



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

Jiménez-Aviles Gerardo

Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Química

Departamento de Posgrado

Correo: gerjimav@gmail.com

Valdivia-Barrientos Ricardo

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Departamento de Estudios del Ambiente

Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas

Correo: ricardo.valdivia@inin.gob.mx

Colín-Cruz Arturo

Universidad Autónoma del Estado de México

Facultad de Química

Departamento de Posgrado

Correo: acolinc@uaemex.mx

Pacheco-Pacheco Marquidia

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Departamento de Estudios del Ambiente

Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas

Correo: marquidia.pacheco@inin.gob.mx

Pacheco-Sotelo Joel

Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares

Departamento de Estudios del Ambiente

Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas

Correo: joel.pacheco@inin.gob.mx

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, graphical system design*) para conjuntar eficientemente una interfaz gráfica de usuario (*GUI, graphical user interface*), la tarjeta de adquisición de datos DAQ-6259 con canal de comunicación USB, una fuente de voltaje commutado *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 (vgz.: 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 a 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.

Descriptores: 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.

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 se domina 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 con el 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 (fojos, 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 del 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 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 O₃ 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 (NO₂), y una fase de reducción y almacenamiento (catalizador), que convierte el NO₂ a nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂), hidrógeno (H₂) 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 O₃), 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 GSD, de un reactor para DBD aplicado al tratamiento de NO_x.

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 inefficientes 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). En (tabla 1) X₂ representa las moléculas diatómicas, X átomos, X₂⁺ moléculas diatómicas que ceden electrón, X₂⁻ moléculas diatómicas que

Tabla 1. Reacciones en la Región Activa del NTP

Ionización	X ₂ + e ⁻	→ X ₂ ⁺ + 2e ⁻
Captura de electrones	X ₂ + e ⁻	→ X ₂ ⁻
Captura disociativa de electrones	X ₂ + e ⁻	→ X ⁻ + X
Disociación	X ₂ + e ⁻	→ X + X + e ⁻
Excitación	X ₂ + e ⁻	→ X ₂ [*] + e ⁻
Ionización disociativa	X ₂ + e ⁻	→ X ⁺ + X + 2e ⁻
Liberación de electrones	X ₂ ⁻ + 2e ⁻	→ X ₂ + 2e ⁻
Recombinación	X ₂ ⁺ + 2e ⁻	→ X ₂

Datos extraídos de Meichsner (2010)

ganar electrón, X⁻ átomo que gana electrón, X⁺ átomo que cede electrón X₂⁻ y moléculas diatómicas excitadas.

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).

Pacheco *et al.* (2008; 2012; 2013) reportan investigaciones teórico-experimentales de tratamiento para gases de combustión mediante DBD y se puntualiza 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, logrando obtener valores de remoción de 99.74% y 96.66% para niveles de concentración inicial de NO_x de 50 y 300 ppm, respectivamente.

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).

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 (*commercial 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 GUI de un instrumento virtual (*VI, virtual instrument*);

- 2) La tarjeta de adquisición de datos reconfigurable NI USB-6259 M Series.
- 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.

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 ($C\text{-DBD}_2$) elaborado de alúmina, el suministro de gas se llevó a cabo 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 snm, con una presión atmosférica de 73.97 kPa y temperatura promedio de 294 K.

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 controladoras de flujo másico (*MFC, mass flow controller*), una MKS™ MFC-M1000B (MFC_1) para la CAM, y una Omega™ FMA-A2315 (MFC_2) para el gas de aporte, en este caso el He; ambas válvulas fueron conectadas a un controlador MKS™ 247D. Debido a que los *MFC* se encuentran 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%.

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

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

$$Flujo_{CAM} = (GCF_{CAM})(Flujo_{N2}) \quad (3)$$

$$Flujo_{He} = 1.454 Flujo_{N2} \quad (4)$$

donde

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

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).

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

Tabla 2. Flujos y concentraciones máximos para la mezcla gaseosa

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	-	-

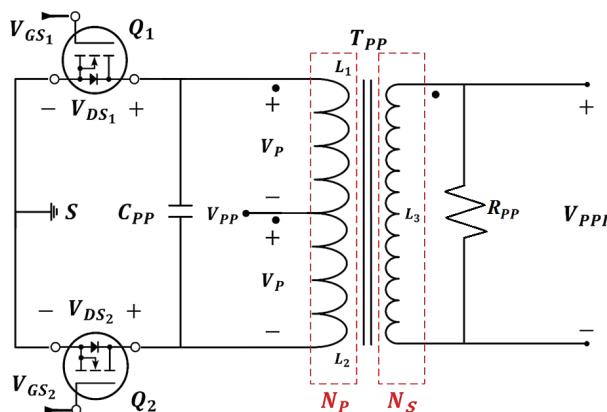


Figura 1. Circuito eléctrico del inversor push-pull

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, donde 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, solo 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).

En el diagrama eléctrico del PPI se ubican los MOSFET Q₁ y Q₂, matrizula IXFN80N50 (V_{DS(MÁX)} = 500 V, I_{DS(MÁX)} = 80 A y R_{DS(MÁX)} = 55 mΩ), 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

L₁, L₂ (ambas de 320 μH) y L₃ (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_{UPP} = 48 cm, A_{UPP} = 5.6 cm² y μ_{PP} = 2050, con un peso de 1.36 kg) (Ferroxcube, 2013). En paralelo a L₃ se conectó una resistencia R_{pp} de 100 M @ 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.

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

REACTOR

De acuerdo con la figura 2, las dimensiones y características físicas del C-DBD₂ son: 15.40 mm de radio exterior (R₁), 12 mm de radio interno (R₂), 19.30 cm de longitud (D₁), 4.85 mm de radio del aislante interno (R₃); 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 (R₄); el electrodo GND es una malla de acero inoxidable de 0.80 mm de grosor y 11.37 cm de longitud (D₂). El volumen de las microdescargas es de 50.60 μm³. El reactor se elaboró con dos capas aislantes de aluminio, ya que propician una descarga más homogénea respecto a reactores con una barrera.

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, ±10 V) @ 2.00 MS s⁻¹, y 32 entradas (AI, ±10 V) @ 1.00 MS s⁻¹, que pueden referenciarse a una tierra común (RSE, referenced single-ended) o estar ais-

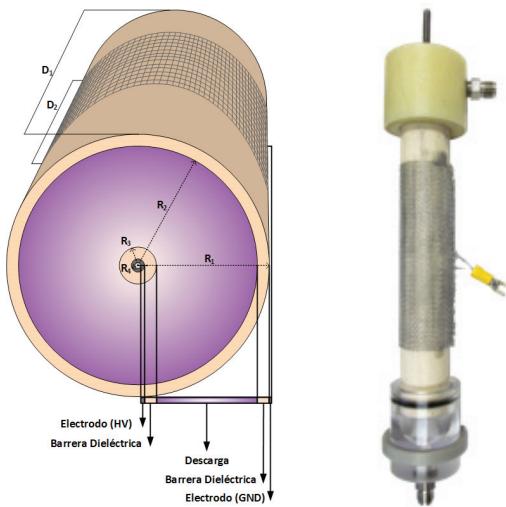


Figura 2. Reactor coaxial de doble barrera dieléctrica

ladas unas de otras (Diff). También posee 48 puertos digitales (*DIO, Digital Input/Output*) 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 (*TTL, Transistor-Transistor Logic*). 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*): $140 \text{ Hz} \leq f_{\text{PWM}} \leq 160 \text{ kHz}$ y $0.01 \leq D_{\text{PWM}} \leq 0.99$, para la frecuencia y el ciclo de trabajo, respectivamente. La señal de se envía por los pines 10 (señal) y 11 (tierra en serie con $R_s = 390 \Omega$) al optoacoplador TLP250, cuya salida sirve como reloj para el *flip-flop* 7476, que tiene sus entradas *JK* = 5V; este arreglo proporciona los pulsos *Q* y desfasados \bar{Q} 180° entre sí, a los que se les aplica la función AND con la señal *ctr0* para obtener pulsos, V_{GS1} y V_{GS2} , con rangos de la mitad de *ctr0*: $70 \text{ Hz} \leq f_{\text{PWM}} \leq 80 \text{ kHz}$ y $0.005 \leq D_{\text{PWM}} \leq 0.495$ (figura 3).

Para la etapa de caracterización, se integraron los datos del *RGA PG-250* que entrega mediciones para 7 gases, sin embargo, solo 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.

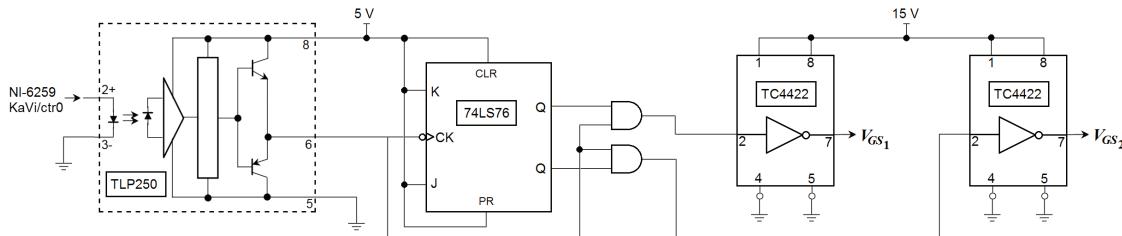


Figura 3. Circuito de control de compuerta para los MOSFET

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

Canal analógico de salida		Canal analógico de entrada		Canal digital		Contador temporizador	
Puerto	Dispositivo	Puerto	Dispositivo	Puerto	Dispositivo	Puerto	PWM
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	RGA NO _x				
		AI ₃ -AI ₁₁					
		AI ₄ -AI ₁₂					
		AI ₅ -AI ₁₃					
		AI ₆ -AI ₁₄					
		AI ₇ -AI ₁₅					
		AI ₁₆ -AI ₂₄					

INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO

El VI final se compone por cuatro sub-VI que permiten:

- Acceder al personal (Registro.vi)
- Configurar los puertos de la USB-6259 y procesar los datos (Principal.vi)
- Comunicar con el equipo de diagnóstico (PG250.vi)
- Guardar información (Bitácora.vi)

La información y los controles se pueden consultar y modificar *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^{-1} a 1 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 misma figura):

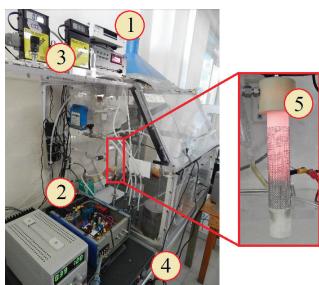
- Operador.** Al inicio una ventana pide complementar los campos Nombre y Clave de usuario, son autenticados con una base de datos para autorizar el uso del equipo, el programa se detiene al no coincidir.
- Encendido.** Una vez pasado el control de acceso, este indicador se muestra de color verde y comienza 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.

- Logotipo.** Al presionarlo despliega una ventana con información de la institución colaboradora.
- Ayuda.** Activa/desactiva las etiquetas de ayuda mostradas al mover el cursor sobre los controles/indicadores.
- Congelar.** Mantiene estática la pantalla de control para evitar su modificación por error.
- 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 son calculados.
- 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.
- Push Pull.** Permite modificar los parámetros del control por PWM.
- Gases.** Permite modificar las concentraciones y el flujo de gas.
- Bitácora.** Guarda en el directorio los datos de las variables, por intervalos de segundo, minuto u hora. Al finalizar la prueba comprime la carpeta, la envía por correo electrónico y elimina el archivo *.zip creado.
- RGA.** Abre la interfaz de control y adquisición del PG-250.



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



- 1 . Tarjeta de adquisición de datos USB-6259
- 2 . Inversor push-pull
- 3 . Controladores de flujo MFC 1 y 2
- 4 . Fuente comutada XLN10014
- 5 . Reactor DBD encendido

Figura 5. Fotografía del montaje de sistema

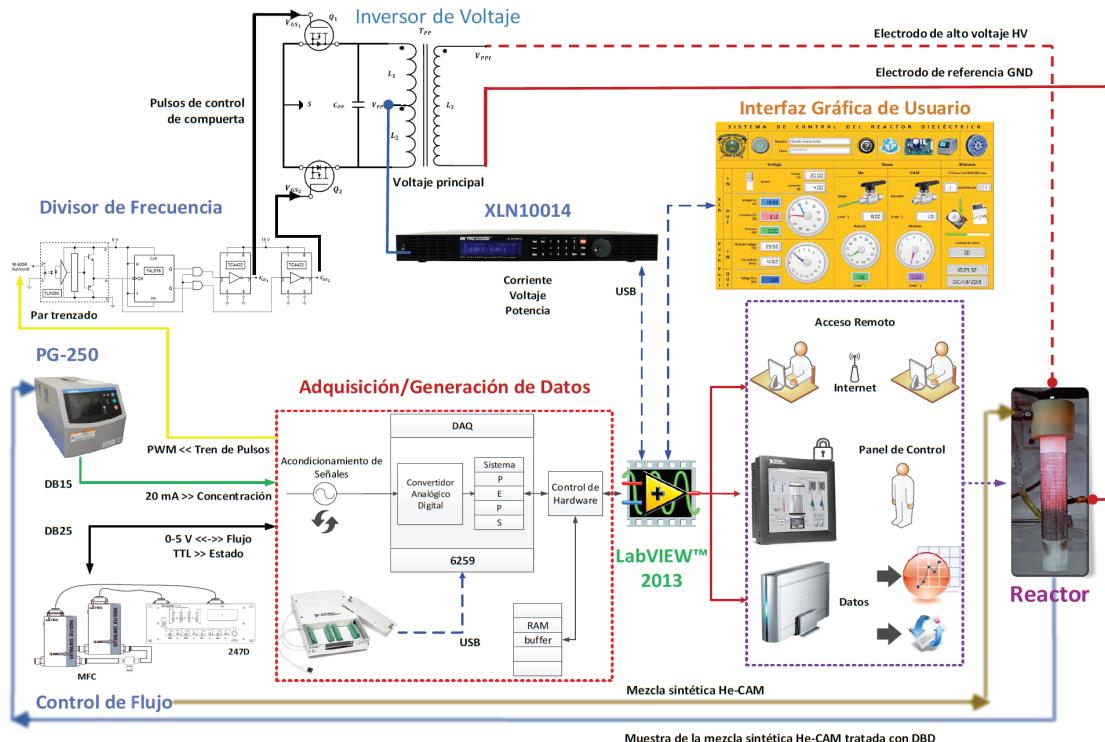


Figura 6. Diagrama de interconexión de todo el sistema

Con estas herramientas instaladas se creó un sistema basado en el enfoque *GSD* 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).

En la figura 5 se presenta una fotografía y su descripción del montaje del sistema desarrollado en el laboratorio de aplicaciones de plasmas del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares. En la figura 6 se presenta un diagrama de interconexión de todo el sistema, es decir, la interfaz gráfica de usuario, la tarjeta de adquisición de datos, la fuente de voltaje comutada, los controladores de flujo, el inversor de alto voltaje y el reactor coaxial de barrera dieléctrica.

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 a 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 8 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 desfasamiento (figuras 7b y 7c). 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 8), 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.

Las condiciones mínimas para que inicien las descargas son: $He = 1.236 \text{ l min}^{-1}$, $V_{PP} = 19 \text{ V}$, $V_{PPI(pk)} = 1.88 \text{ kV}$ @ 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 9 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 extinguieren (zona de *standby*).

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 10, 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.

Al aplicar 25 V y hacer fluir He se identifican oscilaciones súbitas de $0 - t_1$, en la gráfica de la potencia (debidamente 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 trabajaron en estado estacionario con un consumo promedio de 7 W. Posteriormente se aumentó la concentración de CAM y 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 10, de $t_1 - t_2$ la rampa de potencia aumenta 8 W y la

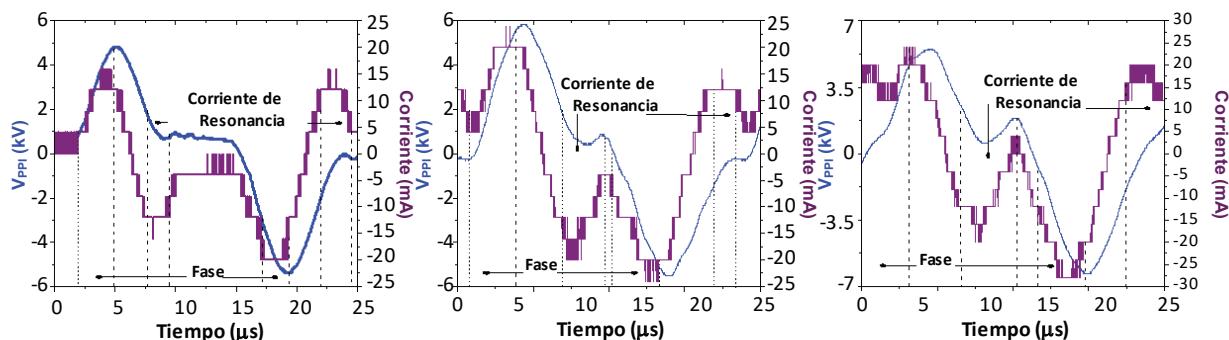


Figura 7. Variación de f_{PWM} y D_{PWM} para determinar la transferencia máxima de potencia, a) valores correctos, b) $f_{PWM} = 56 \text{ kHz}$ y $D_{PWM} = 25.5\%$, c) $f_{PWM} = 56 \text{ kHz}$ y $D_{PWM} = 20\%$

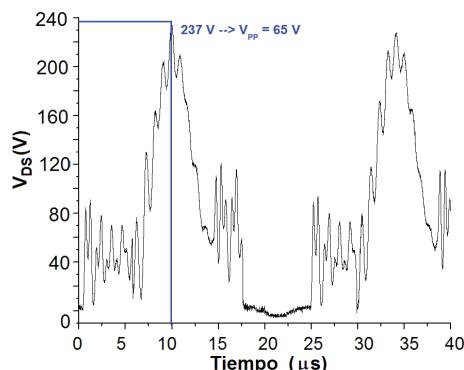


Figura 8. Detección de valores pico para estimar el voltaje máximo de operación del MOSFET

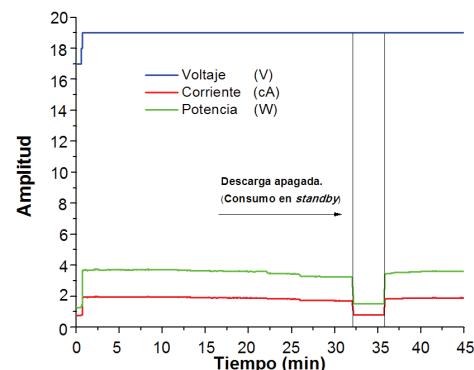


Figura 9. Identificación de las condiciones mínimas de potencia para iniciar las descargas

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 filamentación homogénea de las microdescargas. En t_{12} la CAM está presente a 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 localizarse dentro del reactor y a extinguirse.

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 específi-

co no refleja una degradación mayor para $V_{pp} = 35 \text{ y } 45 \text{ V}$, 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%.

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

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]	Degradoación [%]
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
	583.79	142.02	12.48	0.38	9.00	70.00
45	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
	460.67	103.68	13.49	7.82	185.00	23.89
	996.64	240.52	12.58	1.14	24.00	74.07
55	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

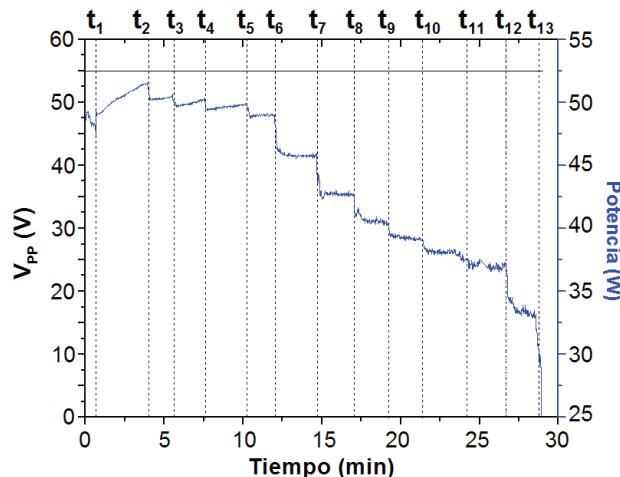


Figura 10. Voltajes máximos (55 V) y potencia aplicados al reactor dieléctrico

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.

Se identificaron 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 es 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 a 88% para los NO_x . En la bibliografía se obtuvieron 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 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 se encamina a un descenso en la capacidad del sistema a su degradación respecto al aumento en la concentración de CAM, acompañada de altos niveles de DVP y

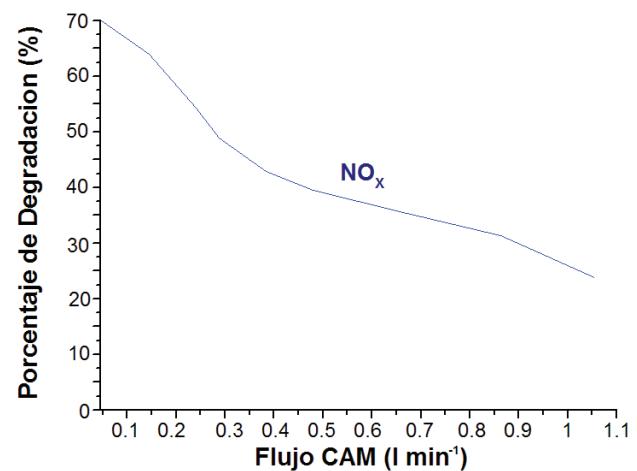


Figura 11. Resultados de las pruebas de degradación de NO_x

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.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Alfonso Salazar, Fidel Ramos, Gustavo Soria, Mario Ibañez, Miguel Durán, Miguel Hidalgo 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 K.H. En: Bonitz M., Horing N., Ludwing P., eds. *Introduction to Complex Plasmas*, Berlin, Springer 2010, pp. 367-394.
- Bersani A. *Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies*, Part II, Microchip Technology Inc., 2009, ID: AN1207.
- Bishop R H. *Mechatronic system control, logic, and data acquisition*. The Mechatronics Handbook, 2a ed., CRC Press, 2007, ISBN 9781420009026.

- Conrads H. y Schmidt M. Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*, volumen 9 (número 4), 2000: 441.
- Estrada N. et al. Chemical and electrical diagnosis of two configurations of dielectric barrier discharges applied to nitric oxides degradation. *Superficies y Vacio*, 2011, DOI: ND.
- Ferroxcube (3 de enero de 2013). U126/91/20. U, I Cores and Accessories, Datasheet [en línea]. Disponible en: <http://www.ferroxcube.com/FerroxcubeCorporateReception/datasheet/u1269120.pdf>.
- Fridman A. *Plasma chemistry*, Cambridge University Press, 2008, ISBN 9780511398575.
- Gottschalk C. et al. *Ozonation of water and waste water, A practical guide to understanding ozone and its applications*, Wiley, 2010, ISBN 9783527319626.
- Jiménez G. et al. Instrumenting and programming a virtual instrument for an open loop system to control gliding centrifugal thermal plasma, 9th CCE, 2012, DOI: 10.1109/ICEEE.2012.6421110.
- Kogelschatz U. Dielectric-barrier discharges: Their history, discharge physics, and industrial applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2003, DOI: 10.1023/A:1022470901385.
- Kunhardt E.E. Generation of large-volume, atmospheric-pressure, nonequilibrium plasmas. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, DOI: 10.1109/27.842901.
- Manley T.C. The electric characteristics of the ozonator discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 1943, DOI: 10.1149/1.3071556.
- Meichsner J. Nonthermal reactive plasmas, chapter 11, 267-298, en: Bonitz M. et al. eds., *Introduction to Complex Plasmas*, Springer, 2010, ISBN 9783642105913.
- MKS (3 de enero de 2013). MKS Type 247D Four-channel readout, Instruction manual [en línea]. Disponible en: www.mksinst.com/docs/R/247Dman.pdf.
- MKS (3 de enero de 2013). MKS Type M100B Mass-flo controller and m10b mass-flo meter, Instruction Manual [en línea]. Disponible en: www.mksinst.com/docs/R/M100B-M10MBman.pdf.
- Mohammad, K. *Switch Mode Power Supply (SMPS) Topologies* (Part I), Microchip Technology, 2007, Inc., ID: AN1114.
- NI (2013, 5 de febrero). NI 625x Specifications [en línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/pdf/manuals/375216c.pdf>.
- Omega (3 de enero de 2013). FMA-A2100's, FMA-A2300's Massflow meters, user's manual [en línea]. Disponible en: www.omega.com/Manuals/manualpdf/M2842.pdf.
- Pacheco M.J. et al. Application of non-thermal plasma on gas cleansing. *Physica Scripta*, 2008, DOI: 10.1088/0031-8949/2008/T131/014017.
- Pacheco M. et al. Removal of main exhaust gases of vehicles by a double dielectric barrier discharge, 14th LAWPP, 2012, DOI: 10.1088/1742-6596/370/1/012023.
- Pacheco M.J. et al. Tratamiento de emisiones de motores diesel por plasma fuera de equilibrio. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2013, DOI: ND.
- Penetrante B.M. et al. Plasma-assisted catalytic storage reduction system, Patente, 2002, US6038853 A.
- Roth J.R. *Industrial plasma engineering*, volume 1, principles, Institute of Physics Publishing, 1995, ISBN 0750303174.

Este artículo se cita:

Citación estilo Chicago

Jiménez-Aviles, Gerardo, Ricardo Valdivia-Barrientos, Arturo Colín-Cruz, Marquidia Pacheco-Pacheco, Joel Pacheco-Sotelo. Control de un sistema de descargas de barrera dieléctrica basado en el diseño gráfico de sistemas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII, 01 (2017): 17-29.

Citación estilo ISO 690

Jiménez-Aviles G., Valdivia-Barrientos R., Colín-Cruz A., Pacheco-Pacheco M., Pacheco-Sotelo J. Control de un sistema de descargas de barrera dieléctrica basado en el diseño gráfico de sistemas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, volumen XVIII (número 1), enero-marzo 2017: 17-29.

SEMBLANZAS 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 como ingeniero en electrónica en 2011. 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 por 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. Recibió el título como ingeniero electrónico por el Instituto Tecnológico de Toluca (ITT), México en 2003, donde actualmente se encuentra cursando el doctorado en ingeniería electrónica. Se ha 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. 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. Recibió el título en ingeniería química por el Instituto Tecnológico de 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, 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 Pacheco-Sotelo. Recibió el título como 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. Asimismo el Ph.D. en el Instituto Politécnico de Toulouse, Francia en 1993. Desde 1974, está adscrito al Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), Ciudad de México, donde trabaja en investigaciones relacionadas con plasmas térmicos y no térmicos, y en el control de la contaminación. Desde 1995, es responsable del Laboratorio de Aplicaciones de Plasmas, ININ. Es miembro del Sistema de Nacional de Investigadores desde 1989.