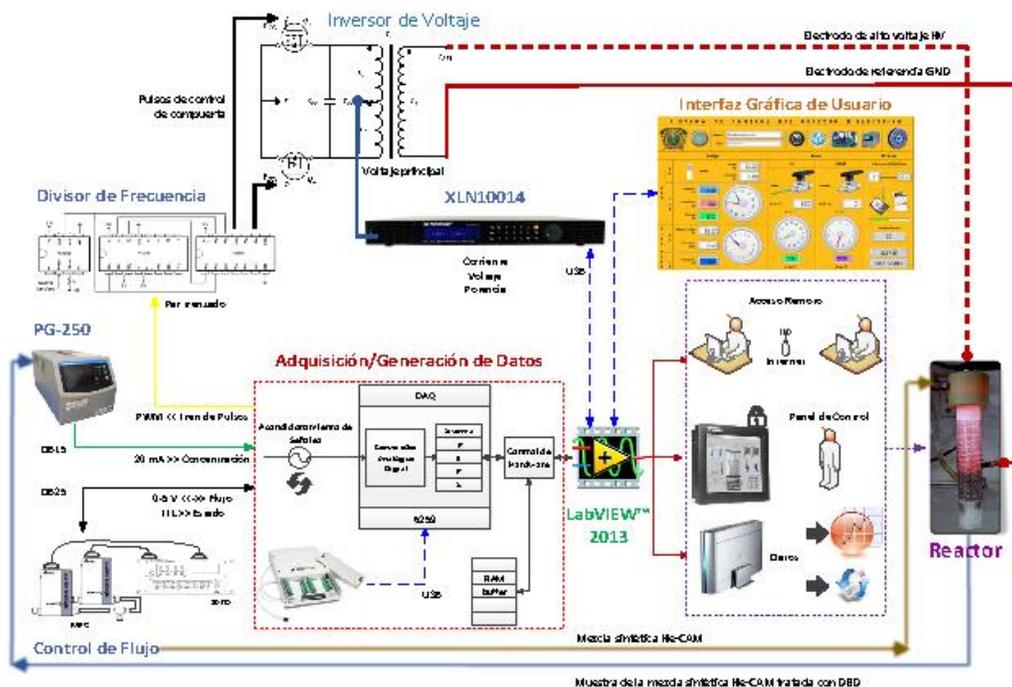


Figura 5. Esquema de la estación virtual de control programada en LabVIEW™ 2013.



3 RESULTADOS

Después de realizar un barrido de frecuencias, se encontró que la transferencia máxima de potencia a las microdescargas se logra con trenes de pulsos de 12 V de amplitud a 41.3 kHz al 25.5% de servicio, si se varían estos dos parámetros el voltaje máximo a la salida del inversor será mayor, sin embargo, las descargas serán inestables y la fase entre la señales de voltaje y corriente incrementa (factor de potencia). Las gráficas de la Figura 6 representan este caso, entre más se alejan los valores f_{PWM} y D_{PWM} de sus ideales es mayor el voltaje de salida pero también el desfase (Figura 6b y 6c). En las gráficas se marcó la Corriente de Resonancia, que corresponde a los procesos de ionización y recombinación. Además, el voltaje visto por los transistores se eleva hasta 4.5 veces el suministrado (Figura 7), cuando idealmente debería ser de 2.6 veces. La potencia de entrada se obtuvo al multiplicar los valores de la corriente y el voltaje obtenidos con la interfaz virtual, mientras que la potencia de salida se calculó mediante la Fórmula de Potencia para Ozonizadores de Manley (1943) a través de un algoritmo en MathCAD®, con la razón de ambas potencias, se obtuvo que el índice de eficiencia del sistema de potencia es en promedio del 0.90, mismo que varía al filamentarse las descargas.

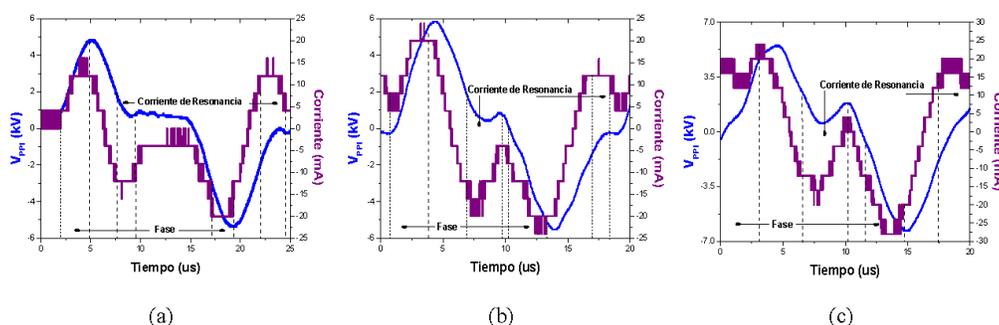


Figura 6. Variación de f_{PWM} y D_{PWM} para determinar la transferencia máxima de potencia. (a) Valores correctos. (b) $f_{PWM} = 56 \text{ kHz}$ y $D_{PWM} = 25.5\%$. (c) $f_{PWM} = 56 \text{ kHz}$ y $D_{PWM} = 20\%$.

Las condiciones mínimas para que inicien las descargas son: He = 1.236 l min⁻¹, $V_{PP} = 19 \text{ V}$, $V_{PPI(pk)} = 1.88 \text{ kV}$ @ 3.7 W; con ello, el sistema puede trabajar en estado estacionario con un flujo reducido de 0.15 l min⁻¹ de He y un consumo de 3.2 W. En la Figura 8 se observan las formas de onda del voltaje aplicado, la corriente y la potencia demandadas; al incrementar gradualmente el flujo decae la corriente y las descargas se extinguen (zona de standby).

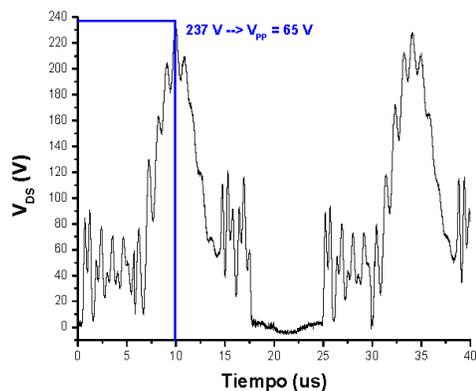


Figura 7. Detección de valores pico para estimar el voltaje máximo de operación del MOSFET.

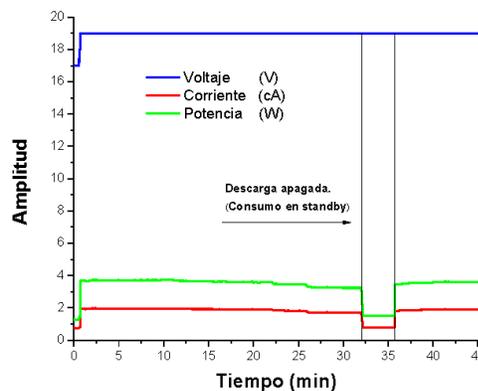


Figura 8. Identificación de las condiciones mínimas de potencia para iniciar las descargas.



Posteriormente se hizo fluir una mezcla de He-CAM a las concentraciones y flujos enlistados en la Tabla 4, con potenciales de 25 a 55 V; cada una de las concentraciones para la fila de 55 V corresponde a los tiempos t_x identificados en la Figura 9, también se entregan los valores de la Densidad Volumétrica de Potencia (DVP: potencia distribuida por unidad de volumen disponible dentro del reactor), y de la Densidad de Energía de Entrada (DEE: cantidad de energía aplicada por volumen de gas). Con ambos conceptos, DVP y DEE, se construye el concepto Valor Fuente que permite visualizar las cantidades de potencia y energía necesarias por unidad de volumen (μm^3 y l) para cada dato de degradación obtenido.

Tabla 4. Datos de Degradación de NO_x Diluido en la Mezcla CAM-He

V_{PP} [V]	DVP [mW μm^{-3}]	DEE [J l ⁻¹]	Flujo Total [l min ⁻¹]	CAM [%vol.]	CI NO_x [ppm]	Degradación [%]
25	141.50	34.42	12.48	0.38	9.00	88.24
	130.83	31.57	12.58	1.14	24.00	40.43
35	290.91	70.77	12.48	0.38	9.00	61.11
	279.64	67.49	12.58	1.14	24.00	55.10
	273.12	65.45	12.67	1.89	39.00	41.03
	273.32	65.24	12.72	2.26	47.50	37.89
	273.72	64.82	12.82	2.99	62.50	34.40
	272.13	64.00	12.91	3.72	80.00	33.13
45	583.79	142.02	12.48	0.38	9.00	70.00
	583.79	140.90	12.58	1.14	24.00	64.00
	570.35	136.67	12.67	1.89	39.00	54.32
	558.50	133.30	12.72	2.26	47.50	48.96
	538.14	127.44	12.82	2.99	62.50	42.97
	522.33	122.84	12.91	3.72	80.00	39.51
	503.56	116.70	13.10	5.13	115.00	35.37
	492.89	112.51	13.30	6.49	148.00	31.42
55	460.67	103.68	13.49	7.82	185.00	23.89
	996.64	240.52	12.58	1.14	24.00	74.07
	994.07	238.20	12.67	1.89	39.00	67.82
	986.56	235.47	12.72	2.26	47.50	64.08
	980.83	232.28	12.82	2.99	62.50	60.29
	967.39	227.50	12.91	3.72	80.00	56.47
	904.55	209.63	13.10	5.13	115.00	49.79
	843.87	192.63	13.30	6.49	148.00	44.81
	801.19	180.31	13.49	7.82	185.00	38.52
	775.69	172.15	13.68	9.12	219.00	33.26
	752.37	164.69	13.87	10.38	248.00	28.97
731.23	156.78	14.16	12.20	287.00	24.35	
661.46	138.98	14.45	13.95	330.00	19.27	

Al aplicar 25 V y hacer fluir He se identifican oscilaciones súbitas de $0 - t_1$ en la gráfica de la potencia (debidas a la corriente, ya que el voltaje se mantiene constante), suavizadas inmediatamente al incluir CAM en 0.38 %vol; en este primer caso se consideraron las muestras de 0.38 y 1.14 %vol. de CAM, que se dejaron trabajar en estado estacionario con un consumo promedio de 7 W. Seguidamente se aumentó la concentración de CAM, la potencia decayó instantáneamente con la consecuente extinción total de las microdescargas. Para el caso de 35 V, se repiten las concentraciones anteriores y se nota un ascenso de la potencia sin que esto refleje un aumento proporcional de degradación.

El procedimiento se repite para 45 y 55 V. En la Figura 9, de $t_1 - t_2$ la rampa de potencia aumenta 8 W y la descarga se vuelve filamental y heterogénea, fenómenos debidos a la elevada DVP y la baja concentración de CAM. En el lapso $t_{11} - t_{13}$ se notan oscilaciones incorporadas en la gráfica, derivadas de la filamantación homogénea de las microdescargas. En t_{12} la CAM está presente al 13.95 %vol. y se eleva a 15.61 %vol., el sistema permanece por un instante hasta que la potencia decae naturalmente en t_{13} . Más allá de esta última concentración, las DBD tienden a ser localizadas dentro del reactor y a extinguirse.



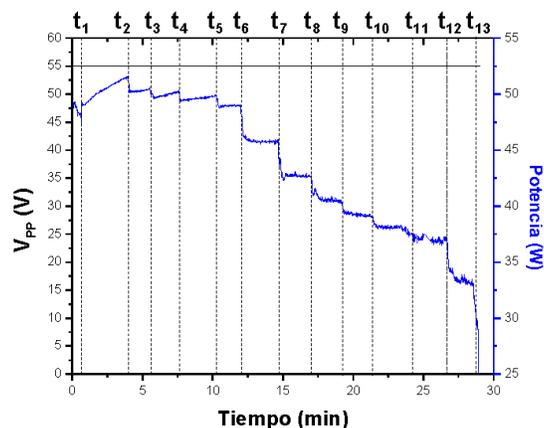


Figura 9. Voltajes máximo (55 V) y potencia aplicados al reactor dieléctrico.

El valor máximo de degradación de NO_x es de 88.24% para una concentración inicial (CI) del 0.38% (9 ppm), en un flujo total de 12.48 l min^{-1} y con $V_{pp} = 25 \text{ V}$ ($\text{DVP}=141.50 \text{ mW } \mu\text{m}^{-3}$ @ $\text{DEE}=34.42 \text{ J l}^{-1}$); este específico no refleja una degradación mayor para $V_{pp} = 35$ y 45 V , a pesar de que la DVP y la DEE se intensifican 2 y 4 veces su valor inicial, respectivamente. Se identifica que el porcentaje de degradación aumenta en cada experimento para la misma muestra conforme se incrementa V_{pp} para flujos mayores a 0.14 l min^{-1} de CAM (1.14 %vol., 24 ppm de NO_x); en estos casos sí es congruente el aumento de la DVP y la DEE. El valor máximo es de 74.07% de degradación cuando $V_{pp} = 55 \text{ V}$; sin embargo, cuando el flujo de CAM es máximo (2.02 l min^{-1}) únicamente alcanza un 19.27%.

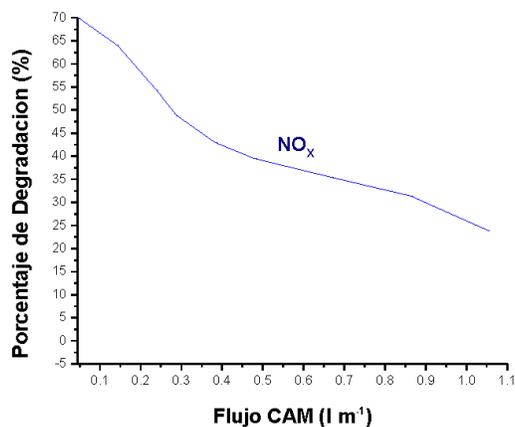


Figura 10. Resultados de las pruebas de degradación de NO_x .

Con lo anterior se culminaron las series de pruebas y se dispuso el equipo para su adecuación y mejoramiento.



4 CONCLUSIONES

Se diseñó y elaboró un sistema de instrumentación y control robustos, basado en el GSD para equipos de plasma frío tipo descargas de barrera dieléctrica para su aplicación en el tratamiento de gases de combustión, en el que se incluyó el acondicionamiento de líneas de suministro de gases, la programación de una interfaz gráfica de usuario, y un inversor con topología *push-pull* de alto voltaje y alta frecuencia.

Fueron identificadas las condiciones idóneas del circuito de control de potencia a 41.3 kHz con 25.5% de ciclo de trabajo, parámetros que permitieron generar una señal senoidal modificada en la etapa de potencia. Fuera de estos parámetros la descarga se vuelve inestable; la modificación del D_{PWM} provoca un cambio directo en la amplitud de salida, mientras que la frecuencia en la capacitancia equivalente del reactor.

Se realizó el estudio de degradación de NO_x diluido en la mezcla sintética CAM 96 Middle Range y helio industrial. Las corridas experimentales arrojaron porcentajes de degradación superiores al 88% para los NO_x . En la bibliografía se han obtenido resultados de degradación >95%, el hecho de estar por debajo de este porcentaje se debe a que en esta investigación se incluye la mezcla CAM, que disminuye la conductividad eléctrica del gas y, por ende, la descarga tiende a filamentarse y a abarcar un volumen menor dentro del reactor, mientras que en los trabajos reportados únicamente se incluye a los NO_x y al gas de acarreo (He o Ar).

La tendencia clara en el tratamiento de los NO_x está encaminada a un descenso en la capacidad del sistema a su degradación con respecto al aumento en la concentración de CAM, acompañada de altos niveles de DVP y DEE para bajas concentraciones, mismos que disminuyen conforme se agrega más CAM a la mezcla hasta las 300 ppm de NO_x . Debe ampliarse el estudio hacia el resto de gases que componen la muestra sintética, para su total entendimiento y empleo posterior en el tratamiento a bordo de gases de escape.

La integración fácil de tecnologías nuevas a la plataforma GSD permite que en futuras mejoras se empleen módulos similares a la serie MQ para sensar gases y un microcontrolador que sustituya a la 6259, con la consecuente reducción de costos a una fracción del precio actual.

5 AGRADECIMIENTOS

Los Autores agradecen a Alfonso Salazar, Fidel Ramos, Gustavo Soria, Mario Ibáñez, Miguel Durán, Miguel García y Moisés García por su soporte técnico en el Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas, al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares por las facilidades y recursos proporcionados para la realización del trabajo, y al Conacyt por la beca otorgada (CVU/Becario: 412287/258202).

REFERENCIAS

- Becker KH. En: Bonitz M., Horing N., Ludwing P., Eds. Introduction to Complex Plasmas. Berlin: Springer 2010: pp. 367-394.
- Bishop, R. H. (2007). Mechatronic System Control, Logic, and Data Acquisition. The Mechatronics Handbook, Second Edition. CRC Press, ISBN 9781420009026.
- Conrads H., Schmidt M. Plasma Generation and Plasma Sources. Plasma Sources Science and Technology 2000; 9(4): 441.
- Estrada N., *et al.* (2011). Chemical and Electrical Diagnosis of Two Configurations of Dielectric Barrier Discharges Applied to Nitric Oxides Degradation. Superficies y Vacío, DOI: ND.
- Ferroxcube (2013, 3 de enero). U126/91/20. U, I Cores and Accessories, Datasheet. Recuperado de <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/u1269120.pdf>.
- Fridman, A. (2008). Plasma Chemistry. Cambridge University Press, ISBN 9780511398575.
- Gottschalk, C., *et al.* (2010). Ozonation of Water and Waste Water. A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications. Wiley, ISBN 9783527319626.
- Jiménez, G., *et al.* (2012). Instrumenting and Programming a Virtual Instrument for an Open Loop System to Control Gliding Centrifugal Thermal Plasma. 9th CCE, DOI: 10.1109/ICEEE.2012.6421110.
- Kogelschatz, U. (2003). Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. Plasma Chemistry and Plasma Processing, DOI: 10.1023/A:1022470901385.
- Kunhardt, E. E. (2000). Generation of Large-Volume, Atmospheric-Pressure, Nonequilibrium Plasmas. IEEE Transactions on Plasma Science, DOI: 10.1109/27.842901.



- Manley, T. C. (1943). The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, DOI: 10.1149/1.3071556.
- Meichsner, J. (2010). Nonthermal Reactive Plasmas. Chapter 11, 267-298. En: Bonitz, M., *et al.* (Eds.). *Introduction to Complex Plasmas*. Springer, ISBN 9783642105913.
- MKS (2013, 3 de enero). MKS Type 247D Four-Channel Readout, Instruction Manual. Recuperado de www.mksinst.com/docs/R/247Dman.pdf.
- MKS (2013, 3 de enero). MKS Type M100B Mass-Flo Controller and M10B Mass-Flo Meter, Instruction Manual. Recuperado de www.mksinst.com/docs/R/M100B-M10MBman.pdf.
- NI (2013, 5 de febrero). NI 625x Specifications. Recuperado de www.ni.com/pdf/manuals/371291h.pdf.
- Omega (2013, 3 de enero). FMA-A2100's, FMA-A2300's Massflow Meters, User's Manual. Recuperado de www.omega.com/Manuals/manualpdf/M2842.pdf.
- Pacheco, M. J., et al. (2008). Application of Non-Thermal Plasma on Gas Cleansing. *Physica Scripta*, DOI: 10.1088/0031-8949/2008/T131/014017.
- Pacheco, M., *et al.* (2012). Removal of Main Exhaust Gases of Vehicles by a Double Dielectric Barrier Discharge. 14th LAWPP, DOI: 10.1088/1742-6596/370/1/012023.
- Pacheco, M. J., et al. (2013). Tratamiento de Emisiones de Motores Diesel por Plasma Fuera de Equilibrio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, DOI: ND.
- Penetrante, B. M., *et al.* (2002). Plasma-Assisted Catalytic Storage Reduction System. Patente, US6038853 A.
- Roth, J. R. (1995). *Industrial Plasma Engineering. Volume 1: Principles*. Institute of Physics Publishing, ISBN 0750303174.

6 RESEÑA DE LOS AUTORES

Gerardo Jiménez Aviles. Adscrito a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México, Casa de Estudios donde obtuvo el título de Ingeniero en Electrónica en 2011 y en 2013 concluyó sus estudios de Maestría en Ciencias Ambientales. Su área de interés se encuentra en las aplicaciones del GSD y del plasma con nanomateriales (ambiental y medicina). Ha recibido reconocimientos en el trabajo de su breve trayectoria profesional, por parte del Cinvestav, de la transnacional National Instruments y del Gobierno del Estado de México. Actualmente está a cargo de la Sociedad Civil Che Tuumben, de la que es socio fundador.

Ricardo Valdivia Barrientos. Nació en Toluca, México, el 21 de mayo de 1979. Recibió su título de Ingeniería electrónica por el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT), Toluca, México, en 2003, donde actualmente se encuentra cursando el doctorado grado en ingeniería electrónica. Ha estado involucrado en el desarrollo de sistemas de suministro de energía y dispositivos asociados a las fuentes de plasma en el Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Ciudad de México.

Arturo Colín Cruz. Adscrito a la Facultad de Química de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). En 2007 obtuvo el grado de doctor en el programa de posgrado en Ingeniería de la UAEM. Actualmente es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel I, Con Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento "Prevención, Control y Efectos de la Contaminación Ambiental", en investigación cuenta con 17 proyectos realizados con financiamiento UAEM, CONACYT y otros Organismos nacionales e internacionales y ha recibido reconocimientos dentro de su trayectoria profesional, tal como la Medalla de la Academia Nacional de Ciencias Ambientales como miembro fundador en 2004.

Marquidia Pacheco Pacheco. Nació en la Ciudad de México, México, el 12 de diciembre de 1974. Recibió el título de Ingeniería química en el Instituto Tecnológico de Toluca, Toluca, México, en 1996, y los grados de M.Sc. y Ph.D. en Física e Ingeniería de Plasmas por la Universidad Paul Sabatier de Toulouse, Toulouse, Francia, en 1998 y 2003, respectivamente. Se unió al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Ciudad de México, en 2003, donde trabaja en la aplicación de nuevas tecnologías para el tratamiento de la contaminación del aire y de nuevos materiales. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores.

Joel O. Pacheco Sotelo. Recibió el título de Ingeniero industrial en electrónica y el grado de Maestro en electrónica de potencia por el Instituto de Tecnología de Chihuahua, Chihuahua, México, en 1974 y 1983, respectivamente, y el Ph.D. en el Instituto Politécnico de Toulouse, Toulouse, Francia, en 1993. Desde 1974, ha estado adscrito al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Ciudad de México, donde ha trabajado en investigaciones relacionadas con plasmas térmicos y no térmicos, y en el control de la contaminación. Desde 1995, ha sido responsable del Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas, ININ. Es miembro del Sistema de Nacional de Investigadores desde 1989.



B.2 Estancia de Investigación en *École Polytechnique*, Francia

(Clic izquierdo sobre la imagen para seguir el vínculo)



Palaiseau, July the 30th, 2013

Dr. Leobardo Manuel Gómez Oliván

Mexico State Autonomous University
Instituto Literario # 100. Downtown. ZIP.: 50000
Toluca. Mexico State

I inform that your Master student in Environmental Sciences, **Gerardo Jiménez Aviles** (ID: 0520415), was part of the **Programme de Stages pour Etudiants Internationaux** at the **Laboratoire de Physique des Plasmas – UMR 7648 CNRS - École Polytechnique** (LPP), Palaiseau, France, from **May the 2nd to July the 30th**, 2013. During this internship, he was supported by my supervision and the co-direction of the M.Sc, Christelle Barakat. All along this period, the *École Polytechnique* provided the necessary materials, laboratory/office space and administrative support.

Mr. Jiménez Aviles worked in the project: **Experimental Study of Surface Reactivity Under Air Plasma Exposure for Development of Air Treatment Devices**; which is performed in the frame of our group research *Plasma Froids*, concerning air processing by plasma/catalyst coupling.

I have no doubt that this internship will be a great beginning of a fruitful collaboration between our Institute, the Mexico State Autonomous University and the Mexican Institute for Nuclear Research.

If you have any further questions about his visit, please feel free to contact me by email (olivier.guaitella@lpp.polytechnique.fr) or by phone (+33 169 33 59 48).

Sincerely,

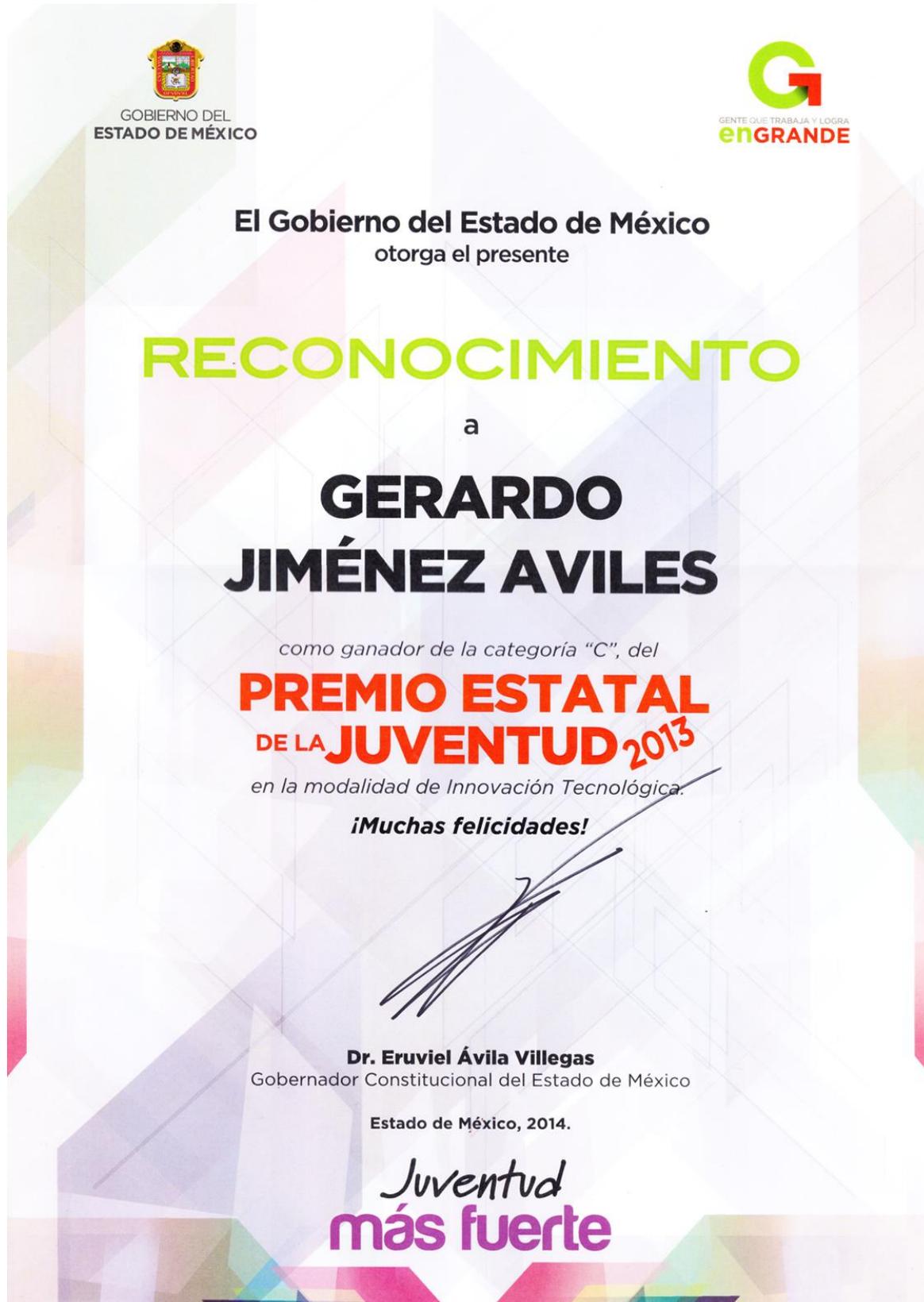
Dr. Olivier Guaitella

Researcher
Laboratoire de Physique des Plasmas
Ecole Polytechnique
F-91128 Palaiseau Cedex
France



B.3 Premio Estatal de la Juventud 2013, Modalidad Innovación Tecnológica

(Clic izquierdo sobre la imagen para seguir el vínculo)



B.4 Primer Lugar del Reto Académico, Ingeniería para un Mundo Mejor, de National Instruments

(Clic izquierdo sobre las imágenes para seguir el vínculo)



**National Instruments
otorga el presente reconocimiento a:**

Gerardo Jiménez Aviles

**Primer Lugar en la Categoría “Ingeniería para un Mundo Mejor”
del Concurso Reto Académico NI**

**Salvador Mikel Mastache
Gerente del Programa Académico**



México, D.F. a 14 de Noviembre, 2013

B.5 Presentación de la Interfaz KaVi_v. 2. 04 en Academic Days



National Instruments de México
otorga el presente reconocimiento a:

Gerardo Jiménez

por su participación como ponente en el evento:
NI Academic Days 2014

Ing. Juan Carlos Castillo
Gerente General de National Instruments México

Aguascalientes, Ags. a 13 de Mayo del 2014



B.6 Exposición del Protocolo de Investigación en el Congreso de Ciencias Ambientales del ANCA

ANCA
La Academia Nacional de Ciencias Ambientales
y La Universidad Autónoma Indígena de México
Institución Intercultural del Estado de Sinaloa

Otorga la presente

CONSTANCIA

A: **Gerardo Jiménez-Aviles, Ricardo Valdivia-Barrientos, Marquidia Pacheco-Pacheco, Joel Pacheco-Sotelo, Elvia Alva-Rojas, Arturo Colín-Cruz**

Por su participación con la ponencia: "Degradación de gases tóxicos provenientes de motores de combustión interna mediante tecnología de plasma frío", en la modalidad cartel, llevada a cabo en el XI Congreso Internacional y XVII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales: "Cuidar el planeta es tarea de todos", los días 5, 6 y 7 de Junio, en el Mazatlán International Center.

XI CONGRESO INTERNACIONAL Y XVII CONGRESO NACIONAL DE CIENCIAS AMBIENTALES
Mazatlán, Sinaloa, México, a 7 de Junio de 2012.
"Cuidar el planeta es tarea de todos"

Dra. María Guadalupe Ibarra Coceña
Coordinadora General

Dr. Gustavo Enrique Rojo Martínez
Coordinador del Comité Científico



ANEXO C. VIDEOS E IMÁGENES DEL PROTOTIPO

VIDEO 1

Video 1. Elaboración del circuito impreso.

VIDEO 2

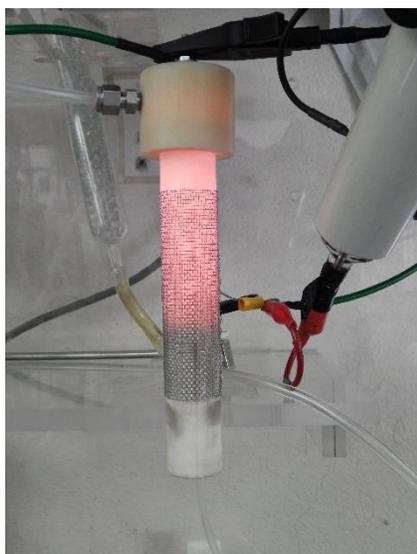
Video 2. Descargas de barrera dieléctrica en el reactor $C - DBD_2^A$.



VIDEO 3

Video 3. Descargas de barrera dieléctrica en el reactor $C - DBD_2^B$.

(Clic izquierdo sobre alguna imagen para redireccionar al presentador de fotografías)



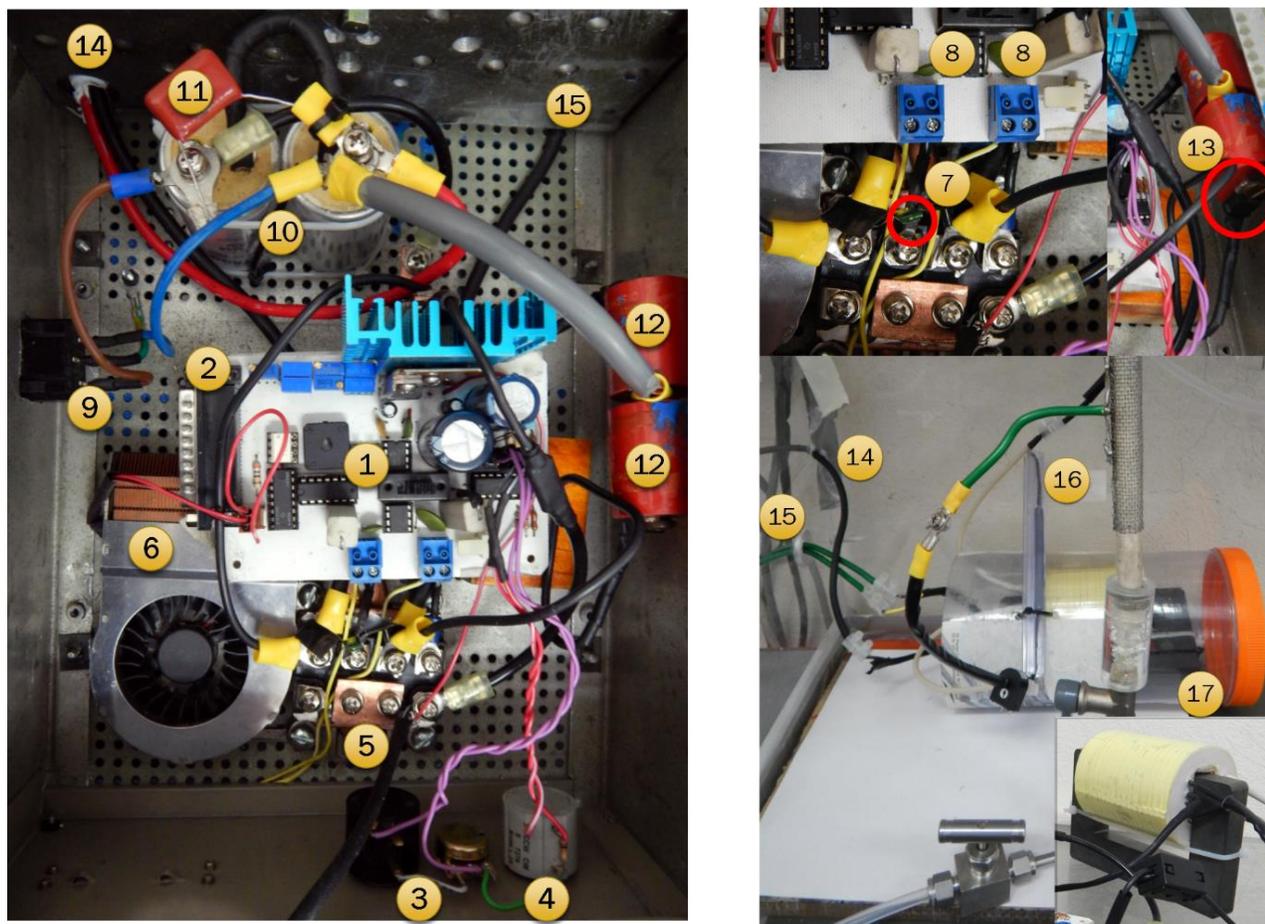
Descargas de barrera dieléctrica sostenidas en el reactor $C - DBD_2^A$.



Descargas de barrera dieléctrica generadas a partir de helio.



Sistema de generación de descargas de barrera dieléctrica.



Circuitos ensamblados para las etapas de control y potencia del PPI.

En el circuito de control se incluye una fuente lineal de 15 V por rectificación completa, que posteriormente es reducida a 5 V; un oscilador con el TL594; dos TC4422 para control de las compuertas; un interruptor mecánico que selecciona la fuente de oscilación; un optoacoplador TLP250 conectado a un divisor de frecuencia integrado por un *flip-flop* JK 7476 y una compuerta AND 7408; finalmente, un puerto DB₂₅ que se conecta a una resistencia de 390 Ω en serie con la entrada del TLP250 y a un banco de potenciómetros. En la etapa de potencia los elementos fueron cableados directamente y en las fotografías anteriores se han etiquetado así:

1. PCB de la etapa de control.
2. Puerto DB₂₅ para instrumentación virtual.
3. Potenciómetro R_T para ajustar f_{PWM} (son dos potenciómetros que suman 500 k Ω , uno para ajuste grueso y otro para ajuste fino).
4. Potenciómetro R_{DT} para ajustar D_{PWM} .
5. Par de MOSFET IXFN 80N50 sobre una base de cobre.
6. Ventilador para disipación del calor.
7. Condensador C_{pp} de 3.2 nF (dentro del círculo rojo).
8. Resistencias cerámicas de potencia de 4.7 Ω para protección de compuertas de los MOSFET.
9. Conexión de entrada de la fuente XLN10014 que proporciona V_{pp} .
10. Par de condensadores electrolíticos de 50 V en serie, con capacitancia total de 5 mF.
11. Capacitor de poliéster de 100 nF, que en paralelo a **10** forman C_{BUS} .
12. Capacitores de rodamiento libre C_{fw} de 500 pF.
13. Diodo de rodamiento libre D_{fw} STPR1620CT (dentro del círculo rojo). El otro diodo se encuentra en el lado posterior junto al otro C_{fw} .
14. Conexión de V_{pp} a la derivación central de T_{pp} .
15. Conexión entre la terminal D de los transistores y los devanados primarios del T_{pp} .
16. Resistencia de descarga R_{pp} .
17. Transformador de alto voltaje T_{pp} .

ANEXO D. ALGORITMO EN MATHCAD® PARA EL MÉTODO DE MANLEY

Mathcad - [Método de Manley]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Normal Arial 10 B I U

My Site Go

$C_m := 1000 \text{ pF}$
 $f := 66680 \text{ Hz}$

Trace 1 : Tension en entrée
 Trace 2 : Signal du GBF
 Trace 3 : Tension aux bornes du condensateur Cm

Trace1 := ...\\F0000CH1.CSV
 Trace3 := ...\\F0000CH2.CSV

$U_a := \text{diviseur}(\text{Trace1}, 1)$
 Tension appliquée
 $\max(U_a) = 4.16 \times 10^3$

$U_m := \text{diviseur}(\text{Trace3}, 1)$
 Tension aux bornes du condensateur Cm

Fonction utile si le vecteur initial contient trop de points. Permet de créer un vecteur qui ne contient que 1 point sur x)

$\text{diviseur}(M, x) :=$

$$\begin{cases} n \leftarrow \text{rows}(M) \\ n_{\max} \leftarrow n - \text{mod}(n, x) \\ \text{pas} \leftarrow \frac{n_{\max}}{x} \\ \text{for } i \in 0.. \text{pas} - 1 \\ \quad \begin{cases} M_{i,0} \leftarrow M_{i,x,0} \\ M_{i,1} \leftarrow M_{i,x,1} \end{cases} \\ M_i \end{cases}$$

calcul frequency

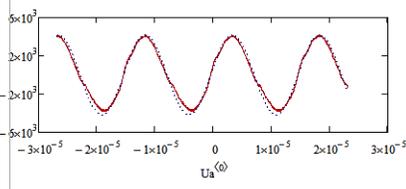
$U_0 := \max(U_a) = 4.16 \times 10^3 \text{ V}$
 $f_0 := 66680$
 $\text{phi0} := 0$

Given

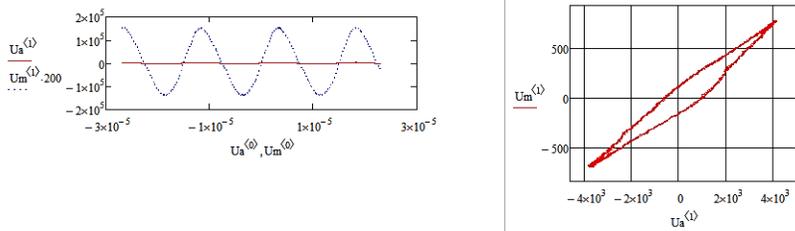
$0 = U_a^{(1)} - \text{sinus}(U_a^{(0)}, U_0, f_0, \text{phi0})$
 $\begin{pmatrix} f_0a \\ \text{phi0a} \end{pmatrix} = \text{Minerr}(f_0, \text{phi0})$

$\text{Frequency} := f_0a = 6.679 \times 10^4 \text{ Hz}$

$\text{sinus}(t, U, f, \text{phi}) := U \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \text{phi})$



calcul frequency



(Egalisation de la taille des vecteurs)

Obtention de Qm et Udbd

$Q_m^{(0)} := U_m^{(0)}$
 $U_{dbd}^{(0)} := U_a^{(0)}$

$Q_m^{(1)} := U_m^{(1)} \cdot C_m$
 $U_{dbd}^{(1)} := U_a^{(1)} - U_m^{(1)}$

Fonction qui détermine la tension quand l'écart est maximal entre Ua et Um

$U_{\text{peak}} :=$

$$\begin{cases} \max \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0.. \text{rows}(U_a) - 1 \\ \quad \max \leftarrow |U_{dbd_{i,1}}| \text{ if } |U_{dbd_{i,1}}| > \max \\ \max \end{cases}$$

$U_{\text{peak}} = 3.392 \times 10^3 \text{ V}$

Valeurs d'entrée approximative pour arriver rapidement à la solution et éviter de tomber sur un minimum secondaire
 $\text{pente_faible} := 0.1$
 $\text{pente_forte} := 2$
 $\text{point_inflexion_1} := 4000$
 $\text{point_inflexion_2} := -2000$



Mathcad - [Método de Manley]

File Edit View Insert Format Tools Symbolics Window Help

Calcul des paramètres pour Manley (Umax,Umin,penes etc...)

Qm (pC)

Udbd (V)

- Données1
- Manley1
- Données2
- Manley2
- ++ M
- ++ N

$$\begin{pmatrix} MM \\ NN \\ aa \\ cc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \times 10^3 \\ 1.076 \times 10^5 \\ 194.939 \\ 231.386 \end{pmatrix}$$

transferred charges (nC)

U_{max} (kV)

(X_{0n}, Y_{0n}) (X_{0p}, Y_{0p}) (X_{min}, Y_{min}) (X_{max}, Y_{max})

Exploitation Manley

Valeur de Udbd à laquelle le cycle coupe l'axe des abscisse

xx := 1000 xxx := -1000

Given

Manleyinf(xx, MM, aa, cc) = 0

X0pmanley := Fnd(xx)

Given

Manleysup(xxx, MM, aa, cc) = 0

X0nmanley := Fnd(xxx)

p1 := aa

p2 := cc

AA := X0pmanley - X0nmanley

BB := aa (Xmax - NN)

$Cg := (p2 - p1) \frac{(AA \cdot p2 + BB) \cdot BB}{(AA \cdot p2)^2}$

$Cdie := (p2 - p1) \frac{AA \cdot p2 + BB}{AA \cdot p2}$

Cstray := p2 - Cdie

$Ub := \frac{BB}{2 \cdot Cg}$

$Pinj := 4 \cdot f \cdot Ub \cdot [(Cdie + Cstray) \cdot Upeak - (Cdie + Cg) \cdot Ub] \cdot 10^{-12}$

Ub = -10.987 V

Cg = 9.243 × 10⁵ pF

Cdie = -5.786 × 10⁵ pF

Cstray = 6.017 × 10³ pF

Pinj = -31.872 W

Upeak = 3.392 × 10³ V

Intégration numérique de la figure de Lissajou

Puissance calculée par intégration sur le cycle

Pinjectée = 97.7646 W





GLOSARIO



Aerosol inorgánico. Coloide de partículas inorgánicas sólidas o líquidas suspendidas en un gas.

Ánodo. Electrodo en el que se produce oxidación, mediante la cual un material pierde electrones.

Antropogénico. Procesos o productos humanos.

Apoptosis. Muerte celular programada con el fin de autocontrolar su crecimiento.

Biodisponible. Capacidad de una sustancia de ser absorbida y utilizada por un organismo.

Broncoconstricción. Estrechamiento de las vías aéreas que disminuye o bloquea el flujo de aire.

CAD-CAM. Diseño y fabricación de herramientas asistidos por computadora.

Calor específico. Magnitud física que describe la cantidad de calor a suministrar por unidad de masa para elevar su temperatura en una unidad.

Cámara anecóica. Sala que absorbe las reflexiones producidas por ondas acústicas o electromagnéticas.

Cambio climático. Modificación global o regional del clima con respecto a su historial.

Campo eléctrico. Campo vectorial en el cual una carga eléctrica puntual sufre los efectos de una fuerza eléctrica.

Captura disociativa. Proceso que engloba a una molécula múltiplemente protonada que interactúa con un electrón libre para dar lugar a un ion con un número impar de electrones.

Carbohidrato. Molécula compuesta por carbono, hidrógeno y oxígeno, cuya función principal es prestar energía inmediata y estructural a un organismo (*vgr.*: la glucosa).

Carboxihemoglobina (COHb). Proteína de la sangre unida a monóxido de carbono; elimina la captación de oxígeno.

Catálisis. Proceso que aumenta la velocidad de una reacción, debido a la participación de una sustancia (catalizador).

Cátodo. Electrodo en el que se produce reducción, mediante la cual un material recibe electrones.

Celda de combustible. Dispositivo electroquímico que genera corriente eléctrica de forma ininterrumpida desde un flujo continuo de combustible oxidante.

Cianobacteria. Microorganismo sin núcleo celular (bacteria) capaz de realizar fotosíntesis oxigénica, en la que el agua es el donante primario de electrones.

Ciclo biogeoquímico. Proceso de producción y descomposición de elementos químicos y/o moléculas entre los seres vivos y el ambiente.

CNC. Máquina de control numérico por computadora, automatizada para la elaboración de herramientas.

Cólera. Enfermedad intestinal infecciosa, contagiosa y aguda que produce diarrea.

Coliforme. Grupo de bacterias patógenas que indican la contaminación de agua y alimentos.

Combustible fósil. Material capaz de liberar energía a partir de biomasa con contenido energético alto.

Compuesto halogenado. Molécula que contiene en su estructura elementos del grupo 17 de la tabla periódica.

Conductividad. Medida de la capacidad de un material para dejar circular la corriente eléctrica libremente.



Congestión pulmonar. Acumulación de líquido en los pulmones, que da lugar a deterioro del intercambio gaseoso.

Conmutación a cero voltaje. Cambio no disipativo en un convertidor, caracterizado porque la tensión sobre el interruptor es nula en ese instante.

Contaminante inorgánico. Sustancia que modifica un ambiente, caracterizada por carecer de átomos de carbono.

Descarga corona. Descarga a presión atmosférica acumulada en lugares puntiagudos, filos o cables delgados.

Deposición de película fina. Colocación sobre una superficie de una lámina de material con espesor de 100 nm a 300 µm.

Disociación. Separación reversible de moléculas en compuestos más pequeños.

Edema pulmonar. Acumulación anormal de líquido en los pulmones, se presenta en forma de hinchazón.

Emisión. Introducción de sustancias, o energía en un medio, que provocan que éste sea inseguro o no apto.

Enlace polar. Enlace en el que los átomos tienen diferentes electronegatividades y, como resultado, uno de ellos tiene mayor fuerza de atracción.

Estratosfera. Capas de la atmósfera situada entre la troposfera y la mesosfera. Se extiende hasta 50 km de altura.

EXCELLON y GERBER_RS274X. Fichero de tipo Gerber que contiene la información necesaria para la fabricación de placas de circuito impreso, pistas y orificios.

Exosfera. Capa de la atmósfera en la que los gases se dispersan gradualmente hasta que la composición es similar a la del espacio exterior. Es la capa menos densa y su ubicación comienza a los 500 km snm.

Exposición de corto plazo o aguda. Proximidad y/o contacto con una fuente de materia o energía, durante periodos <15 min en pocos intervalos durante un día.

Exposición de largo plazo o crónica. Proximidad y/o contacto con una fuente de materia o energía, durante un periodo largo o una fracción significativa del tiempo de vida.

Factor de potencia. Relación entre la potencia activa y la aparente para medir la capacidad de una carga de absorber potencia activa.

Ferrita. Estructura cristalina del hierro que, aleada con níquel, zinc o manganeso, elimina las Corrientes de Foucault.

Flujo magnético. Medida de la cantidad de magnetismo sobre una superficie.

Fotón. Partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética.

Frecuencia de línea. Se refiere a las oscilaciones del voltaje en instalaciones eléctricas. 50 o 60 Hz, dependiendo de la ubicación.

Gas plasmógeno. Compuesto en fase gaseosa a partir del cual se genera un plasma.

Gasolinas. Mezcla de hidrocarburos obtenida del petróleo. Se utilizan como combustible en motores, estufas, lámparas, en la limpieza con solventes y otras aplicaciones.

Glóbulo. Célula de la sangre encargada de defender el organismo de infecciones (leucocito) o de transportar el oxígeno a todas las partes del cuerpo (eritrocito).

Gobierno y Economía Verdes. Conjunto de modelos de producción, gestión y administración públicas, integrales e incluyentes, basadas en el desarrollo sostenible.

Hidrofluorocarbono. Compuesto de hidrógeno y flúor, utilizado para sustituir a algunos halógenos.

Histéresis. Tendencia de un material a conservar una de sus propiedades en ausencia del estímulo que la generó.

Inductancia de fuga. Oposición a un cambio de corriente medida entre dos bobinas.

Inversión térmica. Fenómeno que sucede cuando el aire que está en contacto con el suelo posee una temperatura menor que el aire más arriba (por lo que se vuelve más denso y pesado), misma que actúa como cubierta e impide su movimiento; aumenta progresivamente los contaminantes.

Inversor de medio puente. Convertidor de señal CD-CA que emplea 2 transistores.

Inversor de puente completo. Convertidor de señal CD-CA que emplea 4 transistores.

Ionización disociativa. Proceso en el que una molécula estable libera electrones para quedar polarizada.

Lisis celular. Proceso de ruptura de la membrana celular que produce la salida del material intracelular.

Lixiviación. Proceso en el que un solvente pasa a través de un material pulverizado para diluir sus componentes solubles.

Longitud de onda. Distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo.

Melanoma. Nombre genérico de los tumores pigmentados. Variedad de cáncer de piel.

Mesosfera. Es la zona más fría de la atmósfera (hasta 180 K), situada encima de la estratosfera y debajo de la ionosfera.

Metahemoglobina. Proteína de la sangre con enorme afinidad por el oxígeno y no lo cede en los tejidos.

Metano. Sustancia no polar, incolora, inodora e insoluble en agua. Se produce de la putrefacción anaeróbica de las plantas.

Molécula lineal. Compuesto químico cuyos átomos están dispuestos en enlaces de 180°.

Molécula no polar. Compuesto químico con átomos de electronegatividad igual.

Transistor MOSFET. Dispositivo electrónico de efecto de campo utilizado para amplificar o conmutar señales.

Motor alternativo o de pistón. Dispositivo mecánico que utiliza la presión en un fluido para mover uno o más pistones y generar movimiento de rotación.



Oscilador. Sistema capaz de crear perturbaciones periódicas.

PIB. Producto interno bruto. Magnitud que expresa el valor monetario de la producción de bienes y servicios de un país durante un periodo determinado.

Perfluorocarbono. Derivado de hidrocarburo con átomos de flúor en lugar de hidrógeno.

Permeabilidad. Capacidad de un material para permitir que un flujo (magnético en este caso) lo atraviese sin alterar su estructura interna.

Permitividad. Constante física que describe cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio.

Plugin. Aplicación de software que se relaciona con otra para aportar una función nueva y muy específica.

Propulsión espacial. Tecnología capaz de impulsar una nave por el espacio.

Reactancia capacitiva. Oposición de los condensadores al paso de la corriente alterna.

Reactor nuclear. Dispositivo en donde se produce una transformación de partículas sub-atómicas y núcleos atómicos, que se sostiene en el tiempo de forma controlada.

Relación estequiométrica. Relación cuantitativa entre los reactivos y productos en una reacción química.

Resistencia de las vías respiratorias. Limitación del acceso del aire inspirado a los pulmones.

Resonancia. Fenómeno producido en un circuito cuando los elementos reactivos se representan como una resistencia pura.

Revolución Industrial. Proceso histórico de transformación económica, social y tecnológica, iniciado en la segunda mitad del siglo XVIII en Gran Bretaña.

Revolución Verde. Incremento de la productividad agrícola ocurrido entre 1940 y 1970, en Estados Unidos. Consistió en utilizar variedades mejoradas de granos; una sola especie en un terreno durante todo el año (monocultivo), y la aplicación de grandes cantidades de agua, fertilizantes y plaguicidas.

Rodamiento libre. Circuito que permite la circulación de corriente como forma de protección al transistor.

Termosfera o ionosfera. Parte de la atmósfera que está ionizada debido a la fotoionización que provoca la radiación solar. Se extiende entre 80 y 500 km snm.

Tiempos del motor.

- Admisión, el pistón aspira la mezcla aire-combustible.
- Compresión, comprime la mezcla dentro del pistón.
- Combustión, se da la quema del combustible y expande los gases que empujan el pistón.
- Expulsión, el pistón genera movimiento mecánico.

Tifus. Enfermedad infecciosa producida por bacterias, se caracteriza por fiebre alta y recurrente, escalofríos, cefalea y erupciones cutáneas.

Toolkit. Software adicional que requiere LabVIEW™ para realizar instrucciones específicas.

Totem pole. Circuito eléctrico formado por dos transistores que se activan de forma excluyente.

Toxicología. Ciencia que identifica, estudia y describe, la dosis, la naturaleza, la incidencia, la severidad, la reversibilidad y, generalmente, los mecanismos de los efectos que dañan el organismo del ser humano.

Ultracapacitor. Dispositivo electroquímico capaz de almacenar una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores normales.

Urea. Químico cristalino e incoloro. Producto principal del metabolismo de proteínas en los mamíferos (orina y heces).

UV. Radiación electromagnética con longitud de onda entre 400 y 15 nm.

Volumen tidal. Cantidad de aire inspirado o espirado en cada respiración.



