



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ESPECTROSCOPIA ÓPTICA DE EMISIÓN DE UN PLASMA
LUMINISCENTE DE CO₂/H₂”**

TESIS

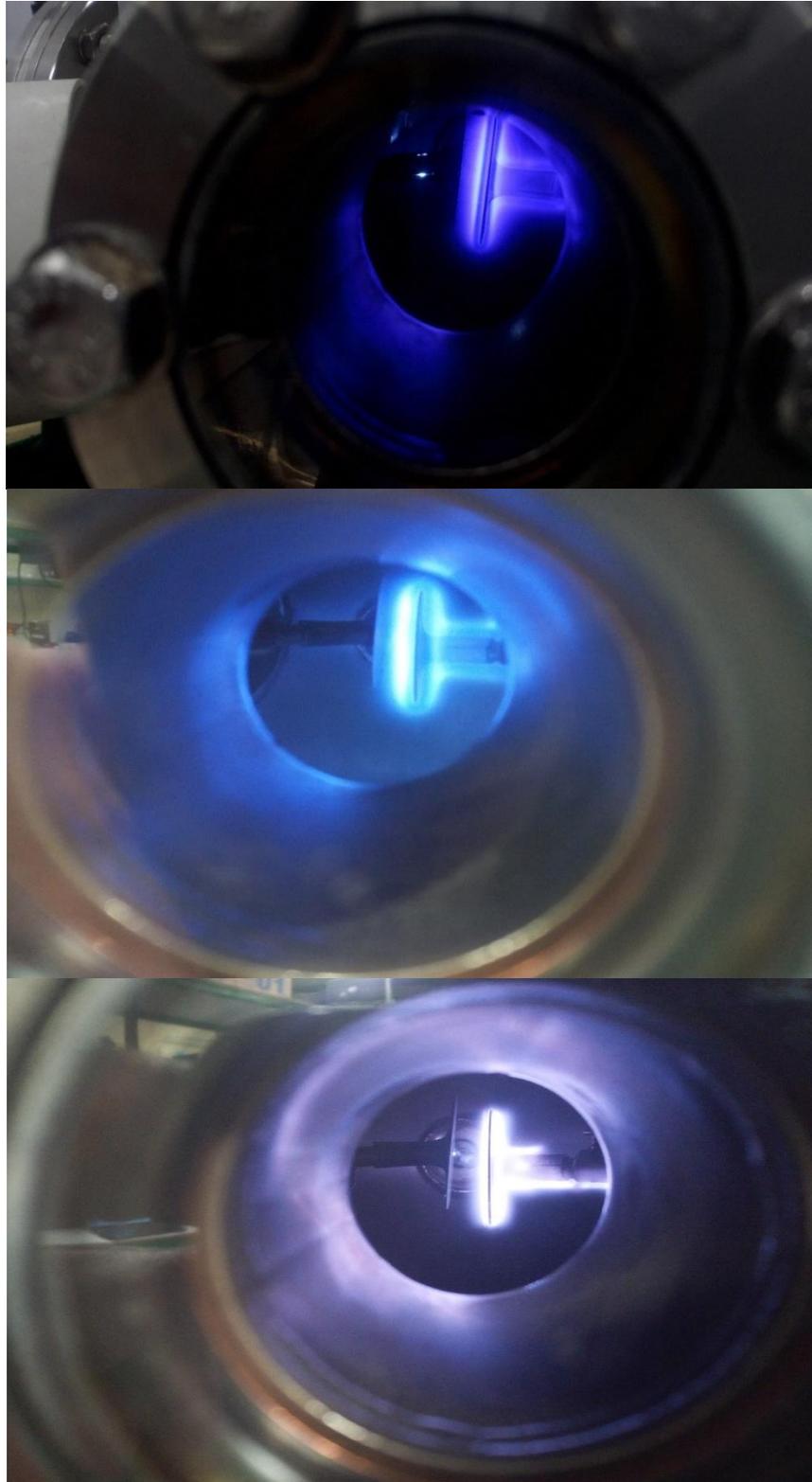
**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
FÍSICO**

**PRESENTA:
PAS. VICTOR ANTONIO ROJAS CAMACHO**

**DIRECTORES DE TESIS:
DR. PEDRO GUILLERMO REYES ROMERO
DR. AARÓN GÓMEZ DÍAZ**



TOLUCA, ESTADO DE MEXICO 2019



**Descarga luminiscente a bajas presiones (CO_2 , H_2 y CO_2/H_2)
Laboratorio de Física Avanzada, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México**

Índice General

Introducción	1
Objetivo General	2
Objetivos Específicos	2
1. Capítulo 1	3
1.1 Plasmas	3
1.1.1 Definición	3
1.1.2 Clasificación	5
1.1.3 Conceptos Fundamentales	6
1.1.4 Generación	12
1.1.5 Aplicaciones (CO ₂ , H ₂)	13
1.2 Diagnóstico	15
1.2.1 OES	15
1.2.2 Corriente y voltaje	17
1.2.3 Sonda de Langmuir	18
1.2.3.1 Diseño de sonda	19
1.2.3.2 Sistematización y aplicación	20
1.3 Gases atómicos y moleculares	22
1.3.1 Clasificación, importancia	22
1.3.2 Definición química y características físicas	23
1.4 Reacciones atómicas y moleculares	23
1.4.1 Potenciales de ionización	23
1.4.2 Clasificación de los procesos atómicos y moleculares	24
2. Capítulo 2	26
2.1 Experimentación (plasma)	26
2.1.1 Sistema experimental	26
2.1.2 Sistema de vacío	27
2.2 Espectrómetro	27
2.3 Fuente de voltaje	27
2.4 Báratron capacitivo	27
2.5 Turbomolecular	28
3. Capítulo 3	30
3.1 Resultados	30
Diagnóstico del plasma: Corriente, Presión, OES	30
3.2 Experimentación (Sonda de Langmuir)	45
Programa de Computo (ajuste)	45
Análisis mediante Sonda de Langmuir	53
4. Conclusiones	58
5. Referencias	60

Introducción

La contaminación a nivel mundial es una problemática que se tiene que atender de manera inmediata, la cual está provocando serios deterioros al planeta tierra, uno de los principales problemas es el daño a la capa de ozono, causando el aumento de la temperatura terrestre provocando así el efecto invernadero. El principal gas contaminante causante del efecto antes mencionado es el Dióxido de Carbono (CO_2). La molécula de CO_2 es una de las más investigadas debido a su importancia en la física atmosférica.

En los últimos años el interés por el plasma de CO_2 han ganado una considerable atención debido al aumento en los cambios climáticos globales. La descomposición del CO_2 mediante descargas eléctricas para su rompimiento, es de sumo interés desde el punto de vista ambiental, que en parte es una motivación por la cual se realizó este trabajo [1]. Existen diversas soluciones para reducir los efectos del Dióxido de Carbono en la atmósfera, dentro del cual encontramos, la disminución de utilización de automóviles que provoquen emisiones de CO_2 por combustibles fósiles, utilización de energías renovables como paneles solares y una posible solución con mayor interés para mitigar los efectos de las altas concentraciones de este gas es el uso de una fuente de plasma para romper y analizar esta molécula en monóxido de Carbono (CO) y Oxígeno (O_2). El CO puede ser filtrado para su uso en la industria química y como combustible en aplicaciones industriales, o se puede disociar aún más para producir carbono y oxígeno. Los procesos asociados con el CO_2 se encuentran a menudo en tecnologías recientes como la formación de películas delgada.

Por otra parte, tenemos la investigación, aplicación e importancia del Hidrógeno (H_2) como el elemento más vasto en la tierra y con mayor abundancia en el universo conocido, el cual por su desarrollo, avances e investigaciones se está considerando como una fuente de energía “limpia” para la utilización en transportes, que consiste en la reacción de Hidrógeno con Oxígeno para producir agua utilizada en celdas de combustible, siendo una de las formas más promisoras para generar energía en automóviles, evitando la liberación de gases con efecto invernadero, al contrario de lo que sucede con los motores actuales que utilizan la combustión de Hidrocarburos de origen fósil[2].

De acuerdo a las necesidades que está presentando la física de plasmas en los últimos años ha ido incrementando el interés en los efectos de adición de mezcla de gases de descargas luminiscentes, que provocan un cambio en la función de distribución del electrón, en las intensidades obtenidas de los Espectros Ópticos de Emisión, en los coeficientes de velocidad, en los procesos de colisión elástico/inelástico y el aumento en la densidad electrónica [3].

Conocer las características de las descargas antes mencionadas que tienen como clasificación un plasma frío (por su bajo grado de ionización) se requiere para comprender los procesos importantes dentro del plasma, y a su vez, las propiedades el mismo.

Este trabajo se centra en el estudio de una mezcla de gases (CO_2/H_2) y su análisis mediante espectroscopia óptica de emisión (OES).

Objetivo general:

Determinar reacciones atómicas y moleculares producidas en una descarga eléctrica aplicada a la mezcla de CO₂ y H₂, a bajas presiones, esto mediante Espectroscopia Óptica de Emisión.

Objetivos específicos:

- Diseñar e implementar un sistema experimental de descargas luminiscentes a baja presión.
- Realizar los experimentos de descargas luminiscentes de gases moleculares (CO₂/H₂).
- Caracterizar el espectro óptico de emisión en función de los resultados del proceso de excitación.
- Determinar la temperatura y densidad electrónica del plasma.

Capítulo 1

1.1 Plasmas

1.1.1 Definición

El interés y necesidad de tecnologías a base de plasmas comenzó en 1960, donde se realizaron las primeras aplicaciones industriales como soldaduras, cortes, síntesis de partículas ultra finas entre otras. A partir de los noventa se aprecia un aumento considerable de las aplicaciones del plasma en otros campos como la óptica, la electricidad y la ciencia de materiales.

Cabe mencionar que el desarrollo y curiosidad de esta ciencia viene de siglos anteriores, en 1667 los científicos de la academia de Ciencias de Florencia descubrieron que la llama del quemador tenía la propiedad de conducir electricidad. En 1698, en Inglaterra, el Dr. Woll al estudiar la electrización del ámbar, frotaba este con constancia con un trocito de lana, de pronto del ámbar salto una chispa [4]. De este modo, inesperadamente para el científico inglés, el obtuvo por primera vez una pequeña descarga eléctrica en el aire. Semejante descarga en el aire es solo posible cuando se crea en una suficiente una cantidad de partículas cargadas y el aire se convierte en un conductor de la electricidad, o sea, en el plasma.

Con el desarrollo, en 1808, de la descarga en estado estable de arco eléctrico con corriente directa realizado por Humphry Davy y del tubo de descarga de alto voltaje con corriente directa, en 1830, por Michael Faraday, dio inicio el estudio científico de la sustancia que se generaba en estas descargas. Casi cincuenta años después de lo relatado, una descarga eléctrica fue observada con ayuda de la botella de Leiden y a comienzos del siglo XIX, el académico ruso V.V Petrov descubrió el arco eléctrico o, como suelen llamarlo, la descarga en arco. Su estudio mostro que las propiedades del gas, en el que transcurre la descarga eléctrica, tanto se diferencian de las del gas en estado no conductor de la electricidad. Esta sustancia identificada en 1879 por William Crookes como el cuarto estado de la materia, se conoce actualmente como plasma.

Este término fue introducido por Irving Langmuir en 1928, en referencia a una mezcla de átomos neutros, iones y electrones que casi presentaba neutralidad eléctrica. Esta mezcla tenía la propiedad de ser sensible a la presencia de campos eléctricos y magnéticos [5]. El desarrollo, innovación y nacimiento de la disciplina de Física de plasma está centrada en el estudio de descarga en gases ionizados, esto cuando se comenzó a estudiar este tipo de experimentos, llamada descarga gaseosa luminiscente de baja presión.

El plasma se encuentra de forma natural en el universo, formando parte de las estrellas, nebulosas, pero de igual manera lo encontramos en la atmosfera formando parte de los rayos y las auroras boreales. Siendo así esta una de las direcciones por la cual la Física de plasma comenzó a descubrir nuevas investigaciones como los procesos astrofísicos y el interés en energía nuclear.

Hoy en día la física de plasmas es un campo activo, que contribuye al conocimiento no solo del plasma en general, sino también genera nuevas ideas que contribuyen a resolver problemas ambientales.

Para entender de mejor manera se debe definir el cuarto estado de la materia también denominado “Plasma” que se obtiene cuando en un gas neutro, algunos o todos los electrones de sus átomos son excitados y separados del núcleo atómico. Los electrones y los núcleos ionizados, ahora desligados unos de otros, presentarán una dinámica colectiva, al igual que un fluido, y responderán intensamente a los campos electromagnéticos. A pesar de la presencia de cargas libres, la carga neta del plasma sigue siendo neutra ya que la densidad iónica y eléctrica tiene el mismo valor.

El plasma se define de manera más rigurosa por tres criterios:

La proximidad del plasma. - Las partículas cargadas deben ser lo suficientemente cercanas, de manera que cada partícula influya en muchas partículas cargadas cercanas, más que solo interaccionando con la partícula más cercana (estos efectos colectivos son un rasgo que distingue un plasma). La proximidad del plasma es válida cuando el número de portadores de carga dentro de la esfera de influencia de una partícula particular es más alto que la unidad para proporcionar comportamiento colectivo de las partículas cargadas.

Interacciones del volumen. - la longitud de Debye se compara de forma resumida con el tamaño físico del plasma. Esto significa que las interacciones del volumen del plasma son más importantes que en sus bordes, donde pueden tener lugar los efectos de frontera. Cuando este criterio se satisface, el plasma es casi neutro.

Frecuencia del plasma. – la frecuencia de los electrones del plasma (midiendo las oscilaciones del plasma de los electrones) se compara con la frecuencia de colisión de electrón-neutro (midiendo la frecuencia de colisión entre electrones y partículas neutras). Cuando esta condición es válida, las interacciones electrostáticas dominan sobre los procesos corrientes de cinética de gases [6].

Existen dos grupos en los que se puede subdividir un plasma como:

- **Plasma térmico:** este tipo de plasma está caracterizado por el hecho de que la temperatura del gas de electrones T_e es casi igual a la temperatura del gas de partículas pesadas T_h (iones, átomos, etc.) de manera que el estado del plasma se aproxima a un equilibrio térmico, tiene una alta densidad electrónica (10^{22} a 10^{11} partículas/ m^3) y baja energía de los electrones.
- **Plasma no térmico:** se caracterizan por el hecho de que la energía de los electrones es considerablemente mayor que la de los iones y las moléculas del gas, la densidad electrónica varía entre 1 y 10^{25} electrones por centímetro cúbico, de manera que la temperatura de las especies pesadas (las partículas neutras y los iones) es cercana a la temperatura ambiente. La temperatura electrónica es, en cambio, mucho mayor.

1.1.2 Clasificación

Entender la naturaleza de los plasmas es un objetivo primordial para conocer mejor el comportamiento de estos, tenemos dos tipos de clasificaciones que son plasmas naturales y artificiales (generados en la descarga del gas) ocurren en un amplio rango de presiones, temperaturas electrónicas y densidades electrónicas [7]. Las altas temperaturas se expresan convencionalmente en electrón voltios.

Como en cualquier gas, la temperatura del plasma está determinada por las energías promedio de las partículas del plasma (neutro y cargado) y sus grados de libertad relevantes (traslacional, rotacional, vibracional y es generalmente aquellos relacionados con la excitación electrónica). En descargas eléctricas comunes para generación en laboratorio, la energía del campo eléctrico se acumula primero por los electrones entre colisiones y, posteriormente, se transfiere de los electrones a las pesadas partículas.

Los electrones reciben energía del campo eléctrico durante su recorrido libre medio y, durante la siguiente colisión con una partícula pesada, pierde solo una pequeña porción de esa energía (porque los electrones son mucho más livianos que las partículas pesadas) [8]. Es por eso que la temperatura del electrón en el plasma es inicialmente más alta que la de las partículas pesadas.

Los plasmas creados dentro del laboratorio se clasifican en fríos y calientes.

Plasma caliente: tienen alto grado de ionización ($> 10\%$), son usualmente más potentes y sus electrones están en equilibrio térmico con las partículas pesadas (se llama grado de ionización al cociente entre el número de iones y las partículas neutras que lo contiene).

Los plasmas calientes se producen generalmente cuando se consiguen que los mecanismos de transferencia de energía entre partículas aumenten la energía de las especies neutras hasta un nivel similar al electrónico, pudiendo tratar al plasma como un sistema de una única temperatura. Esta situación se da cuando generalmente se trabaja a presiones altas, del orden de la presión atmosférica.

Plasma frío: se caracterizan por ser selectivos y tener una situación estacionaria, la energía cinética media electrónica es mucho mayor que la de las partículas pesadas del plasma. Toman su nombre debido a que la temperatura de sus partículas neutras e iones están entre los 25°C a los 100°C , en cambio que la temperatura electrónica está entre los 5000°C a 10^5°C .

Se producen a presiones bajas, en reactores que generan plasmas mediante diversos sistemas como corriente continua, microondas o descargas pulsadas. En este caso los procesos de excitación resultan de la energía adquirida por los electrones en presencia del campo eléctrico, los cuales colisionan con las moléculas del gas y producen especies reactivas frías (desde el punto de vista traslacional).

Las especies cargadas van a tener un comportamiento muy diferente debido a la presencia del campo electromagnético que hace aumentar su energía [9]. Se rompen así, por lo tanto,

las relaciones típicas del equilibrio, y resulta bastante común hablar de energía cinética media de los neutros (relacionada con su temperatura T_g) y electrónica.

Las propiedades de este tipo de plasmas se analizan mediante distintas técnicas de diagnóstico como son la espectroscopia de absorción y emisión, y las sondas electrostáticas [10].

Es interesante observar que los plasmas térmicos y no térmicos suelen tener la temperatura más alta en el orden de magnitud de 1 eV, que es aproximadamente el 10% de la energía total requerida para la ionización (aproximadamente 10 eV).

1.1.3 Conceptos Fundamentales

Descarga eléctrica (Glow Discharge)

El termino Glow Discharge se refiere a un “plasma luminoso” cuyo conjunto de átomos está parcialmente ionizado, con el mismo número de iones y electrones y una gran cantidad de átomos neutros. Los electrones libres, son capaces de generar, mediante colisiones, átomos de gas excitados. Estos átomos de gas excitados terminaran relajándose a sus estados bases con emisión de fotones, es por ello por lo que el plasma emite luz [11].

Una descarga luminiscente se inicia en un entorno de presión reducida y cuando el voltaje aplicado entre dos electrodos excede la energía necesaria para causar la descomposición del gas a tratar, lo que lleva a la creación de pares de electrón-ion.

El voltaje suministrado a la descarga es generalmente de 500 a 2000 V en una atmosfera de gas a una presión de 0.1 a 10 Torr aproximadamente. La corriente resultante de funcionamiento depende de la presión de gas por lo general está en el rango de 5 a 100 mA. El voltaje de mantenimiento depende de la corriente de descarga, la identidad del gas de llenado y su presión en la fuente, identidad del cátodo y la configuración particular del electrodo.

La Fig. 1 muestra una descripción cualitativa de la relación entre la corriente y el voltaje entre dos electrodos donde el voltaje que pasa a través de los electrodos es incrementado muy lentamente, las primeras medidas de la corriente serán pulsos al azar, cuando existan suficientes electrones libres entre los extremos, un flujo de corriente estable podrá ser observada con el comienzo de los pulsos. El presente trabajo se centra en la región de descarga normal o de resplandor.

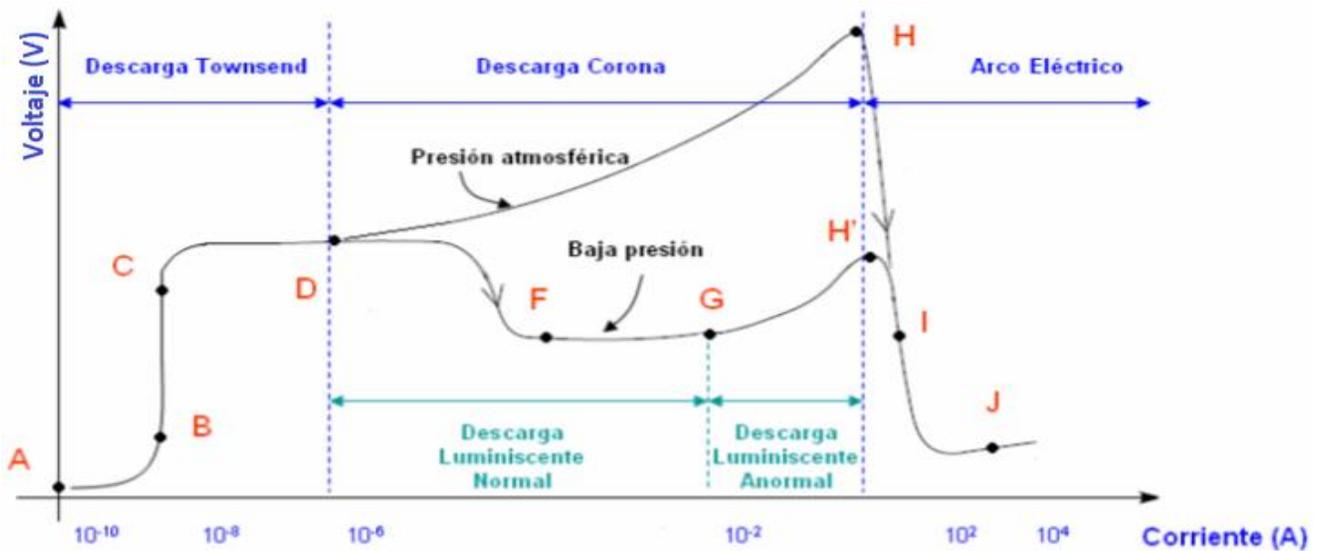


Figura 1. Regiones de una descarga luminiscente.

Los diferentes regímenes de la descarga se muestran esquemáticamente en la figura 1 y se describen a continuación de una manera muy general para un plasma idealizado. En general, y dependiendo del tipo de plasma, algunas de las características mencionadas aquí pueden no estar presentes en casos particulares.

1. Descarga Townsend. - Se lleva a cabo en corrientes del orden de $10^{-7} - 10^{-6}$ A. Está caracterizada por un voltaje constante interelectrodico, V_e , a distintas corrientes. Esta descarga presenta tan baja densidad de carga que no emite luz apreciable. Los efectos de carga espacial son despreciables en este régimen.
2. Descarga de resplandor subnormal. - Es una región de transición, entre la descarga Townsend y la región normal, donde el voltaje decrece hasta alcanzar un voltaje constante. El decremento de voltaje se debe a la creación de una región de carga acumulada. Esta carga acumulada se genera debido a que las movilidades electrónica e iónica son muy diferentes. Al difundirse los electrones de manera más rápida, crean una región cerca del cátodo que presenta un desbalance de carga positiva.
3. Descarga de resplandor normal. - Se caracteriza por ser de voltaje constante para distintas corrientes. Debido a que los electrones son suficientemente energéticos, estos pueden excitar a los átomos y moléculas neutros del plasma, produciendo así una luminiscencia visible en ciertas regiones de la descarga. Se lleva cabo para corrientes mayores a las de la descarga oscura, del orden de 1 – 100 mA.
4. Región de resplandor anormal. - En esta región la curva de voltaje-corriente, presenta un incremento en el voltaje, que se eleva hasta llegar a un área de saturación a causa del incremento de la corriente y la luminiscencia. De la misma manera que el voltaje y la corriente incrementan, la energía promedio de los iones que bombardean el cátodo también incrementa. Las corrientes son del orden de 1 A.

5. Descarga de arco. - Ocurre a partir de corrientes de 1 – 10 A. El voltaje cae varias decenas de volts, llegando a un valor menor o igual al del potencial de ionización. Esto se debe a que los iones que colisionan con el cátodo, aumentan la temperatura de este causando emisión termiónica, de esta manera la descarga requiere un campo eléctrico menor para establecer los procesos de ionización, por lo que el potencial cae [12].

El presente trabajo se centra, principalmente, en el estudio de las descargas en la región de luminiscencia. Como se muestra en la figura 2 las propiedades y la apariencia de estas regiones dependen de diversos factores, tales como la presión, la geometría del recipiente que contiene el gas, la forma, tamaño, material y separación de los electrodos, así como del tipo de gas, en nuestro caso Dióxido de Carbono, Hidrógeno y la mezcla de ambos.

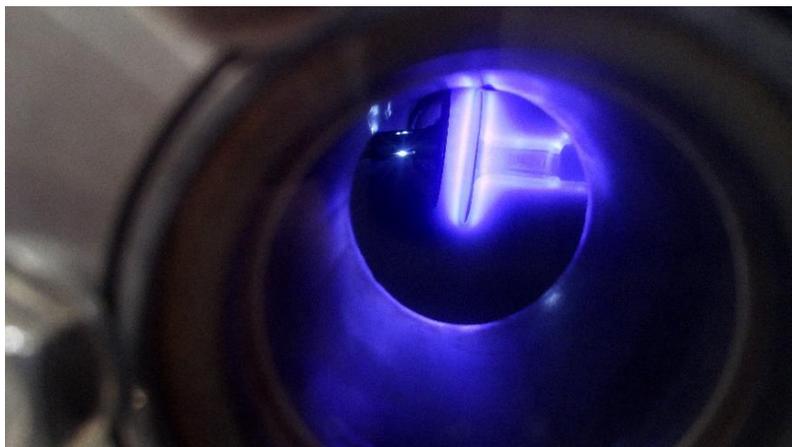


Figura 2. Descarga luminiscente.

Geometría de la descarga luminiscente

En esta sección se describen las características generales y las diferentes regiones que presenta la descarga luminiscente, así como su relación con el campo eléctrico, el potencial y las densidades de carga y corriente. Las diferentes regiones de la descarga se muestran en la figura 3, que se muestran a continuación [13]:

- a) Espacio oscuro Aston y vaina catódica. - Es una delgada región cercana al cátodo, donde los electrones presentes, tienen una energía inicial del orden de 1 eV. Estos electrones se encuentran en esta región debido a que son extraídos del cátodo por efecto fotoeléctrico, o por colisiones de iones positivos. La energía que presentan se debe a que son acelerados por el campo eléctrico presente. En esta región, los electrones no han alcanzado la energía de ionización del gas. Después de esta zona, se encuentra una región que cubre el cátodo, de débil luminosidad donde los electrones ya han obtenido una energía correspondiente.
- b) Espacio de Crookes. - Caracterizada por la presencia algunos electrones que, a causa de colisiones inelásticas, pierden energía cinética haciéndose lentos. Los electrones

lentos son los responsables de la débil luminosidad en esta región, mientras los electrones más rápidos generan una luminosidad más intensa, debido a que inducen ionización con alta eficiencia. En esta región aumentan, asimismo, el número de electrones, y, debido a las diferentes movilidades de los iones y de los electrones, se genera un intenso espacio de carga positiva, que reduce el campo eléctrico local.

- c) Luminiscencia negativa. - En esta zona la mayoría de los electrones más energéticos, ya ha alcanzado el cátodo, y, el número de electrones de baja energía es mayor. Entonces la eficiencia de ionización decrece, mientras, la excitación atómica se vuelve altamente eficiente, debido a las colisiones inelásticas que producen los electrones de baja energía. Se produce un incremento en la luminosidad en la frontera de esta región.
- d) Región de Faraday. - Es la región oscura que aparece seguida de la “luminiscencia negativa”. La reducción del campo eléctrico, debido a los espacios de carga positiva que se producen en la región de Crookes, favorece la combinación de iones y electrones. Así, la energía electrónica promedio decrece al igual que la luminosidad conforme aumenta la distancia al cátodo.
- e) Columna positiva. - Esta zona se caracteriza por tener una luminosidad uniforme. La componente axial del campo eléctrico es casi constante y de varios ordenes de magnitud menor al de la región oscura. Esto indica que el plasma es neutral en casi cualquier punto.
- f) Descarga del ánodo o luz anódica. - En proximidad al ánodo, una región de carga negativa es generada, debido a la atracción de electrones hacia el ánodo, y, a la repulsión de los iones por la carga del ánodo. De esta manera el campo eléctrico incrementa otra vez con respecto al valor que tenía en la columna positiva. Los electrones provenientes de la columna positiva son acelerados contra el ánodo por el campo eléctrico, produciendo una “luz anódica” frente a él.

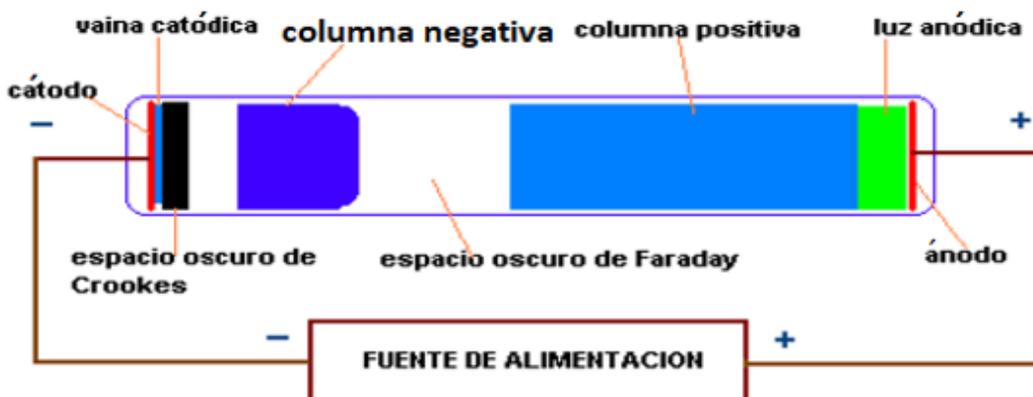


Figura 3. Diagrama esquemático de la descarga en un gas.

Temperatura y Densidad Electrónica

Cuando el sistema se encuentra en equilibrio térmico, las velocidades de los electrones o moléculas de un gas que se mueva al azar pueden ser representados por una función de distribución de Maxwell, esta ley describe la distribución de las partículas que componen el plasma con respecto a sus velocidades [14]. La densidad, dN , de cualquier tipo de partículas que tienen velocidades en el rango $v + dv$ puede describirse como $dN = Nf(v) dv$, donde N es la densidad de la especie de partículas considerada y $f(v)$ es la función de distribución de velocidades:

$$f(v) = 4\pi r^2 \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \text{Exp}\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) \quad (1)$$

Donde k es la constante de Boltzmann, que tiene un valor de 1.3810^{-23} J / K, m es la masa de la partícula y T es la temperatura.

En los plasmas generados por descargas eléctricas en gases como el usado en este trabajo los electrones y los iones están en equilibrio térmico por separado.

Los iones y los átomos neutros del gas tienen energías bajas que corresponde a una temperatura de algunos cientos de grados, mientras que los electrones son mucho más energéticos y pueden tener alguna temperatura de algunos eV, equivalente a varias decenas de miles de Kelvin, (una energía de 1 eV corresponde a 11600 K). Se considera que la temperatura electrónica del plasma es una característica colectiva que representa la energía promedio de los electrones.

Por lo general, en un plasma generado en un laboratorio como en el caso de la descarga gaseosa, la energía cinética promedio de los electrones, los iones y las moléculas excitadas es diferente. Por lo anterior, la temperatura de un plasma se describe de acuerdo a la temperatura de sus respectivas partículas: la temperatura electrónica, T_e ; la iónica, T_i , y la del gas T_g . Además, como a su vez las moléculas de gas tienen estructura interna propia, su energía ε_g está dada por:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{tras} + \varepsilon_{rot} + \varepsilon_{vib} \quad (2)$$

donde ε_{tras} , ε_{rot} , ε_{vib} representan las energías de traslación, rotación, vibración y del estado electrónico, respectivamente. La cantidad $\varepsilon_g - \varepsilon_{tras}$ es llamada la energía interna. Cuando el sistema está en equilibrio térmico, la distribución de las energías internas de las partículas del gas en un sistema dado, puede ser descrita por la ley de distribución de Boltzmann [15].

La ley de Boltzmann permite determinar la población del estado excitado de un átomo o una molécula. Siendo N_1 y N_2 las densidades de las partículas de una especie dada, que se distribuyen en 1 y 2 niveles, respectivamente. De acuerdo con la ley de Boltzmann tenemos que:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \text{Exp}\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (3)$$

donde E_1 y E_2 son las energías de los niveles 1 y 2, y g_1 y g_2 son los pesos estadísticos de las energías de los niveles 1 y 2, T es la temperatura. El peso estadístico (g_i) de un estado de energía E_i es relacionado con el número cuántico J_i , que corresponde a la cinética total del nivel i -ésimo a través de la relación $g_i = 2J_i + 1$

La energía de un plasma puede ser representada usando varias temperaturas, frecuentemente cada una de ellas es diferente. Entonces, el equilibrio térmico no es apreciable entre las distintas especies de partículas de un plasma o entre los estados de energía de una misma partícula. Esto indica que los electrones y los iones pueden ser considerados con distribuciones de Maxwell separadas, caracterizados por diferentes temperaturas: T_e de los electrones y T_i de los iones.

La densidad de plasma es una medida del porcentaje de partículas del gas que se han ionizado; más específicamente, es una medida del número de electrones libres por unidad de volumen, que más específicamente es una medida del grado de ionización de un plasma. Debido a que la densidad de plasma puede variar, también lo hacen las propiedades del plasma en función de dicha densidad. Incluso un gas débilmente ionizado con una densidad de plasma muy baja es considerado un plasma, pues exhibe propiedades características de esta fase. El plasma que se produce en la industria de modificación de superficies generalmente es un plasma frío, ya que es generado a baja temperatura y tiene una densidad de plasma baja, generalmente menor a 1 % o alrededor de cien millones de electrones por centímetro cúbico.

La temperatura electrónica (T_e) y la densidad electrónica (n_e) serán obtenidas en este trabajo utilizando los datos obtenidos mediante una sonda simple de Langmuir, la cual será construida y calibrada. El proceso por el cual se calcularán estos dos parámetros se conoce como método de Druyvesteyn [16-18], el que consiste en evaluar la función de probabilidad de energía de los electrones (EEDF) utilizando la expresión:

$$f(E) = \frac{2\sqrt{2}m_e}{e^3A} \frac{d^2I_p}{dV^2} \quad (4)$$

Donde e y m_e son la carga y masa del electrón, V y I_p son el voltaje y la corriente medidos con la sonda de Langmuir y A es el área transversal de la sonda. Entonces podemos determinar la función de distribución de la energía de los electrones (EEDF o $F(E)$), n_e y T_e mediante las siguientes expresiones:

$$F(E) = \sqrt{E f(E)} \quad (5)$$

$$n_e = \int_0^{\infty} F(E) dE \quad (6)$$

$$T_e = \frac{2}{3n_e} \int_0^{\infty} E F(E) dE \quad (7)$$

Donde E es la energía de los electrones. Entonces en este trabajo ocuparemos la teoría anteriormente descrita para calcular la densidad y la temperatura electrónica del plasma formado en la atmósfera de Hidrogeno y Dióxido de Carbono.

1.1.4 Generación

Los dispositivos experimentales de descarga luminiscente constan, a grandes rasgos, de una pequeña cámara de vacío cilíndrica, ánodo hueco, muestra (que actuará como cátodo) y una ventana a través de la cual se recogerá la luz emitida. Un gas inerte a baja presión, se inyecta continuamente a través del ánodo y se bombea hacia el exterior mediante bombas de vacío [19].

Cuando se aplica el potencial a la muestra, los iones se moverán hacia el cátodo (muestra) y los electrones hacia el ánodo. En su camino colisionan con otros átomos ionizándolos, desprendiendo nuevos electrones, originando así una reacción en cadena.

Los átomos de gas que queden excitados debido a las colisiones emitirán fotones al regresar a su estado fundamental. Esta zona luminosa en una descarga luminosa es llamada “glow negativo” el cual se encuentra en los llamados “espacios oscuros” que corresponden a los sheaths adyacentes a los electrodos. La escasa densidad de electrones en los sheaths hace que no se produzcan excitaciones de átomos de gas en esta zona ni, por tanto, emisión de luz, de ahí su denominación.

Los plasmas están unidos a la superficie de las paredes que los contienen mediante una capa delgada y cargada positivamente denominada “sheath”. Este se crea como consecuencia de la mayor velocidad de los electrones con respecto a los iones. Los electrones procedentes del plasma llegan a la superficie antes y la cargan negativamente con respecto al conjunto del plasma, lo que ocasiona una repulsión de los electrones y una atracción de iones positivos, aparece un gradiente de potencial eléctrico en el plasma en contacto con la superficie.

El equilibrio se alcanza cuando el potencial del plasma (V_p) con respecto a las paredes adquieren un valor de varias veces la temperatura electrónica (T_e): $V_p \sim nT_e$

El sheath, cargado positivamente, será por lo tanto la transición que exista desde el plasma hasta la superficie [20]. El grosor de esta capa es de varias longitudes de Debye, un valor cuyo tamaño depende de varias características del plasma, como temperatura, densidad, entre otros. Para el mantenimiento de la población de iones y electrones (es decir, para que la descarga sea sostenible) es necesario no solo el mantenimiento de la diferencia de potencial, sino también la alimentación del plasma por electrones adicionales que se desprendan de la muestra.

Ahora bien, en un plasma los electrones experimentan también colisiones de tipo elástico, y con mucha mayor frecuencia que aquellas que conducen a ionización, ya que en los choques elásticos los electrones no necesitan poseer tanta energía [21]. En los choques elásticos entre dos partículas se conservan tanto el momento lineal como la energía cinética total del sistema. De este modo, al cabo de múltiples colisiones tienden a establecerse dos conjuntos bien diferenciados de distribuciones de energía cinética en la descarga, la de los electrones, a temperatura muy alta (debido a la gran energía que adquieren del campo eléctrico), y la del resto de partículas, más pesadas, prácticamente a temperatura ambiente.

Además de los procesos ya mencionados, en un plasma los electrones con suficiente energía pueden producir disociación molecular, liberando átomos y radicales altamente reactivos. Todas estas partículas, junto con los iones, pueden interactuar entre sí formando nuevas especies, o chocar con las superficies circundantes, quedando allí depositadas o arrancando nuevas partículas que se incorporan al plasma [22]. Los impactos electrónicos también pueden excitar átomos y moléculas a niveles de energía superiores al fundamental, aumentando su reactividad. La desexcitación espontánea de estas partículas proporciona una de las características más distintivas de los plasmas, que resulta apreciable a largas distancias: la emisión de luz visible y de radiación en todo el intervalo electromagnético, que permite además la identificación directa de las especies mediante su análisis espectral.

1.1.5 Aplicaciones (CO₂ y H₂)

CO₂

- El Dióxido de Carbono, el producto de oxidación completo de los combustibles fósiles y compuestos orgánicos, es el más importante gas del efecto invernadero. La remediación del CO₂ ha recibido una atención creciente, dado que no hay estudios sistemáticos realizados para monitorear la especie activa generada en la descarga luminiscente por espectroscopia de emisión del plasma, por lo tanto, el objetivo del trabajo fue realizar un análisis de la descarga luminiscente por caracterización óptica, mediciones de la temperatura de los electrones y la densidad de iones [23].
- Las aplicaciones de las descargas de corriente continua en estado puro de los gases moleculares y sus mezclas han ido aumentando en los últimos años. La principal razón es la carencia de datos confiables para muchas reacciones físico-químicas y procesos superficiales, sin embargo, ambas dificultades se han ido eliminando progresivamente en los últimos años para H₂, N₂, O₂ y el CO₂, que han permitido la aparición de algunos estudios cinéticos para interpretar experimentos realizados en mezcla de estos gases. Este trabajo proyecta adquirir conocimientos de espectroscopia de emisión y realizar mediciones de temperatura de electrones y densidad de iones en una mezcla de gases de descarga luminiscente de CO₂ y N₂ a una presión total de 1.2 Torr empleando una Sonda doble de Langmuir [24].
- Hay varios tipos de estudio que muestran diferentes formas de producción del plasma para disociar la molécula de CO₂, que incluyen descargas de barrera dieléctrica, descarga de resplandor, descarga corona, descarga de microonda y el uso de mezcla de gases nobles, tales como He y Ar. En el presente trabajo se investiga el efecto de la adición de la mezcla de gases nobles antes mencionados en la conversión de CO₂ en una descarga luminiscente variando el porcentaje de los gases (He y Ar) en la mezcla para obtener diferentes plasmas [25].
- La molécula de CO₂ es una de las más estudiadas por la importancia de la física atmosférica de la atmosfera planetaria. CO₂ toma un papel importante en la formación y destrucción de iones de oxígeno positivos y negativos. Una posible solución para

mitigar las altas concentraciones de este gas en la atmosfera es la utilización del plasma para romper la molécula en Monóxido de Carbono (CO) y Oxígeno (O) que tiene aplicaciones en la industria química. Este trabajo se centró en el estudio de la mezcla de Ar-CO₂ y su análisis con espectroscopia óptica de emisión (OES). Todo esto por sonda simple de Langmuir, el cual tiene como objetivo entender el papel de esta mezcla en la mejora de generación de especies activas de plasma de CO₂ [26].

H₂

- El rápido desarrollo de las fuentes de plasma atmosférico no térmico (frío) desde el siglo pasado condujo a un nuevo campo de investigación y aplicaciones de las descargas de plasma sumergidas en líquidos. Entre muchas aplicaciones de tales sistemas para, por ejemplo, recubrimientos o producción de Nano partículas y nanotubos. Aplicaciones con enfoque principal en la producción de hidrógeno. Los transportistas han mejorado dramáticamente el desarrollo de diferentes métodos para la producción del hidrógeno como combustible alternativo respetuoso con el medio ambiente. La utilización de plasmas de descarga de gas para este propósito, en particular los plasmas sumergidos, muestra resultados muy prometedores. Los procesos basados en plasma que utilizan etanol con agua como fuente de hidrógeno son de particular interés debido al bioetanol accesible como producto de desecho [27].
- Las propiedades físicas y químicas del carbono tipo diamante. Las capas (DLC) lo convierten en un candidato ideal para aplicaciones, como máquinas, herramienta, recubrimientos ópticos y alta temperatura electrónica. Proceso de deposición química de vapor asistida por plasma DLC se puede depositar en una variedad de sustratos por PACVD utilizando diferentes tipos de plasmas, es decir, un plasma de microonda, un plasma de resonancia de ciclotrón electrónico (ECR), un plasma acoplado por inducción (ICP). Estos procesos en general, utilizan CH₄ como materia prima que contiene carbono y Diluirlo con grandes cantidades de H₂ para obtener estas capas de DLC. Todas estas fuentes de plasma generalmente se mantienen en niveles bajos, o presión moderada para el proceso de deposición. Las condiciones de operación de baja presión moderada de estas fuentes de plasma resultan en bajas tasas de deposición y también en el requerimiento de costosos sistemas de vacío. Además, el alto costo de mantenimiento de los sistemas resulta en un aumento costo de producción [28].

1.2 Diagnóstico

1.2.1 Espectroscopia Óptica de Emisión (OES)

La Espectroscopia Óptica de Emisión, OES, es un área de las ciencias físicas y químicas bien establecidas cuyas técnicas no invasivas son ampliamente usadas para el diagnóstico de plasmas. La radiación proveniente de los plasmas que se hacen pasar directamente a un sistema dispersivo, produce un espectro que proporciona abundante e importante

información espectral acerca de la estructura de los átomos neutros excitados o ionizados en el plasma. Después de un análisis espectral apropiado que incluye el cálculo de diversos parámetros energéticos y su interpretación, estos pueden ser utilizados para caracterizar los plasmas y los procesos que en ellos ocurren [29]. El primer antecedente de esta técnica se dio en el siglo XVII cuando Newton descubrió que la luz blanca al pasar por un prisma de vidrio se descompone en luz con los colores primarios del arcoíris.

Espectros de emisión

La espectroscopia atómica es un método para el análisis de elementos y sus principios se remontan a los trabajos de Bunsen y Kirchhoff a mediados del siglo XIX [30]. El principio en el que se basa es el hecho de que cada elemento tiene energías bien definidas para cada uno de sus componentes, teniendo de esta manera que cada átomo tenga líneas espectrales específicas, este hecho evidencia la presencia de prácticamente cualquier elemento presente en la descarga.

La primera interpretación de estos espectros fue la realizada por Balmer en 1885, encontrando una ecuación que representaba las diferentes líneas de emisión del hidrógeno:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (8)$$

Donde $n_1 > n_2$. Los números $n_1 = 1, 2$ y 3 representan las series de Lyman, Balmer y Paschen, respectivamente. Estos números se relacionan a los niveles energéticos en sus orbitas alrededor del núcleo. Como se ha explicado anteriormente, cuando un átomo (o ion) se excita es posible que se relaje a otro estado menos excitado (si la transición está permitida) mediante la emisión de un fotón. La longitud de onda de este fotón es identificativa de un salto energético concreto que se puede relacionar con el elemento al que pertenece el átomo inicial dando lugar al análisis cualitativo. Además, la intensidad de la línea de emisión se relaciona con la densidad de átomos en el estado excitado lo cual podría permitir el análisis cuantitativo.

Las técnicas de espectroscopia de emisión óptica proveen también la información acerca de los parámetros físicos del plasma, permitiendo así calcularse a través del ensanchamiento de las líneas de emisión, magnitudes como la temperatura o la densidad electrónica. Para llevar a cabo estos estudios es necesario recoger la señal luminosa emitida por el plasma en cuestión, separar los fotones según su diferente longitud de onda para finalmente detectar y cuantificar dicha emisión.

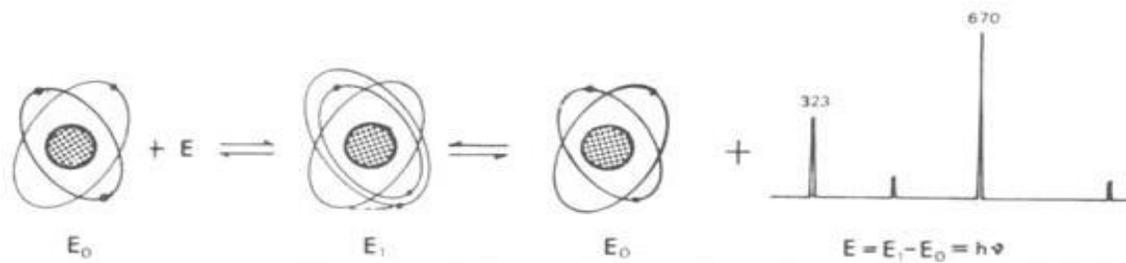


Figura 4. Proceso de excitación de un átomo.

La captación de luz se suele llevar a cabo mediante sistemas ópticos compuestos por lentes, espejos y/o fibras ópticas que conducen los fotones hacia la fase de análisis y detección. En dicha fase se cuenta con dos elementos principales: los elementos de dispersión que separan los diferentes fotones y los detectores que cuantifican los fotones previamente dispersados.

El principio de la espectroscopia de emisión óptica se basa en el cambio en la energía electrónica de átomo o molécula. Un átomo o molécula, en un estado electrónico excitado i , con energía E_i puede caer en un estado de menor energía j con energía E_j por medio de una emisión espontánea de un fotón de energía $h\nu_{ij}$ igual a la diferencia entre los dos niveles implicados por:

$$h\nu_{ij} = E_j - E_i \quad (9)$$

Con h como la constante de Planck y ν_{ij} la frecuencia del fotón.

Los espectros atómicos tienen líneas casi mono energéticas o bien picos definidos correspondientes a las transiciones entre diferentes estados electrónicos. Sin embargo, las moléculas tienen un mayor número de estados electrónicos, y también tienen estados vibracionales y rotacionales superpuestos sobre sus estados electrónicos. Las pequeñas diferencias de energía entre los estados de vibración y de rotación, la ampliación de energías de emisión causados por colisiones, y el movimiento de las moléculas emitidas, produce que la emisión se superponga y forme bandas de emisión en longitudes de onda fácilmente identificables.

Un factor que tiene importancia en la espectroscopia óptica de emisión cuando se aplica en plasmas, es la presión, ya que, a presiones altas, las colisiones amplían la energía de emisión, pero esta ampliación no se observa generalmente en las descargas de baja presión [31]. Otros mecanismos para la emisión óptica son quimioluminiscencia en la que el exceso de energía de una reacción química exotérmica emite luz.

Se habla de espectroscopia de emisión en plasma si la radiación electromagnética emitida por el plasma es detectada y resuelta espectralmente, esto es, analizada e interpretada en términos de los parámetros del plasma o parámetros característicos de la radiación de átomos, iones o moléculas, la espectroscopia de esos plasmas se reduce a espectroscopia del infrarrojo o rayos X.

La emisión de la radiación tiene más o menos los mismos principios físicos en todo el intervalo del espectro electromagnético que hasta ahora se han explicado, pero dependiendo de la técnica experimental que se utilice, pueden resultar varias interpretaciones de algunos intervalos del espectro. De 380 – 750 se encuentra el visible, este intervalo del espectro está bien definido por la curva de sensibilidad del ojo humano. El infrarrojo IR se extiende desde el infrarrojo cercano al infrarrojo lejano, que se encuentra junto al intervalo de las microondas, la cual empieza cerca de longitudes de onda de 1 mm, pero la transmisión a través del aire puede ser influenciada por la absorción con las bandas moleculares del vapor de agua, dióxido de carbono y otros constituyentes moleculares o contaminantes. El intervalo del espectro que se encuentra entre 200 – 380 se conoce como ultravioleta. Debajo de los 200 nm la radiación electromagnética es absorbida por el aire, primero por el oxígeno empezando a los 195 nm y después por el nitrógeno a los 145 nm [32].

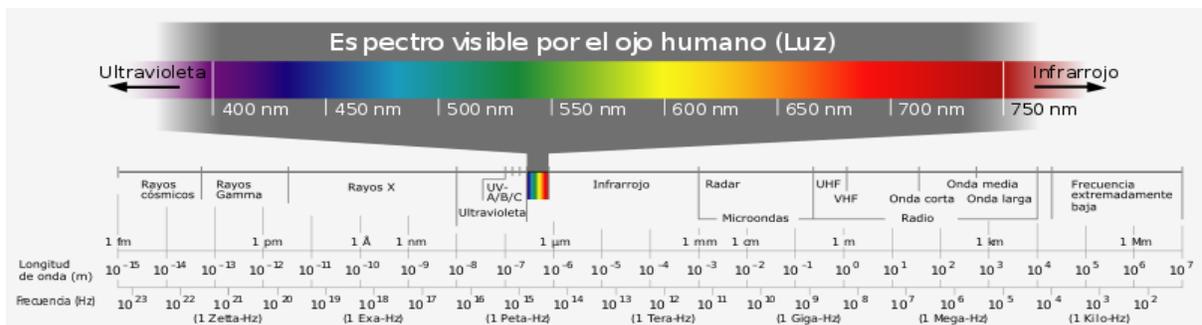


Figura 5. Espectro Electromagnético.

1.2.2 Corriente y voltaje

Corriente: En un circuito, la carga se produce por los electrones que pasan a través de un conductor o cable. También se puede producirse por iones en un electrolito o por iones y electrones. Las corrientes eléctricas pueden causar varios efectos, entre los cuales destacan los térmicos, magnéticos, entre otros. La ley de Ohm afirma que la corriente a través de un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial a través de los dos puntos de dicho conductor.

$$I = \frac{V}{R} \quad (10)$$

Dónde: I es la intensidad de corriente eléctrica, V es el voltaje y R es una resistencia.

La corriente se mide en amperios, hay dos tipos de corrientes, entre las que destacan: la corriente directa o continua y la corriente alterna. La primera se da cuando los electrones fluyen sin cambiar de sentido, como sucede en el caso de las baterías o paneles solares [33].

Mientras que la corriente alterna se caracteriza porque la magnitud y la dirección presentan una variación de tipo cíclico. En tanto, la manera en la cual este tipo de corriente oscilará es en forma senoidal, es decir, una curva que va subiendo y bajando continuamente. Gracias a esta forma de oscilación la corriente alterna logra transmitir la energía de manera más eficiente.

En otras palabras la corriente es el flujo de carga que pasa por un determinado punto de un circuito eléctrico, dichos electrones deben pasar por un conductor eléctrico para producir una carga.

Voltaje: Es la magnitud física, con la cual podemos cuantificar la diferencia de potencial eléctrico o la tensión eléctrica entre dos puntos, debido a que impulsa a los electrones a lo extenso de un conductor, es decir, que conduce la energía eléctrica con mayor o menor potencia, debido a que el voltaje es el mecanismo eléctrico entre los dos medios, basándose a que si los dos puntos establecen un contacto de flujo de electrones puede suceder una transferencia de energía de ambos puntos, porque los electrones son cargas negativas y son atraídas por protones con carga positiva, pero además los electrones son rechazados entre sí por tener la misma carga. El voltaje es el trabajo por unidad de carga que se ejerce por el campo eléctrico que se encuentra sobre una partícula cargada para que pueda moverse de un lugar a otro.

Un voltaje puede representar una fuente de energía o la energía perdida, usada o almacenada. También recibe el nombre de tensión eléctrica y se refiere a la presión capaz de empujar a los electrones a lo largo de un circuito

1.2.3 Sonda de Langmuir

En el estudio de la física de plasmas, se utiliza la técnica de sonda de Langmuir, propuesta en 1926, para medir la densidad del plasma, la temperatura electrónica y el potencial de un plasma. Una Sonda de Langmuir consiste en un cable, electrodo o disco de metal que se inserta en el plasma y se polariza eléctricamente respecto a un nodo de referencia, con el fin de recolectar corrientes de iones y electrones.

La teoría de la Sonda de Langmuir está bien establecida cuando las condiciones del plasma son tales que la longitud de Debye es mucho mayor que las dimensiones del electrodo. Cuando la longitud de Debye es grande con respecto a la dimensión del electrodo la teoría del movimiento orbital limitado aplica para calcular la respuesta I-V de la sonda; la forma del electrodo puede ser incluida en la teoría [34].

La longitud de Debye es una medida de la distancia de protección de los efectos de carga electrostática del electrodo visto por el plasma, cuando las dimensiones de la superficie son del mismo orden de magnitud o más pequeñas que las dimensiones del electrodo de la sonda de Langmuir, se pueden emplear teorías aproximadas bajo condiciones ideales del plasma.

1.2.3.1 Diseño de la sonda

Una sonda electrostática (o Sonda de Langmuir) funciona insertando uno o más electrodos polarizados con un potencial conocido dentro del gas ionizado, la corriente colectada por el electrodo será la portadora de la información del sistema. Dado que la superficie de la sonda esta polarizada con un voltaje, este generara un movimiento de las partículas cargadas a su alrededor, atrayendo a la superficie partículas que sean de signo contrario al potencial de polarización.

En un sentido más amplio, la Sonda de Langmuir mide los parámetros del plasma usando campos eléctricos para emitir o recoger partículas cargadas del plasma. Esta técnica de medición constituye un campo activo de investigación y son particularmente adecuadas para plasmas fríos de baja densidad, como descargas eléctricas de baja presión, plasmas ionosféricos y espaciales. La figura 6 muestra un esquema de la sonda más sencilla de Langmuir, es un electrodo metálico con una geometría bien definida (cilíndricas, esféricas o planas).

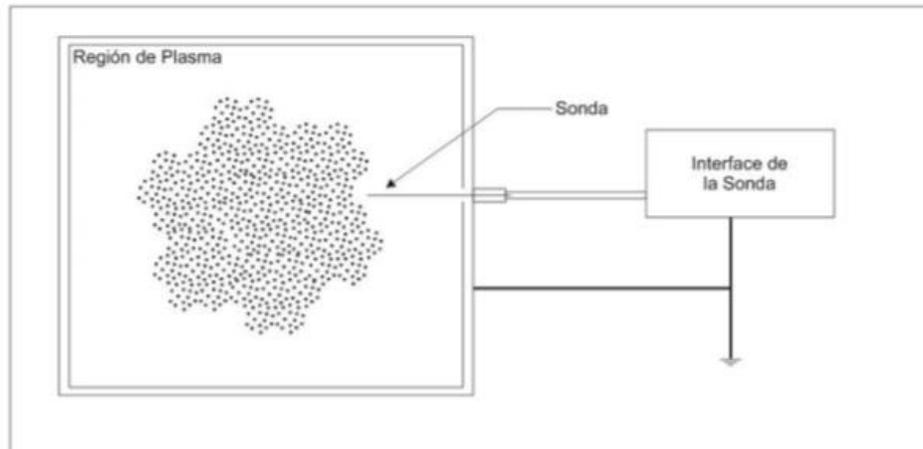


Figura 6. Esquema sonda simple de Langmuir.

Existen dos tipos de Sondas, la simple y la doble, cada una de ellas tiene como principal función dar los elementos necesarios para poder saber que pasa atómicamente y molecularmente dentro del plasma, en el caso de la sonda simple la prueba consiste de un solo electrodo cuyo potencial tiene como referencia la tierra de todo el sistema.

1.2.3.2 Sistematización

El método de Langmuir consiste en obtener curvas de corriente vs tensión (I-V) características de la sonda, como la mostrada en la fig. 7 mientras se aplica una tensión de polarización V en un barrido desde potenciales negativos hasta positivos. En la curva se representa la corriente total de la sonda que va de saturación iónica, pasando por un retraso de los electrones, donde la curva toma una forma ascendente, llegando a la saturación

electrónica. La tensión de polarización en la que la corriente total en la sonda cambia de signo, de negativo a positivo, se conoce como potencial flotante del plasma [35].

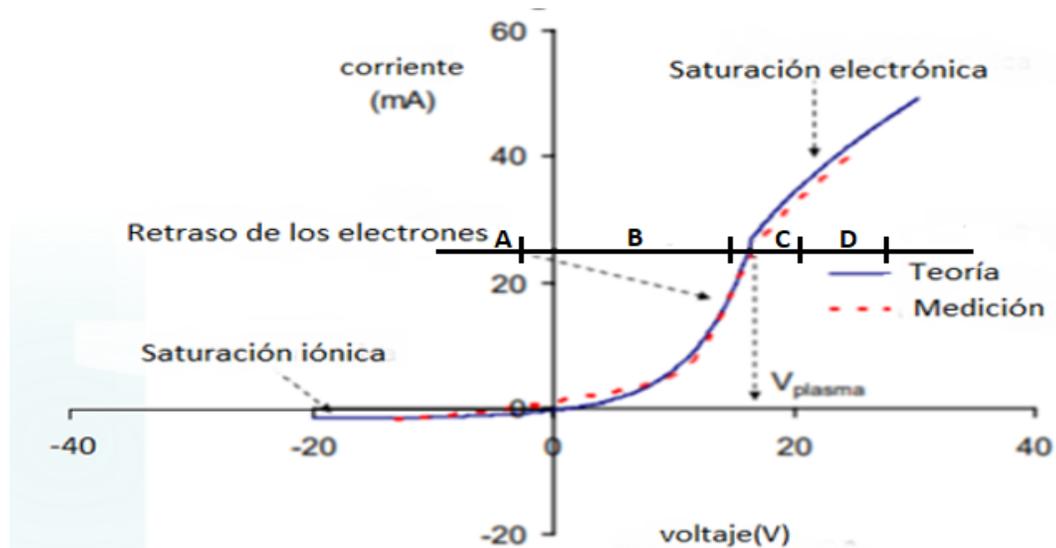


Figura 7. Curva asociada de corriente-voltaje de sonda simple de Langmuir.

A $V_p \ll 0 < V_s \rightarrow V \ll 0$

En esta región los electrones son repelidos del electrodo, mientras los iones positivos son fuertemente atraídos a este, es debido principalmente a la corriente iónica, al igual que en esta región se encuentra la saturación iónica.

B $V_p < 0 < V_s \rightarrow V < 0$

En esta región los iones positivos son atraídos y en este caso los electrones son repelidos con menor intensidad y aquellos que tengan la suficiente energía como para superar el potencial aplicado consiguen llegar al electrodo, esto es debido a la corriente electrónica como a la corriente iónica.

C $0 < V_p < V_s \rightarrow V > 0$

En esta región los iones positivos comienzan a ser repelidos, mientras que los electrones son atraídos, aquí la corriente iónica desaparece y la corriente sobre el electrodo es debidamente principal por la corriente electrónica.

D $0 < V_s < V_p \rightarrow V > 0$

En esta última región los iones positivos son repelidos del electrodo, mientras que los electrones son fuertemente atraídos hacia este, la corriente sobre el electrodo es debida principalmente a la corriente electrónica y en este caso está presente la saturación electrónica.

Aplicaciones

La Sonda de Langmuir se ha empleado para estudios teóricos del cálculo de la energía de los electrones y proporcionan información acerca de estos como su temperatura, función de distribución de la densidad y de la energía, también se utiliza para estudiar las fluctuaciones de la corriente de saturación de los iones. La energía tiene una gran influencia en la composición química del plasma: cuanto más alta es la energía, más alta es la densidad, la cual induce la mayor descomposición de las moléculas del gas.

La sonda debe ser situada cerca del centro de la zona o frontera del plasma, de manera que no sea intrusiva y no interactúe con el mismo, de esta manera se puede determinar el flujo de iones hacia el substrato, también se puede medir la densidad de electrones en la superficie de un blanco. De igual manera se puede obtener con precisión la corriente y los iones, los cuales desempeña un papel crítico en la determinación de la temperatura de electrones. Como ocurre con las elevadas densidades de las distribuciones Maxwellianas, es necesario modelar con precisión la corriente de los iones para obtener una densidad aproximada de los electrones. Obteniendo datos de la saturación de electrones y de iones por medio de un sistema de datos computarizados para la determinación de las características fundamentales del plasma a baja presión [36].

Los resultados obtenidos han demostrado que la función de distribución de energía de los electrones aparece como la suma de dos poblaciones Maxwellianas del electrón. La primera es la población de electrones rápidos, acelerado en la resonancia del ciclotrón del electrón y que produce el plasma, y el segundo corresponde al frío, los electrones del plasma producen los electrones rápidos. Las variaciones en los parámetros que caracterizan estas poblaciones de dos electrones, i.e. densidad y temperatura del electrón, en función de la posición en el campo magnético multipolar demuestra claramente que los electrones rápidos siguen atrapados en el campo magnético cerca de la estructura multipolar mientras que las poblaciones lentas, los electrones fríos del plasma difunden lejos de los imanes como una temperatura casi constante del electrón.

1.3 Gases atómicos y moleculares

1.3.1 Clasificación, importancia

La Teoría Cinética de Gases tiene sus raíces en los trabajos de Bernouille llevado a cabo alrededor de 1738 y fue desarrollado por Maxwell y Boltzmann entre los años 1858 y 1868, donde se demostró que un modelo cinético podría explicar una propiedad de los gases muy conocida. Esta propiedad se describe como una variante de la ley de Boyle: siempre y cuando la temperatura no cambie, la presión del gas es proporcional a su densidad.

Entre los destacados investigadores se encuentran James Prescott Joule (1818-1889) y Rudolf Clausius (1822-1888) quienes, a través de sus estudios, llegaron a la conclusión de que el calor está relacionado con la energía cinética de los átomos y las moléculas de una sustancia.

La Teoría Cinética de Gases surge para explicar las propiedades de los gases, donde las energías de interacción intermoleculares suelen ser pequeñas, se centran en las propiedades cinéticas de la molécula o átomos que los forman, es decir, en sus velocidades y en cómo estas determinan las propiedades del gas.

En principio, las propiedades observables de cualquier gas (presión, volumen y temperatura) están directamente ligadas a las moléculas que lo componen.

La teoría cinética molecular consta de cinco postulados que describen el comportamiento de las moléculas en un gas. Estos postulados se basan en algunas nociones físicas y químicas muy simples y básicas, aunque también involucran algunas suposiciones con el fin de simplificar los postulados [37].

1. Un gas consiste en un conjunto de pequeñas partículas que se trasladan con movimiento rectilíneo y obedecen las leyes de Newton.
2. Las moléculas de un gas no ocupan volumen.
3. Los choques entre las moléculas son perfectamente elásticos (esto quiere decir que no se gana ni se pierda energía durante el choque).
4. No existen fuerzas de atracción ni de repulsión entre las moléculas.
5. El promedio de energía cinética de una molécula es de $3kT/2$ (siendo T la temperatura absoluta y k la constante de Boltzmann).

Uno de los objetivos más importantes e interesantes de la física-química es la interpretación de las propiedades de la materia en función de los movimientos y distribuciones espaciales de los átomos y moléculas. Este objetivo ha sido prácticamente alcanzado en el estado físico-químico de los gases a bajas presiones con gran ventaja sobre el estudio de la materia en cualquier otra condición. La estructura de los gases a estas presiones es particularmente simple: tales gases constan de conjunto de moléculas que se mueven al azar en el espacio y que chocan entre sí con relativa poca frecuencia, es decir, las moléculas están tan alejadas que la mayor parte del tiempo ejercen poca influencia entre sí.

1.3.2 Definición química y características físicas

Se denomina gas al estado de agregación de la materia en el que las sustancias no tienen forma ni volumen propio, adoptando el de los recipientes que las contienen. Las moléculas que constituyen un gas casi no son atraídas unas por otras, por lo que se mueven en el vacío a gran velocidad, y muy separadas unas de otras, explicando así las propiedades:

- Las moléculas de un gas se encuentran prácticamente libres, de modo que son capaces de distribuirse por todo el espacio en el cual son contenidas. Las fuerzas gravitatorias y de atracción entre las moléculas son despreciables, en comparación con la velocidad que se mueven las moléculas.
- Los gases ocupan completamente el volumen del recipiente que los contiene.

- Los gases no tienen forma definida, adoptado de los recipientes que lo contiene.
- Pueden comprimirse fácilmente, debido a que existen enormes espacios vacíos entre unas moléculas y otras.
- Se dilatan, la energía cinética promedio de sus moléculas es directamente proporcional a la temperatura aplicada.

Las características físicas que presentan es que cualquier propiedad es medible, los cambios en las propiedades físicas de un sistema describen sus transformaciones y su evolución temporal entre estados instantáneos, estas propiedades a veces se denominan observables. Entre otras características se encuentran:

- Los gases ocupan completamente el volumen del recipiente que los contiene
- Los gases no tienen forma definida, adoptando la de los recipientes que lo contienen.
- Difusión
- Expansión
- Compresión

1.4 Reacciones atómicas y moleculares

1.4.1 Potenciales de ionización

La energía de ionización, también denominada potencial de ionización, el cual consiste en la energía que se debe suministrar a 1 átomo neutro, gaseoso y en estado fundamental, para llegar a arrancarle el electrón más débil que es retenido.

1^{er} Potencial de ionización.- Energía necesaria para arrancar un e^- de un átomo aislado en fase gaseosa en su estado fundamental y obtener un ion monopositivo gaseoso en su estado fundamental más un electrón sin energía cinética, se le asigna un valor positivo por tratarse de una reacción endotérmica.

2^{do} Potencial de ionización. - Energía necesaria para arrancar a un ion monopositivo gaseoso en estado fundamental y obtener un ion dipositivo en las mismas condiciones más un electrón los sin energía cinética.

Las energías de ionización miden, por lo tanto, la fuerza con que el átomo retiene sus electrones. Energías pequeñas indican una fácil eliminación de electrones y por consiguiente una fácil formación de iones positivos [38].

Los potenciales de ionización sucesivos para un mismo elemento crecen muy deprisa, debido a la dificultad creciente para arrancar un electrón cuando existe una carga positiva que le atrae y menos cargas negativas que le repelen. El conocimiento de los valores relativos de las energías de ionización sirve para predecir si un elemento tendera a formar un compuesto iónico o covalente. En un plasma los electrones adquieren energía del campo eléctrico y chocan con las moléculas del gas. Estas colisiones pueden causar la excitación y la ionización

de dichas moléculas y lo que a su vez puede producir varios tipos de reacciones en el plasma. La probabilidad de que se presente cada una de las diferentes reacciones está en función de su sección transversal de reacción y del número de colisiones que sufran las partículas, tanto la sección de reacción como el número de colisiones dependen de la energía. Por otra parte, el número de colisiones que sufren las partículas por unidad de volumen, está determinado por sus presiones parciales y por su velocidad relativa promedio.

1.4.2 Clasificación de los procesos atómicos y moleculares

Dentro de los principales procesos atómicos y moleculares ocurridos dentro de la descarga luminiscente, como podemos ver en la tabla 1, encontramos tres clasificaciones: por electrones, fotones e iones.

El presente trabajo se centra en el estudio de los procesos antes mencionados, en la clasificación por electrones para un plasma frío a bajas presiones. A continuación, definimos de manera breve estos procesos:

- Ionización. – Es cuando un electrón no está unido a un átomo o molécula, convirtiendo los átomos o moléculas en iones cargados positivamente.
- Excitación. - Es cuando un átomo recibe un aporte de energía y salta de orbital en estado fundamental a una órbita exterior, en el proceso de relajación a su estado base, este exceso de energía lo liberara en forma de luz, el aporte de energía se da por impacto de otra partícula. De igual manera se da para los iones.
- Efecto Penning. - Es el nombre que se le da al proceso que supone la transferencia de energía de excitación de un átomo neutro a otro.
- Dispersión Elástica. - Es la separación y el choque de dos partículas sin pérdida de energía en la colisión, este proceso se da de igual manera en los iones.
- Disociación. - Es el proceso de impacto de energía suficiente para romper la unión de 2 o más moléculas.
- Ionización Disociativa. - Es el proceso de emisión de un fotón por un exceso de energía que sufre el electrón en su respectivo orbital del átomo, de igual manera es la energía suficiente para la disociación de la molécula sobre la que está actuando esta fuerza.
- Recombinación. - Es el proceso de combinación de la ruptura de moléculas de distinta especie, actuando una energía necesaria para la unión de estas mismas.
- Fotoionización. - Es la absorción de fotones de suficiente energía para producir ionización.
- Intercambio de carga. - Es la propiedad que presentan los iones de cambiar de carga al ceder electrones a otra molécula.

Electrones	$e + A \rightarrow A^+ + 2e$ $e + A \rightarrow A^* \rightarrow e + A + h\nu$ $e + A^* \rightarrow M^+ + 2e$ $e + A \rightarrow e + A$ $e + AB \rightarrow e + A + B$ $e + AB \rightarrow 2e + A^+ + A$ $e + A^+ + M \rightarrow A + M$	Ionización Excitación Efecto Penning Dispersión Elástica Disociación Ionización Disociativa Recombinación
Fotones	$A + h\nu \rightarrow A^+ e$ $A^- + h\nu \rightarrow A + e$	Ionización Fotoionización
Iones	$A^+ B \rightarrow A + B^+$ $A^+ + B \rightarrow A^- + B$ $A^+ + B \rightarrow A + B^- \rightarrow A^+ B + h\nu$ $A^+ + e + B \rightarrow A + B$ $A^+ + BC \rightarrow A^+ + B + C$	Intercambio de carga Dispersión elástica Excitación Recombinación Disociación

Tabla 1. Procesos atómicos y moleculares.

Capítulo 2

2.1 Experimentación (Plasma)

2.1.1 Sistema experimental

Para obtener los espectros de emisión de una descarga luminiscente, se utilizó el dispositivo experimental que se encuentra en el Laboratorio de Física Avanzada de la Universidad Autónoma del Estado de México (figura 8), el cual cuenta con cuatro cámaras de vacío de acero inoxidable, electrodos planos y circulares de cobre, un sistema de bombas de vacío, una bomba de vacío turbomolecular, suministros de gas, gases (CO_2 , H_2 , Ar y N_2), fuentes de voltaje, espectrómetros, sonda de Langmuir (simple y dobles) y distintos medidores.

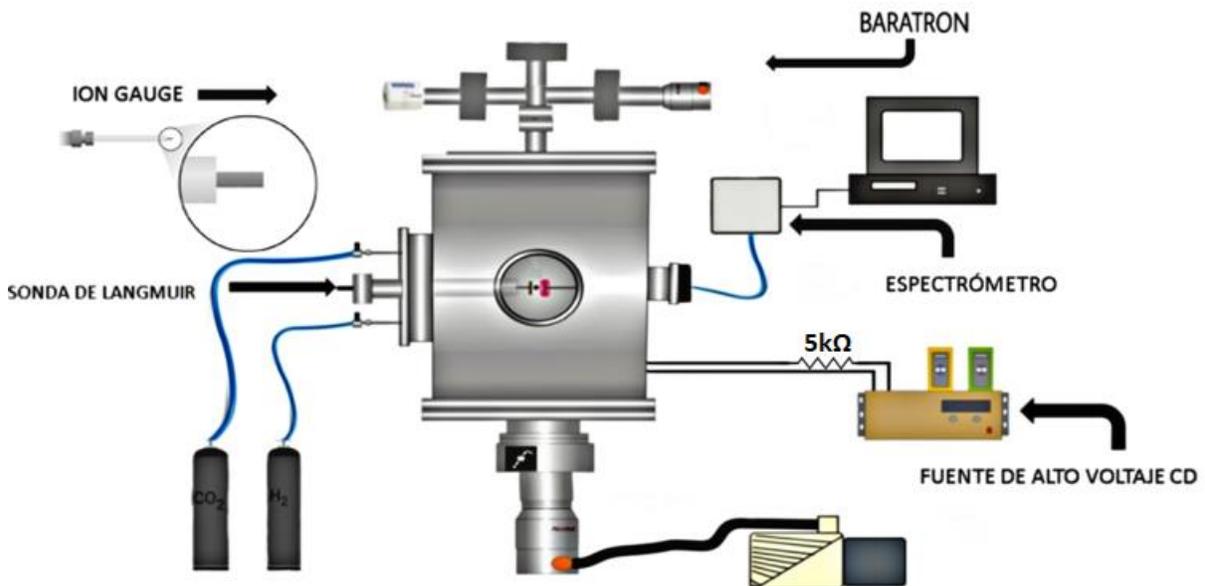


Figura 8. Esquema del sistema experimental.

Antes de producir cualquier descarga luminiscente en este dispositivo, se debe limpiar con acetona la cámara de vacío ya que es un líquido que se evapora fácilmente y no deja residuos. Transcurrido el tiempo de limpieza y habiendo colocado los sellos de manera correcta, verificando que las bombas estén conectadas adecuadamente y no exista fuga al realizar vacío en todo el sistema, se colocan los electrodos dentro de la cámara a una separación de 1 cm, se suministra el gas (CO_2 y H_2) y se estabiliza el sistema para que finalmente se aplique el voltaje a los electrodos de diámetro de 3 cm de cobre y se produzca la descarga luminiscente.

La luminiscencia producida por la descarga eléctrica es detectada por una fibra óptica que conectada al espectrómetro se encuentra colocada en la ventana de cuarzo de la cámara de vacío. El espectrómetro envía la señal a una computadora mediante una interface (LabVIEW), la computadora tiene instalado el software (Ocean View) el cual se corre para obtener los datos del espectro correspondiente a la descarga generada.

Durante el proceso de ionización de un gas o una mezcla de gases atómicos y moleculares se puede observar varios procesos que producen especies eléctricamente cargados o neutros, la mezcla de las partículas resultantes es conocida como el cuarto estado de la materia.

2.1.2 Sistema de Vacío

En todo sistema para descargas eléctricas es necesario la generación de un vacío previo, para eliminar impurezas o restos de materiales que puedan existir dentro de la cámara que funcionen como contaminantes, afectando los resultados de las medidas realizadas, generar este vacío da un control del manejo de las bajas presiones con la que se trabajó, garantizando que los efectos de la descarga se deban solo al comportamiento del gas administrado a la cámara de vacío.

El vacío que se realizó a este tipo de dispositivos lo podemos obtener por distintos sistemas de bombas, por ejemplo: Bombas mecánicas (secas o con aceite), difusoras o turbo moleculares. El tipo de bombas (mecánica y turbo molecular) que se utilizaron en el sistema experimental dependió del vacío que se necesitó generar. En el caso de la cámara usada en el laboratorio es necesario utilizar un vacío previo del orden de 10^{-3} Torr, de este modo se optó por una bomba mecánica de paletas rotatorias, Varian DS-302, los intervalos de trabajo de esta bomba van desde presiones de 0.0 Torr a presiones atmosféricas.

2.2 Espectrómetro

Un espectrómetro tiene la función de doblar un rayo de luz con un prisma o una rejilla de difracción, si este rayo está compuesto por más de un color se forma un espectro, puesto que los diferentes colores son refractados o difractados en diferentes ángulos. Se puede medir el ángulo para diferente color y obtener información sobre la atmósfera de la cual emana la luz. En el presente trabajo se trabajó con el espectrómetro (Ocean Optics Flame-T-UV-VIS)

2.3 Fuente de voltaje

El suministro de voltaje se logra por la fuente regulada de 1 kW (Spellman SA4), con capacidad de voltaje máximo de 10 kV y una corriente máxima de 1000 mA.

2.4 Báratron capacitivo

El Báratron capacitivo (mks Dual Capacitance Manometer) mide la presión real. Su función consta generalmente de transductores independientes que generalmente requiere una fuente de alimentación de $\pm 15V$ y emiten una señal de presión de 1-10V que es directamente proporcional a la presión. Esto significa que la medición es insensible al tipo de gas que se está midiendo. Otros medidores, como Pirani, termopar e indicadores de iones, no miden la presión real y, por lo tanto, sus lecturas serán sensibles al tipo de gas.

2.5 Bomba Turbomolecular

Una bomba de vacío turbo molecular funciona por el principio de turbina de alabes. Un rotor de alabes, girando, a una gran velocidad, impulsa las moléculas de gas de forma que su movimiento aleatorio inicial cambia a un flujo controlado en el interior del cuerpo de la bomba. El proceso de bombeo mueve las moléculas de gas, a través de la bomba desde la boca de aspiración a baja presión hasta la zona de alta presión en la boca de escape. Para crear este flujo de moléculas de gas, los bordes de los alabes del rotor deben girar a alta velocidad ($>30.000 \text{ min}^{-1}$)

La tecnología integrada de arrastre molecular permite una mayor presión entre etapas con lo que se logra una alta eficiencia del sistema con bombas primarias más pequeñas.

2.6 Experimentación (Sonda de Langmuir)

La Sonda simple de Langmuir como se puede apreciar en la Fig. 9 empleada en el estudio comprende de un alambre de Tungsteno de radio de 0.25 mm, la sonda fue ubicada dentro de un vidrio capilar con un diámetro de abertura de 0.7 mm dentro del tubo capilar. La punta del cable se extendió 1.23 cm más allá del capilar del vidrio para formar la sonda.

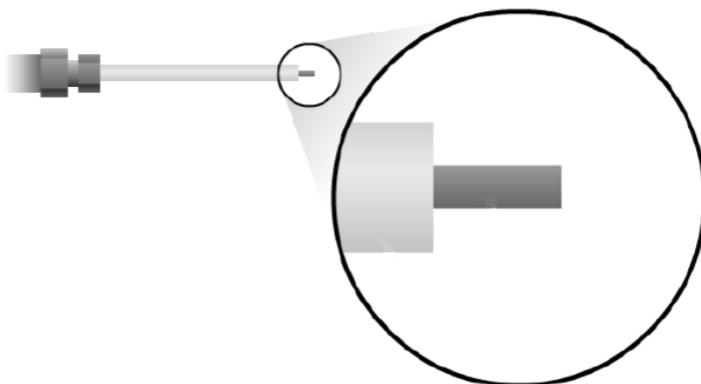


Figura 9. Diseño sonda simple de Langmuir.

El extremo del capilar del vidrio fue soldado con un aislamiento POXIPOL, dejando fuera la punta del alambre. La sonda estaba alineada paralelo a los electrodos de cobre planos, la punta de la sonda se encontraba cerca de la frontera de los electrodos para la recolección de los datos que estaría arrojando. Esta podía ser movida en las direcciones hacia adelante y hacia atrás utilizando un movimiento manual.

La corriente de la sonda se monitoreo utilizando un multímetro. El tiempo de exploración para cada curva I-V fue aproximadamente de 5-10 min. La contaminación es un problema vital durante la adquisición de datos, en el presente trabajo se limpió adecuadamente antes de tomar cada lectura, la cámara fue evacuada a presión base, para garantizar un alto nivel de reproducibilidad, así mismo se purgaron las válvulas de paso de los gases que se

emplearon en el trabajo (CO_2 , H_2), evitando de todas las maneras posibles la existencia de contaminación o una mezcla de gases diferente a la que se estudió.

Capítulo 3

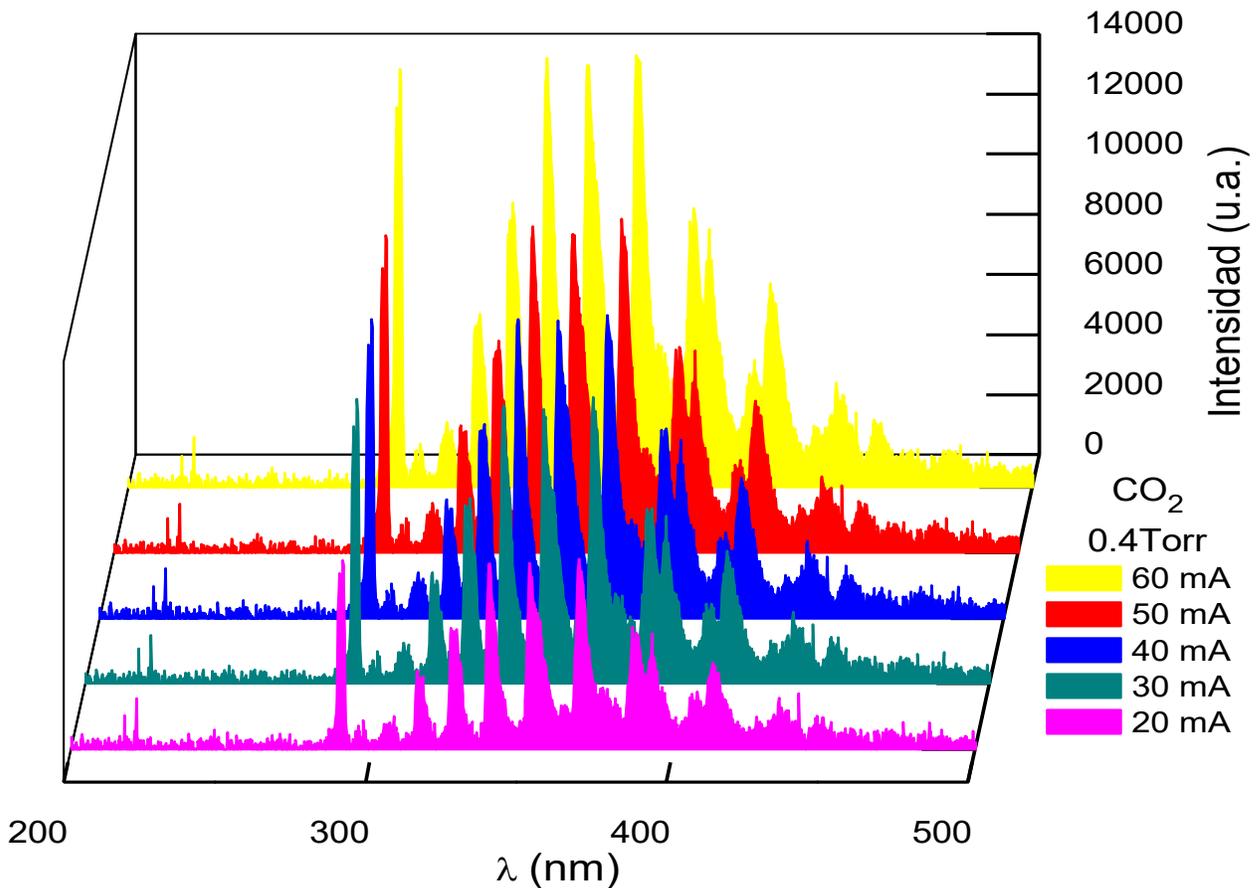
3.1 Resultados

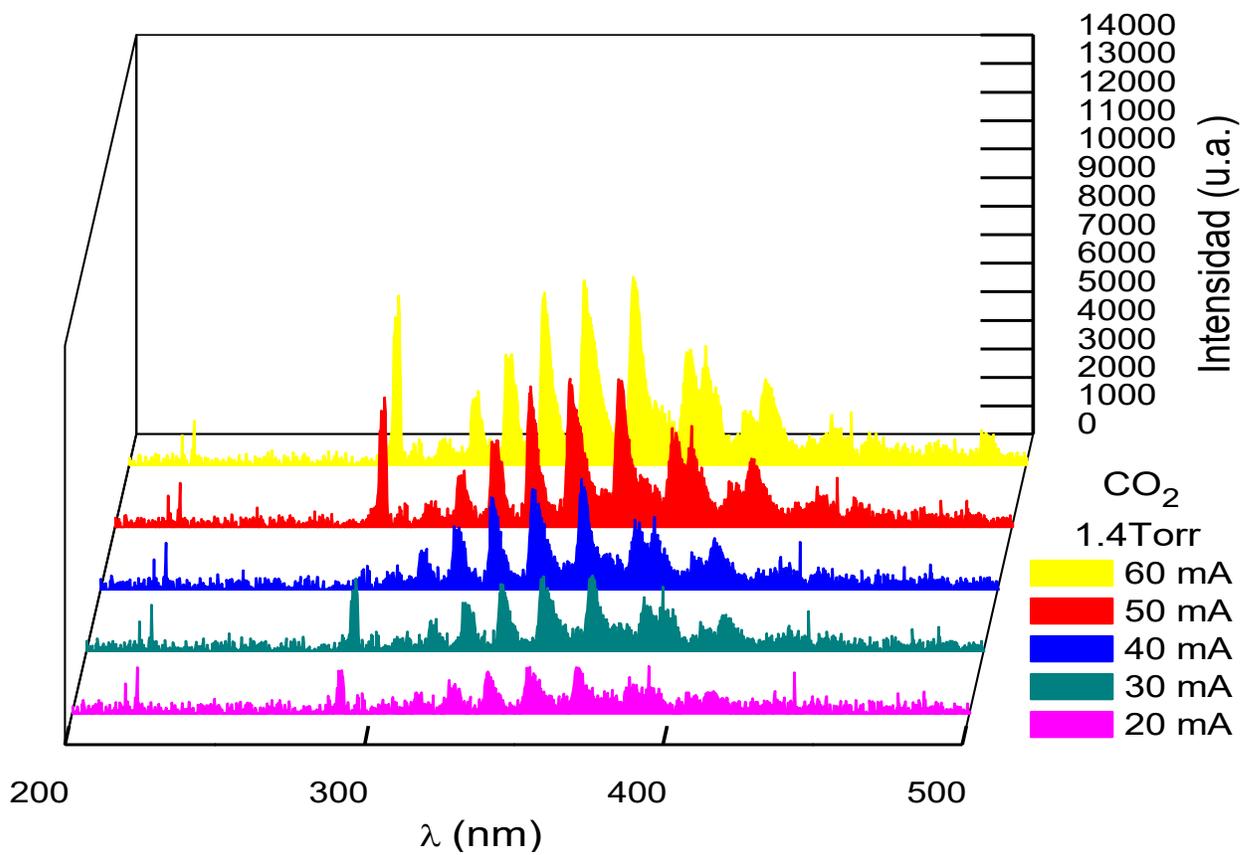
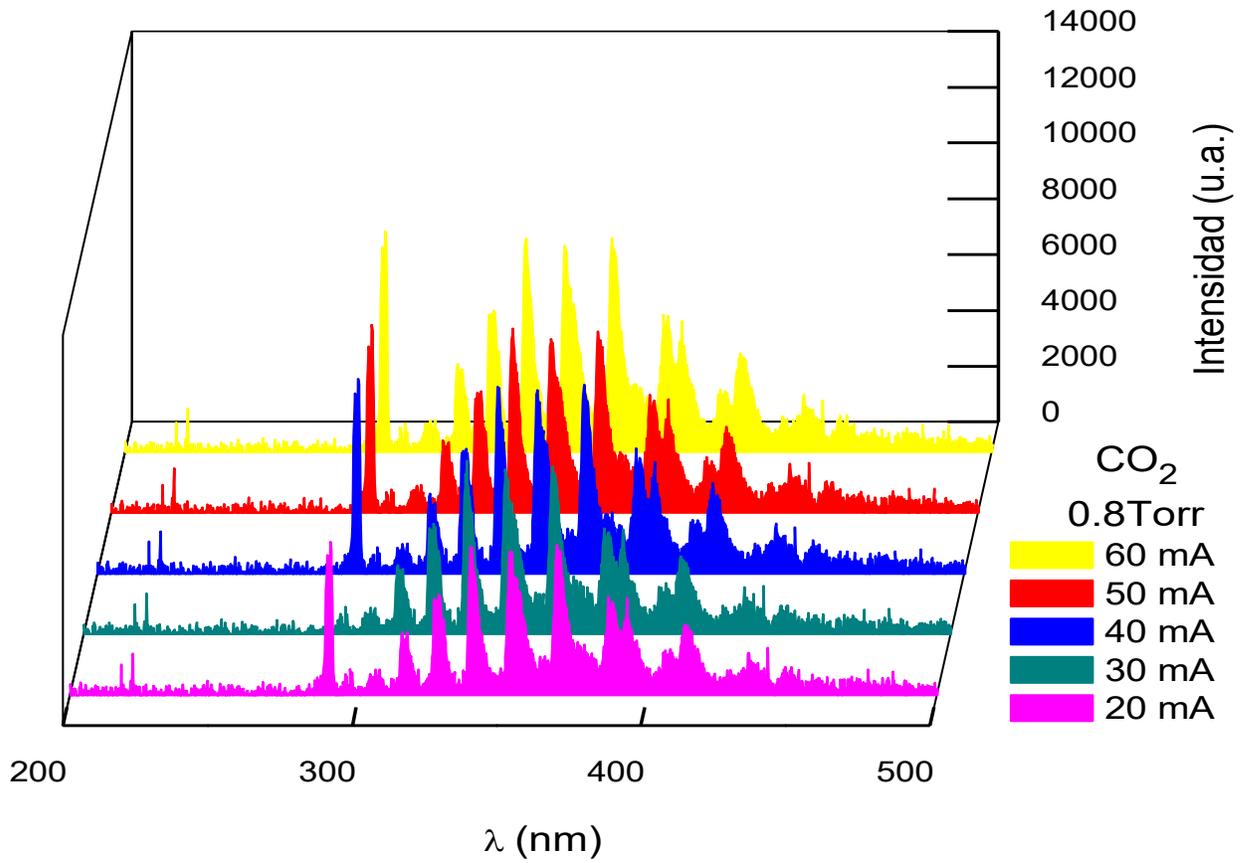
Espectros Ópticos de Emisión

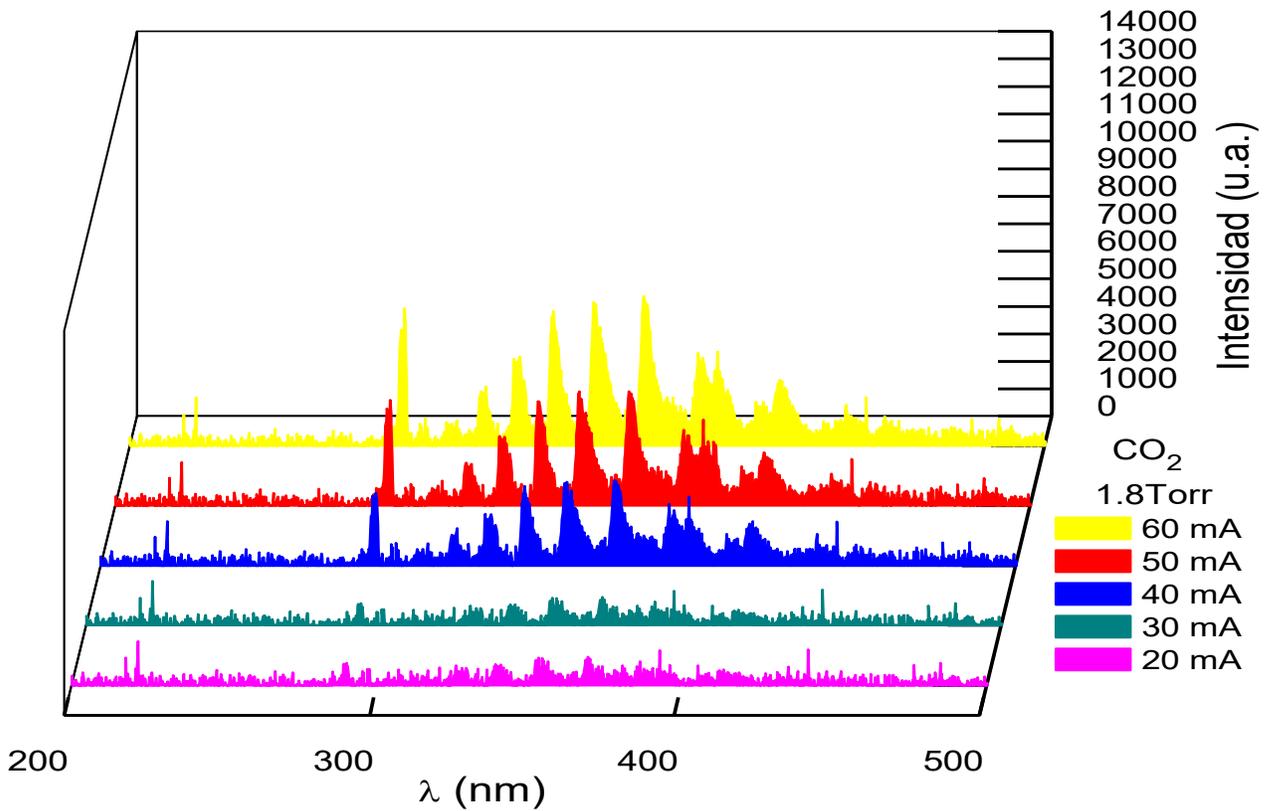
Los Espectros obtenidos en la descarga luminiscente se presentan en relación a las presiones y corrientes con las que se desarrolló el experimento. Las gráficas que se presentan a continuación se observan con respecto a parámetros fijos, las cuales son para Presión de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 Torr y corriente de 20, 30, 40, 50 y 60 mA en el plasma de Dióxido de Carbono (CO₂), Hidrogeno (H₂) y la mezcla de ambos (CO₂/H₂) respectivamente. El tratamiento se realizó para cada presión con las respectivas corrientes mencionadas y así sucesivamente.

Se muestran las gráficas donde se aprecia un cambio considerable en el desarrollo de la descarga para cada gas analizado, las presiones presentadas fueron a 0.4, 0.8, 1.4, 1.8 Torr para cada gas respectivamente y su mezcla, se observan espectros entre 200 a 900nm.

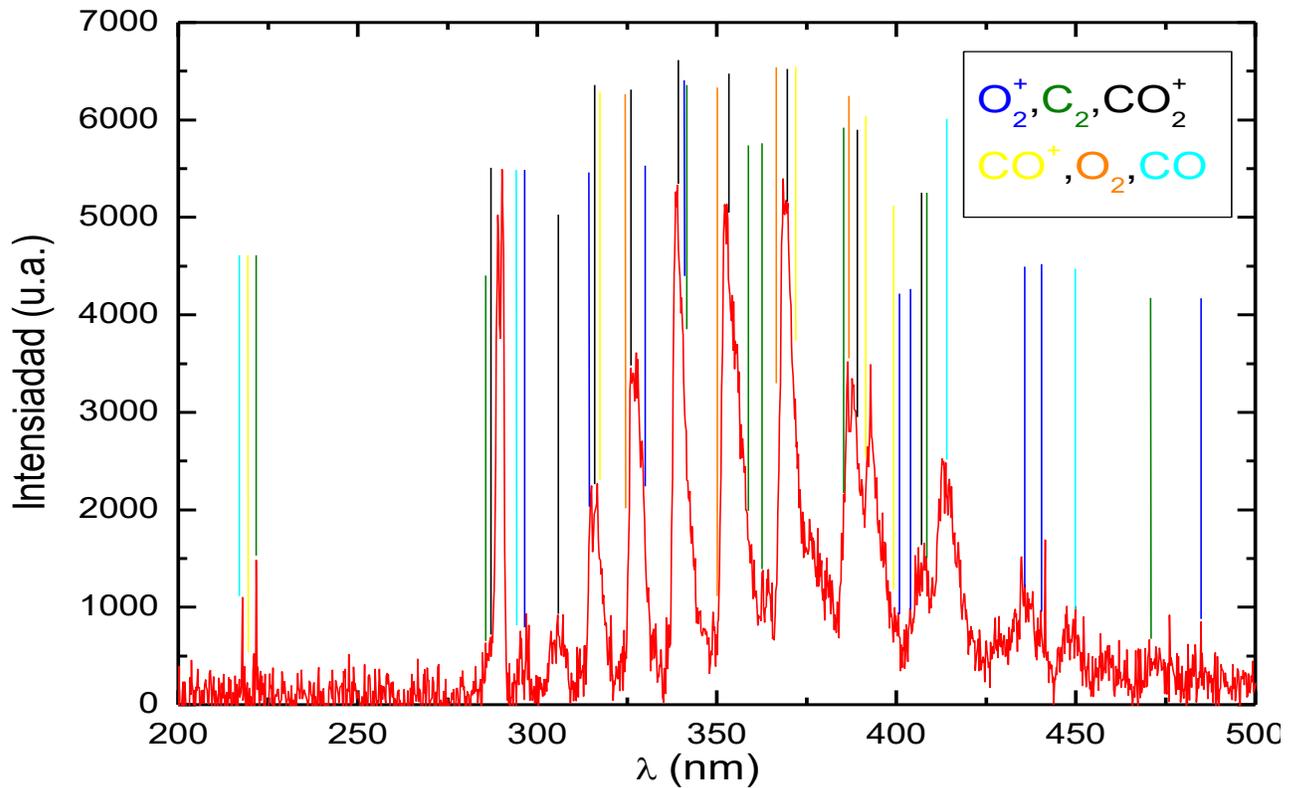
Dióxido de Carbono (CO₂)







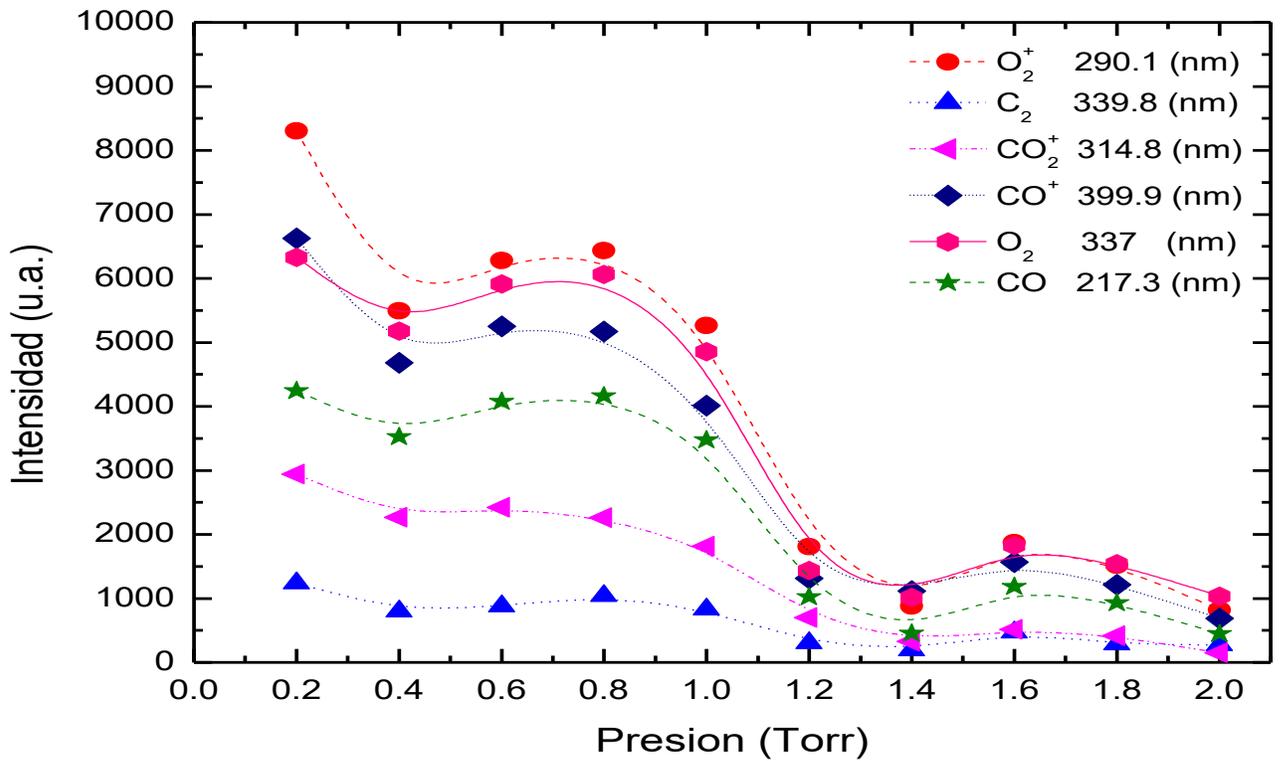
Grafica 1. Espectros Ópticos de Emisión de la descarga luminiscente de Dióxido de Carbono a presiones de 0.4,0.8,1.4,1.8 Torr.



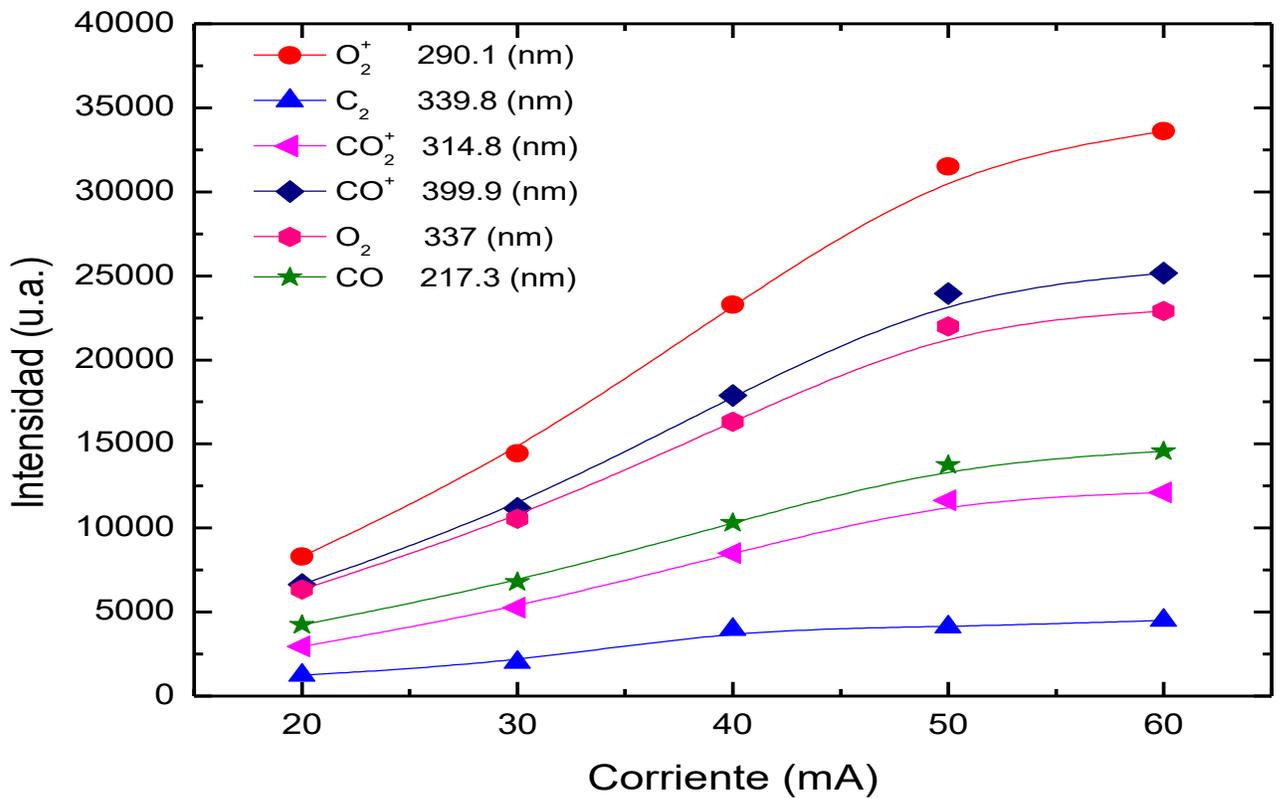
Grafica 2. Espectro Óptico de Emisión de una descarga luminiscente de Dióxido de Carbono.

No. Especie	Especie	λ Experimental	λ Teórica	Transición
1	O_2^+	290.1	290.7	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		304.7	304.3	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		314.17	314.1	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		330.6	330.3	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		339.9	339.3	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		408.7	408.2	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		411.59	411.5	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		436.8	436.3	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		439.93	439.9	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		487.9	487.7	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
2	C_2	221.78	221.6	$e^1\Sigma_g^+ - b^1\Pi_u$
		285.8	285.5	$B^3\Pi_g - X^3\Pi_u$
		339.81	339.6	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		340.61	340.5	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		358.8	358.6	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		362.9	362.7	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		385.4	385.2	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		410.2	410.2	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
473.7	473.7	$A^3\Pi_g - X^3\Pi_u$		
3	CO_2^+	287.6	287.4	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		305.92	305.83	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		314.86	314.95	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		326.7	326.46	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		339.67	339.45	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		353.38	353.38	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		369.5	369.18	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		387.24	387.05	$A^2\Pi - X^2\Pi$
407.4	407.07	$A^2\Pi - X^2\Pi$		
4	CO^+	218.8	218.5	$B^2\Sigma - X^2\Sigma$
		316.73	316.81	$A^2\Pi - X^2\Sigma$
		370.5	370.5	$A^2\Pi - X^2\Sigma$
		390.6	390.8	$A^2\Pi - X^2\Sigma$
		399.91	399.7	$A^2\Pi - X^2\Sigma$
5	O_2	323.6	323.2	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
		337	337	$A^3\Sigma_u^+ - X^3\Sigma_g^-$
		351.9	351.7	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
		367.45	367.1	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
		386.14	386.1	$C^3\Delta_u - a^1\Delta_g$
6	CO	217.3	217.3	$A^1\Pi - X^1\Sigma$
		297.86	297.7	$b^3\Sigma - a^3\Pi$
		413.76	413.89	$B^1\Sigma - A^1\Pi$
		450.7	450.5	$d^3\Delta - a^3\Pi$

Tabla 2. Especies observadas mediante OES de una descarga de Dióxido de Carbono.

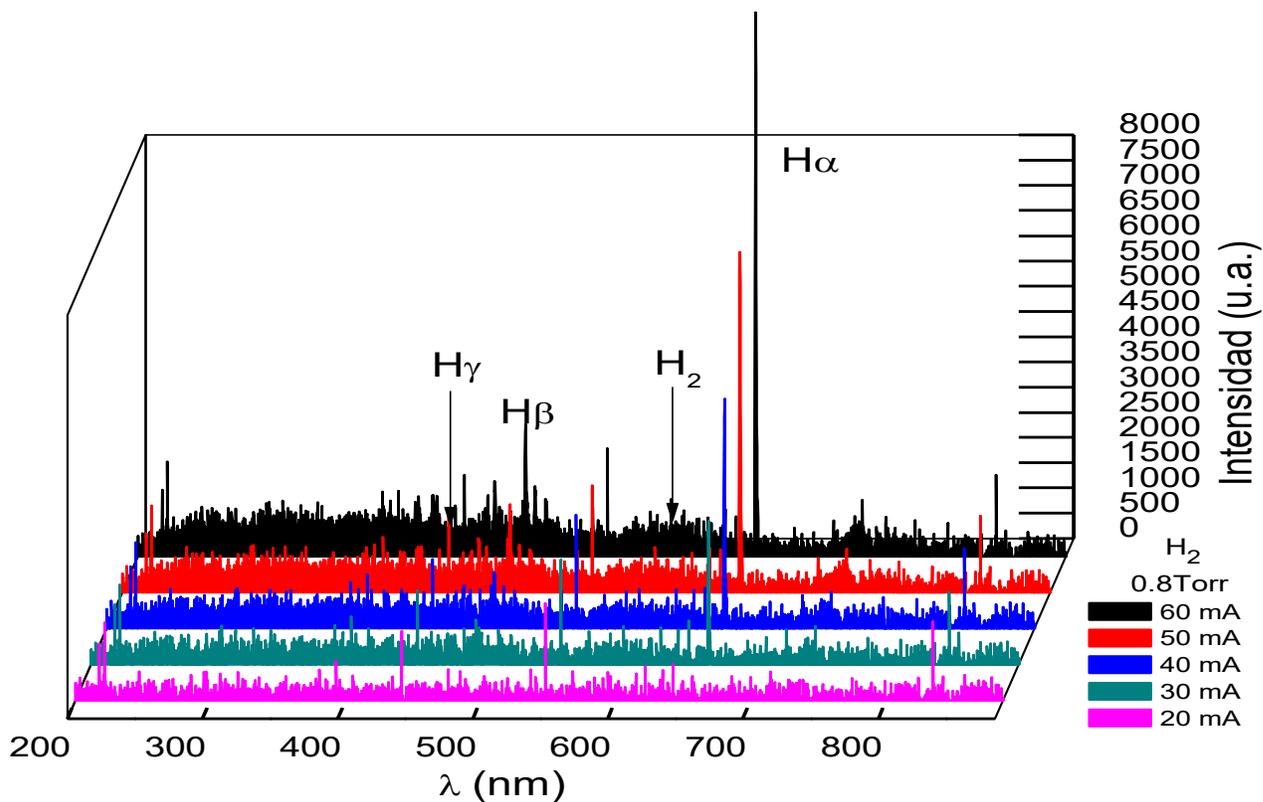
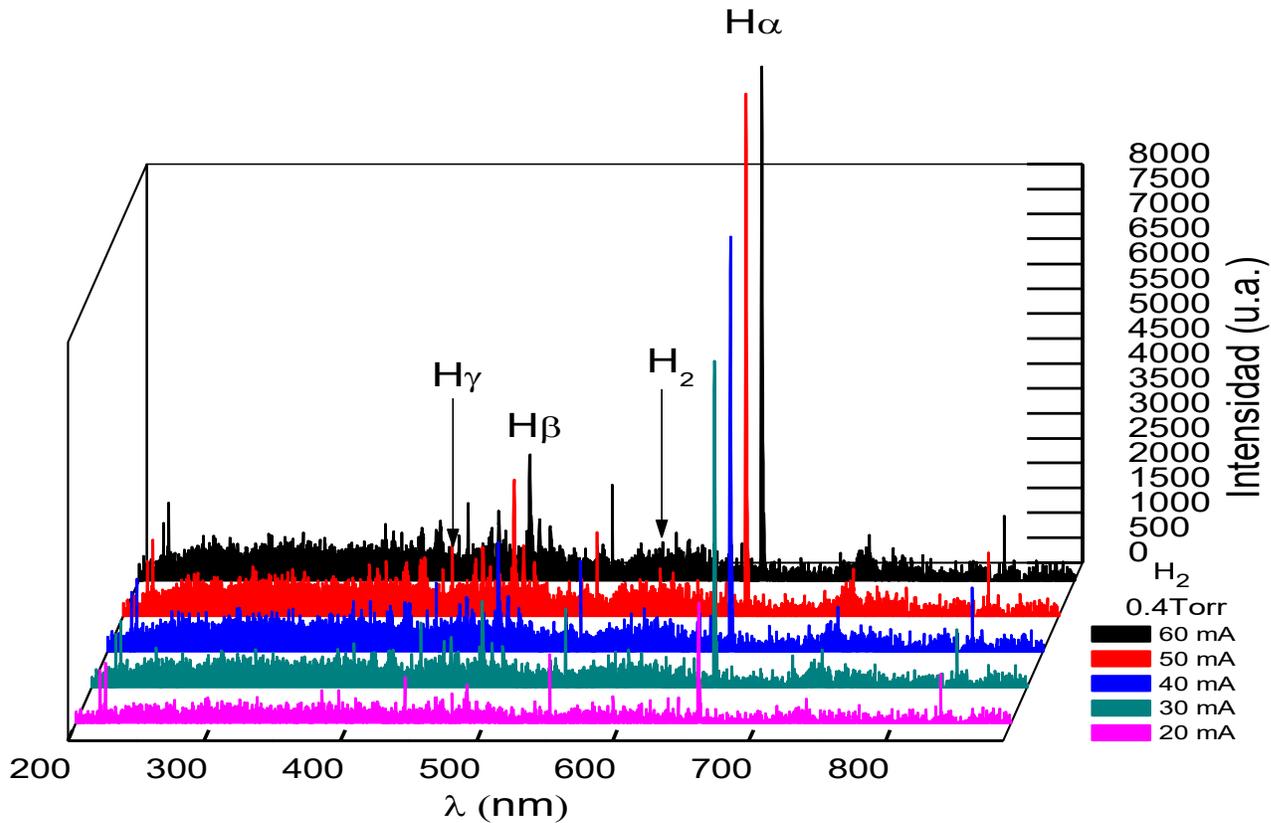


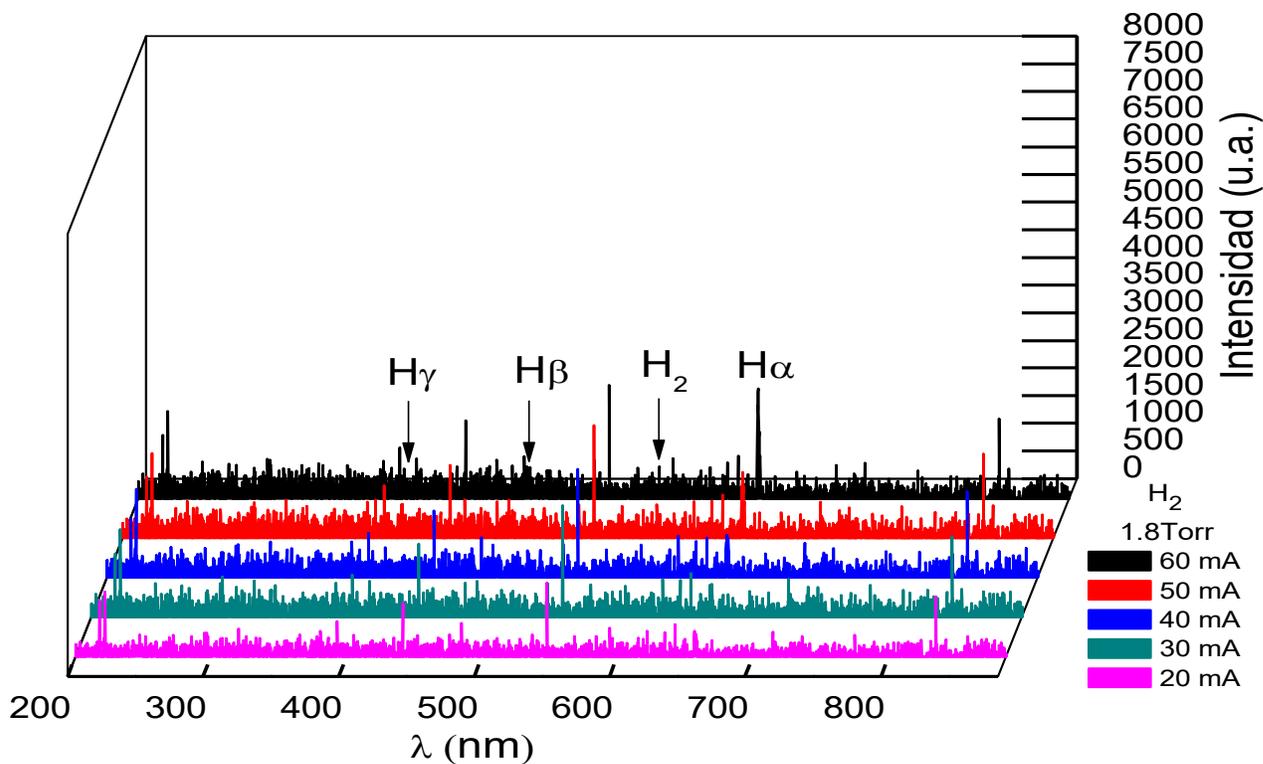
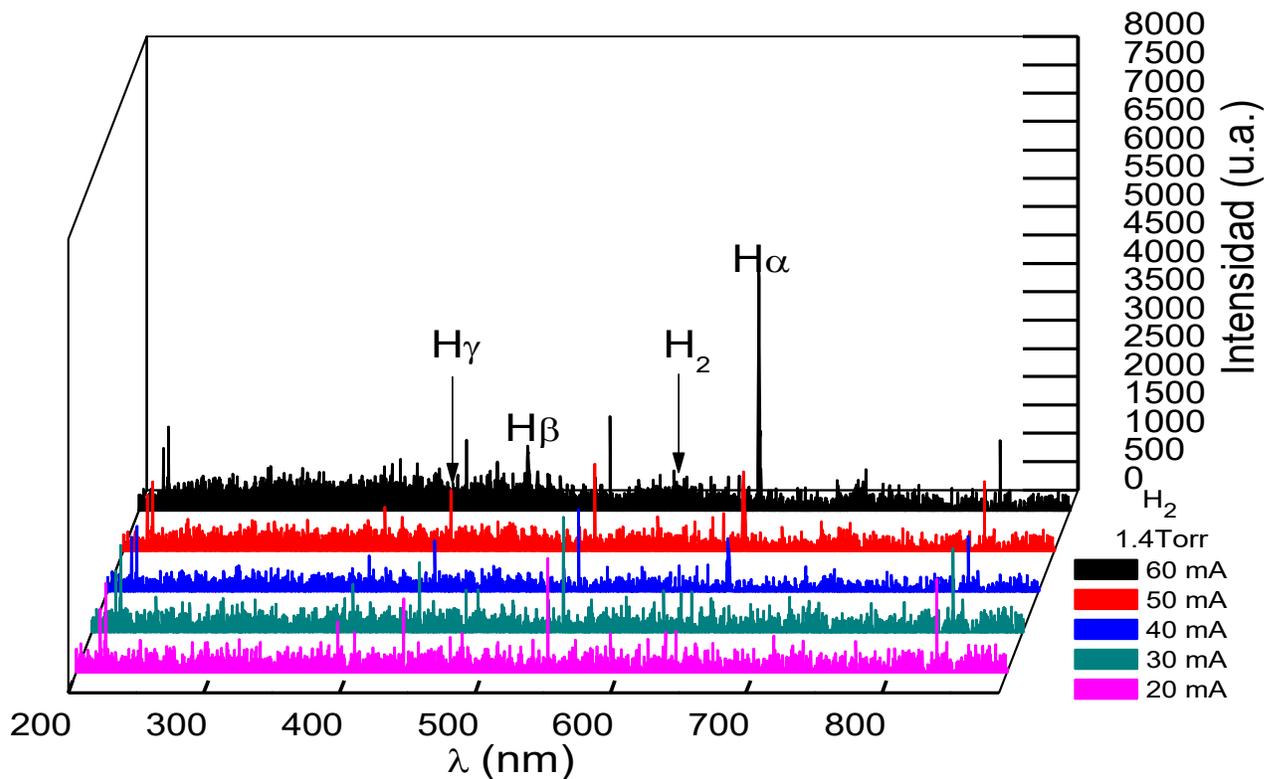
Grafica 3. Intensidades máximas de O_2^+ , C_2 , CO_2^+ , CO^+ , O_2 , CO de una descarga luminiscente de Dióxido de Carbono de 0.2 a 2.0 Torr.



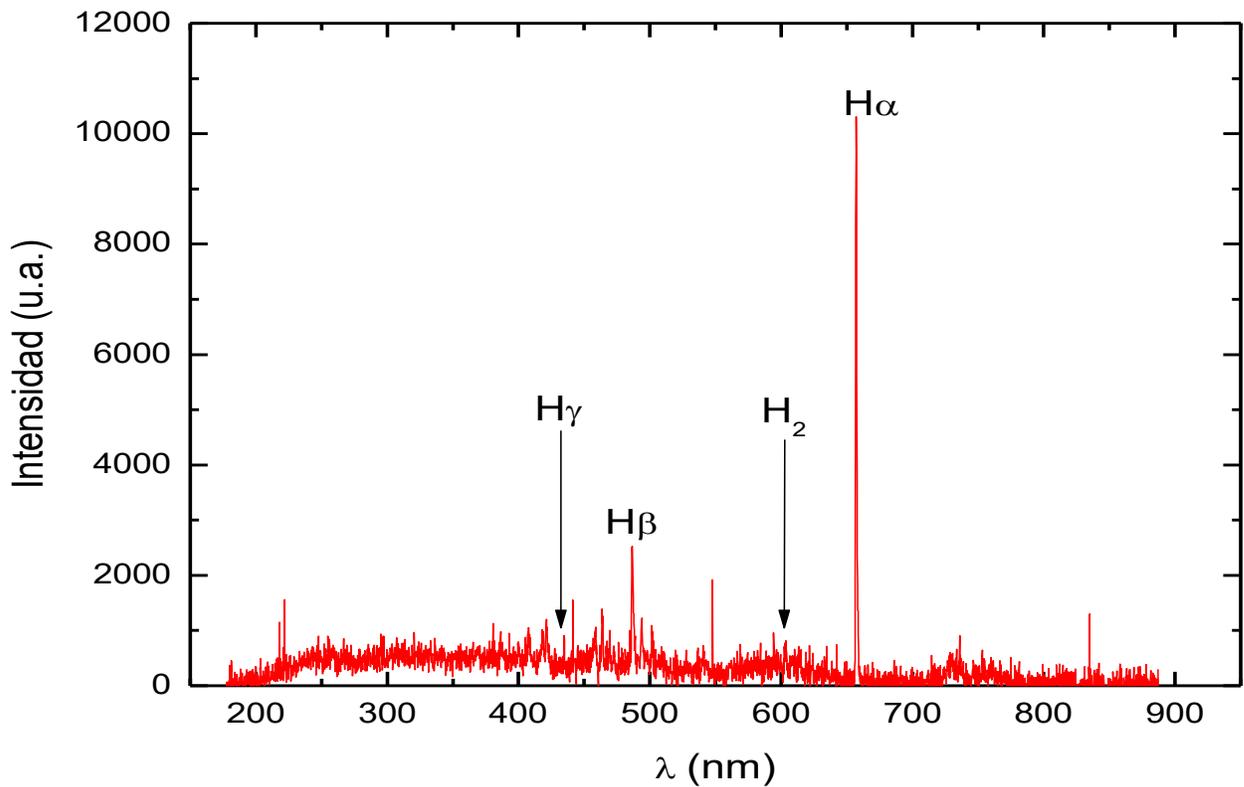
Grafica 4. Intensidades máximas de las especies de la descarga luminiscente de Dióxido de Carbono a diferentes corrientes (20, 30, 40, 50 y 60 mA).

Hidrógeno (H₂)





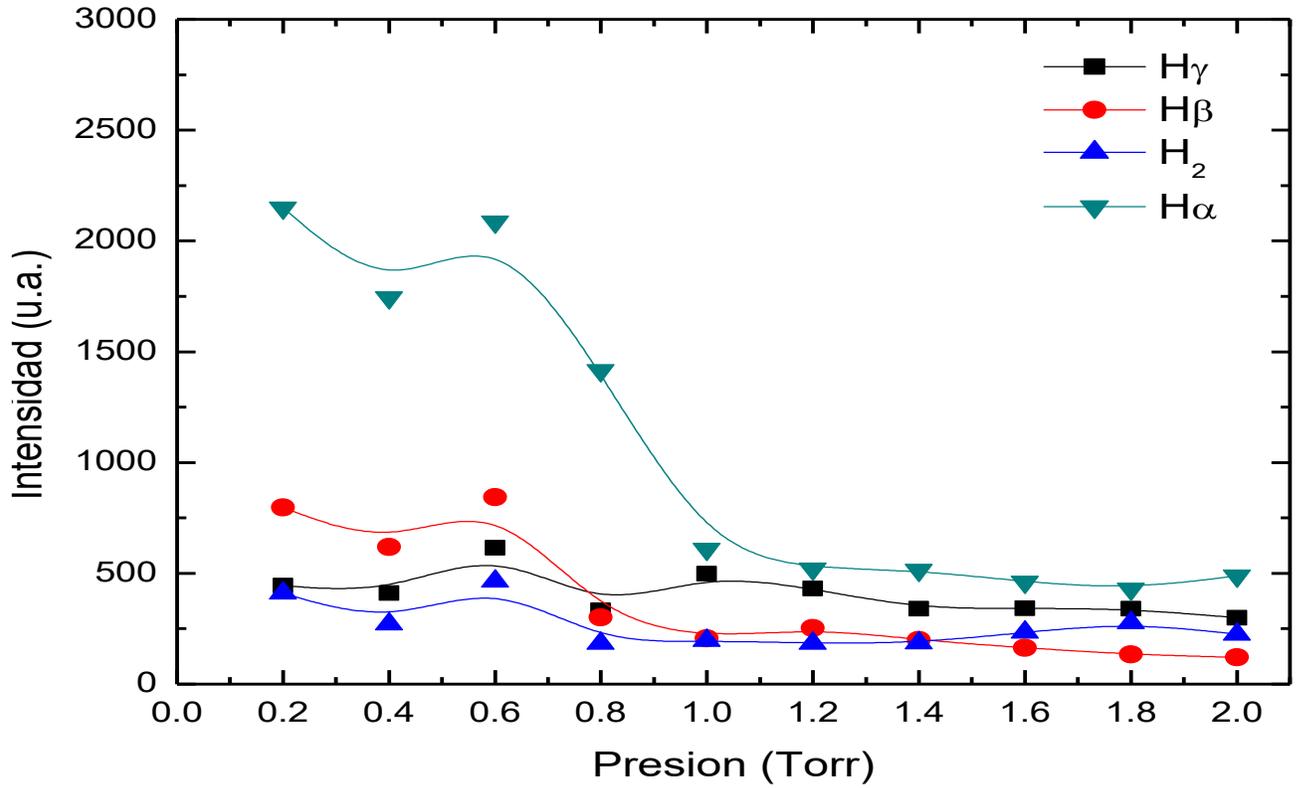
Grafica 5. Espectros Ópticos de Emisión obtenidos de la descarga luminiscente de Hidrógeno a presiones de 0.4, 0.8, 1.4, 1.8 Torr.



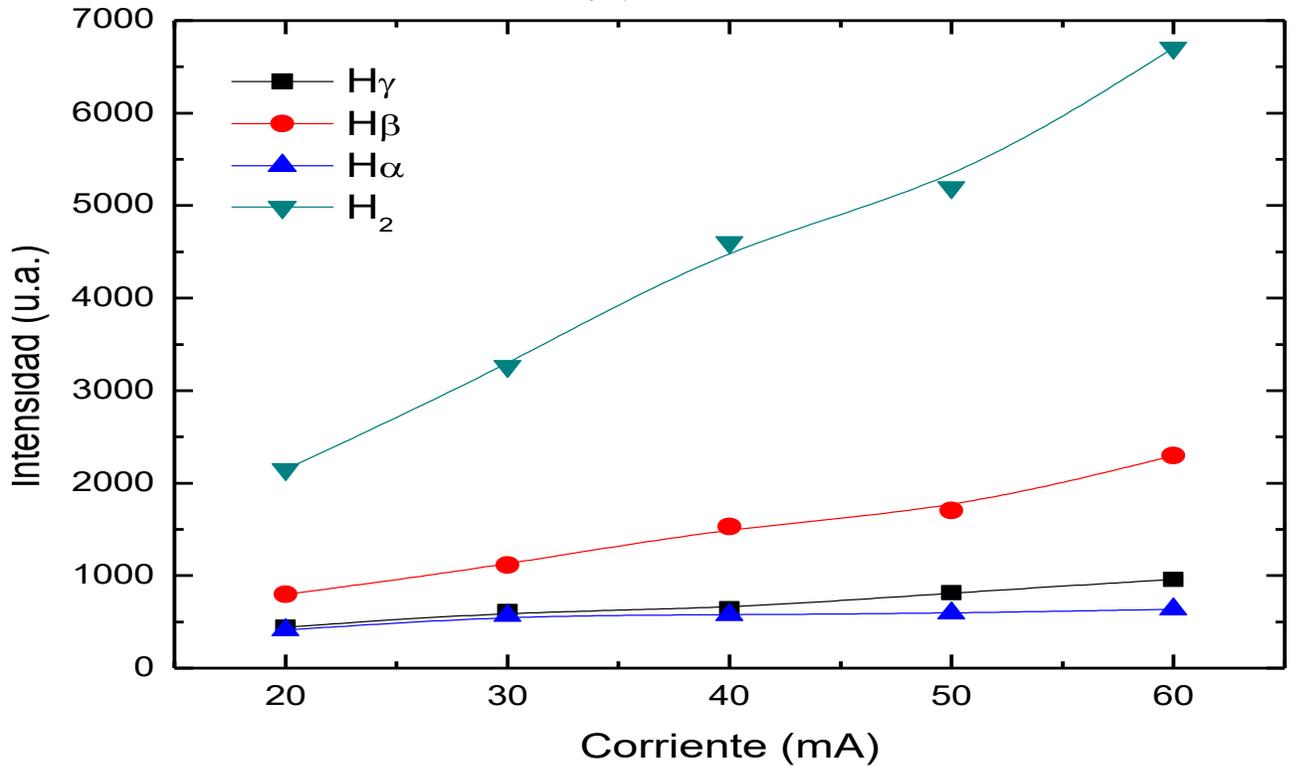
Gráfica 6. Espectro Óptico de Emisión de una descarga luminiscente de Hidrógeno.

Especie	$\lambda(\text{nm})$ Experimental	$\lambda(\text{nm})$ Teórica	Transición
H γ	434.11	434.04	$2p^2p^0$
H β	486.16	486.13	$2p^2p^0$
H $_2$	603.12	603.1	
H α	656.29	656.27	$2p^2p^0$

Tabla 3. Especies observadas mediante OES de una descarga de Hidrógeno.

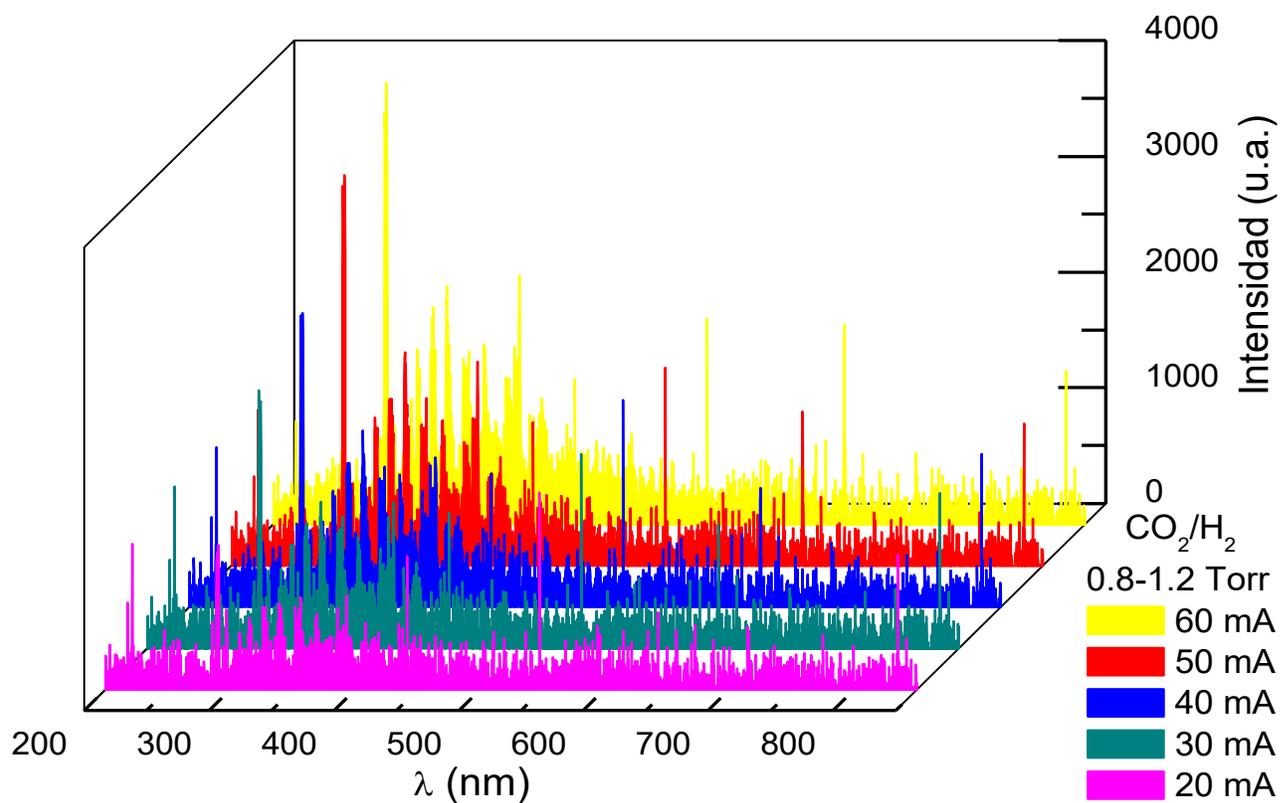
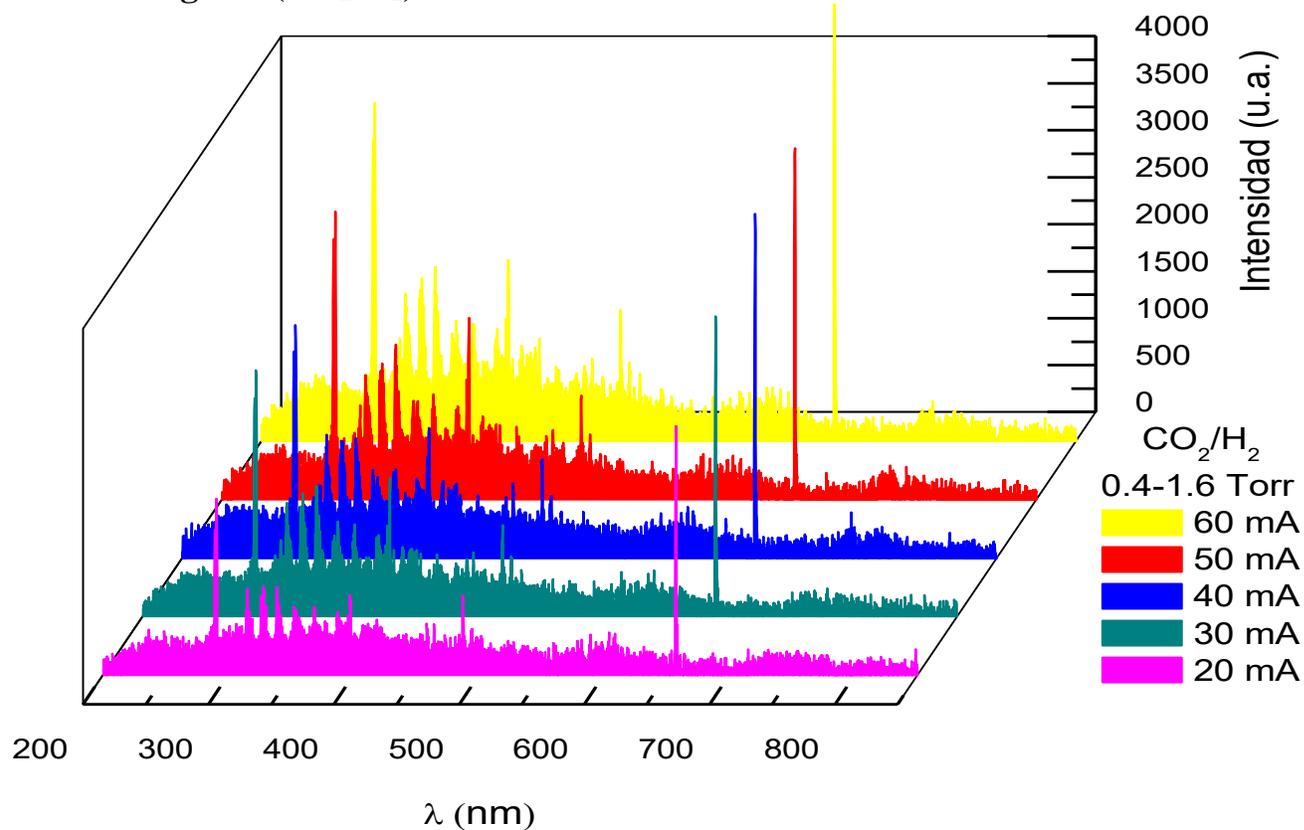


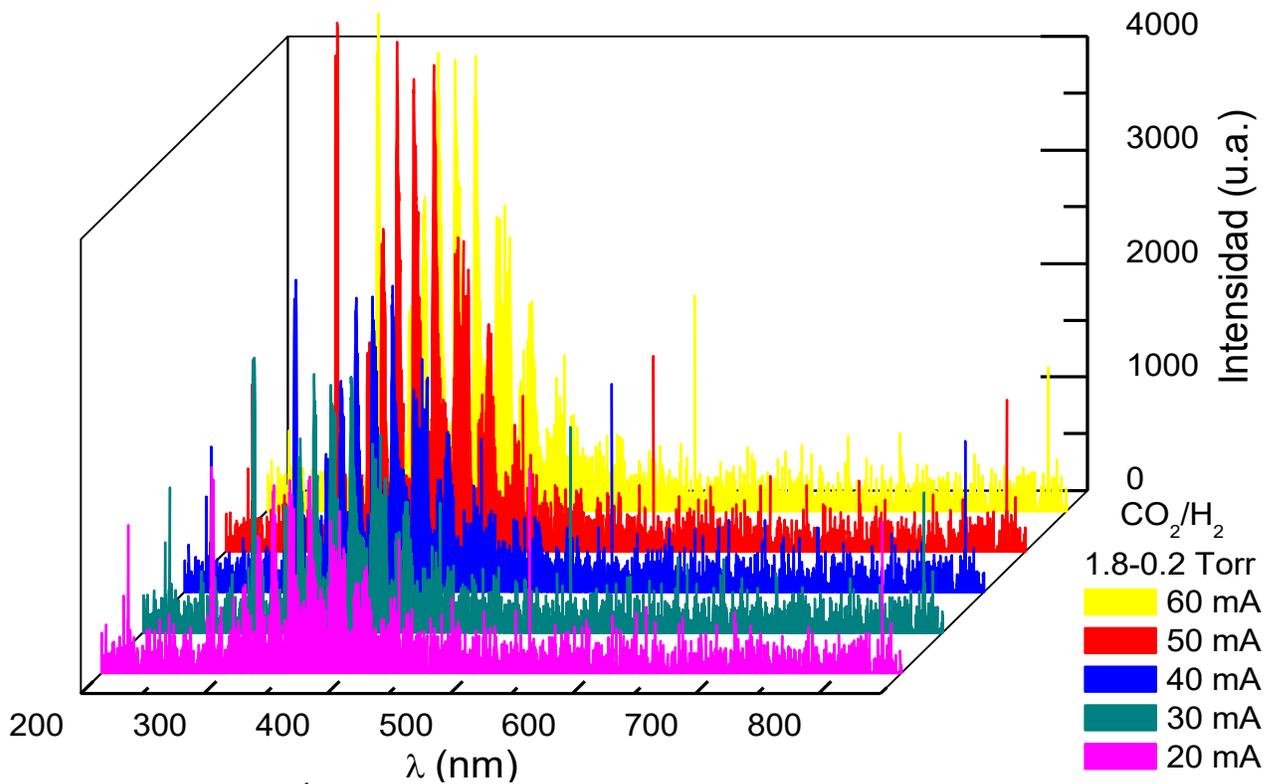
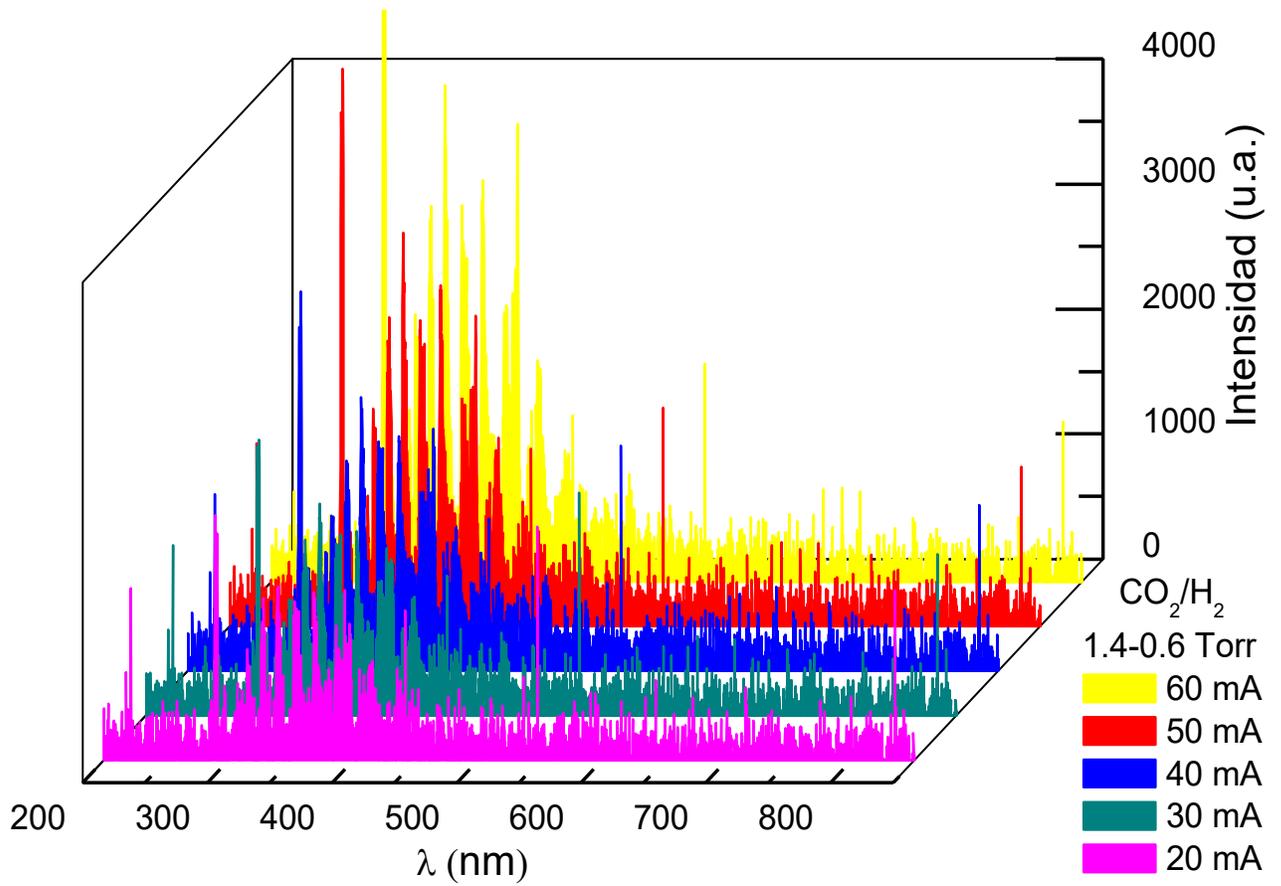
Grafica 7. Intensidades de H γ , H β , H $_2$, H α de una descarga luminiscente de Hidrógeno de 0.2 a 2.0 Torr.



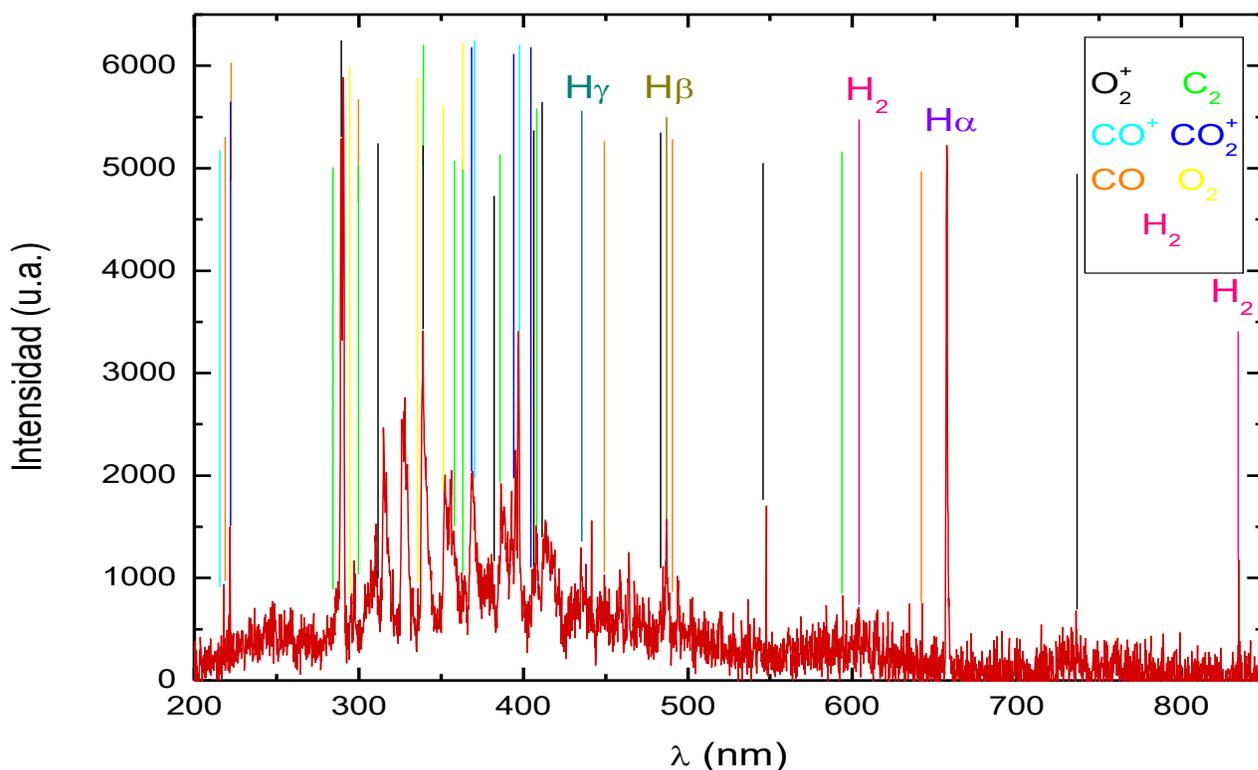
Grafica 8. Intensidades de la descarga luminiscente de Hidrógeno a diferentes corrientes (20, 30, 40, 50 y 60 mA).

Mezcla de gases (CO₂/H₂)





Grafica 9. Espectros Ópticos de Emisión obtenidos de la descarga luminiscente de Dióxido de Carbono/Hidrógeno a presiones de 0.4, 0.8, 1.4, 1.8 Torr.

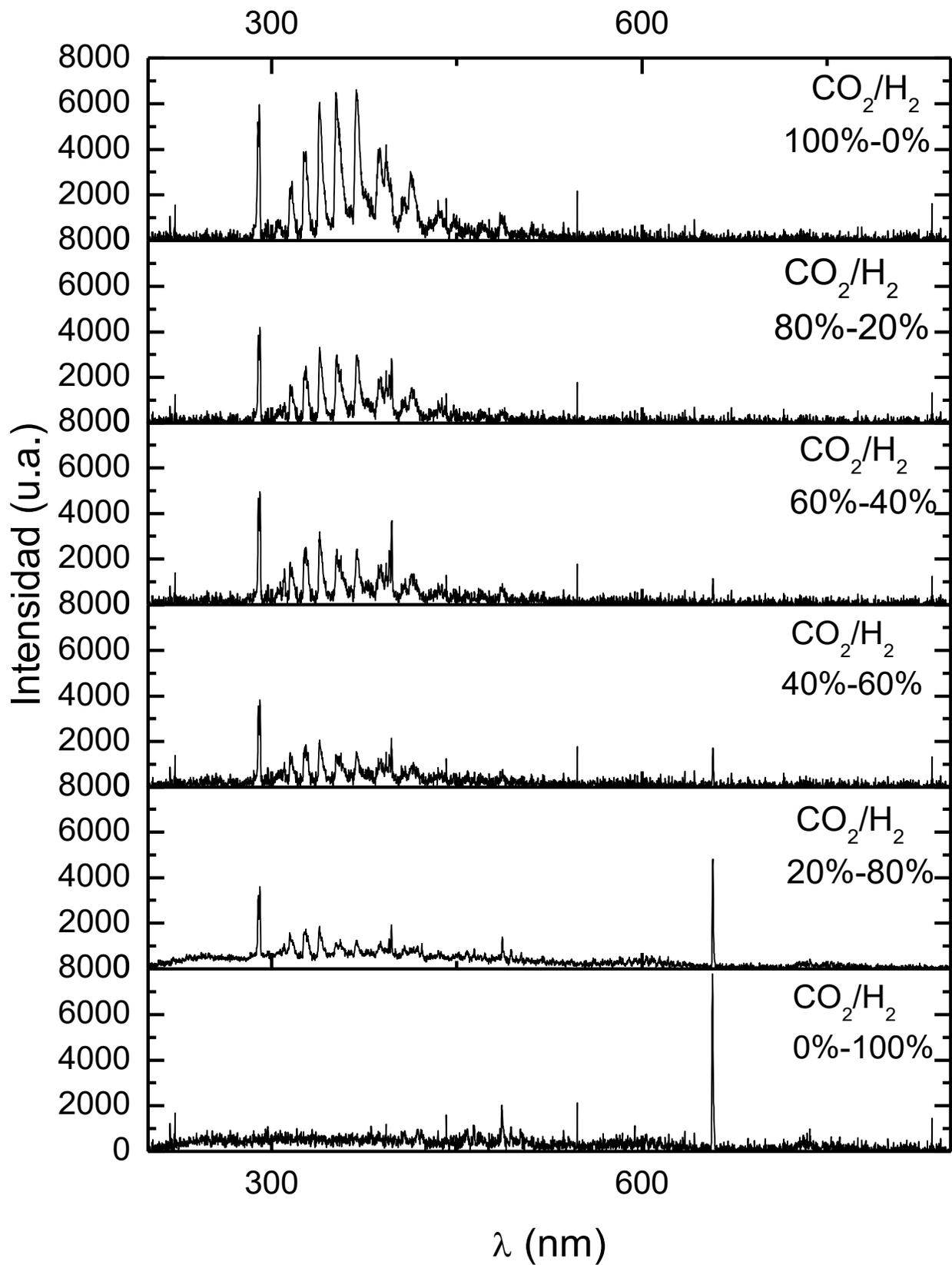


Gráfica 10. Espectro Óptico de Emisión de una descarga luminiscente de Dióxido de Carbono/Hidrógeno.

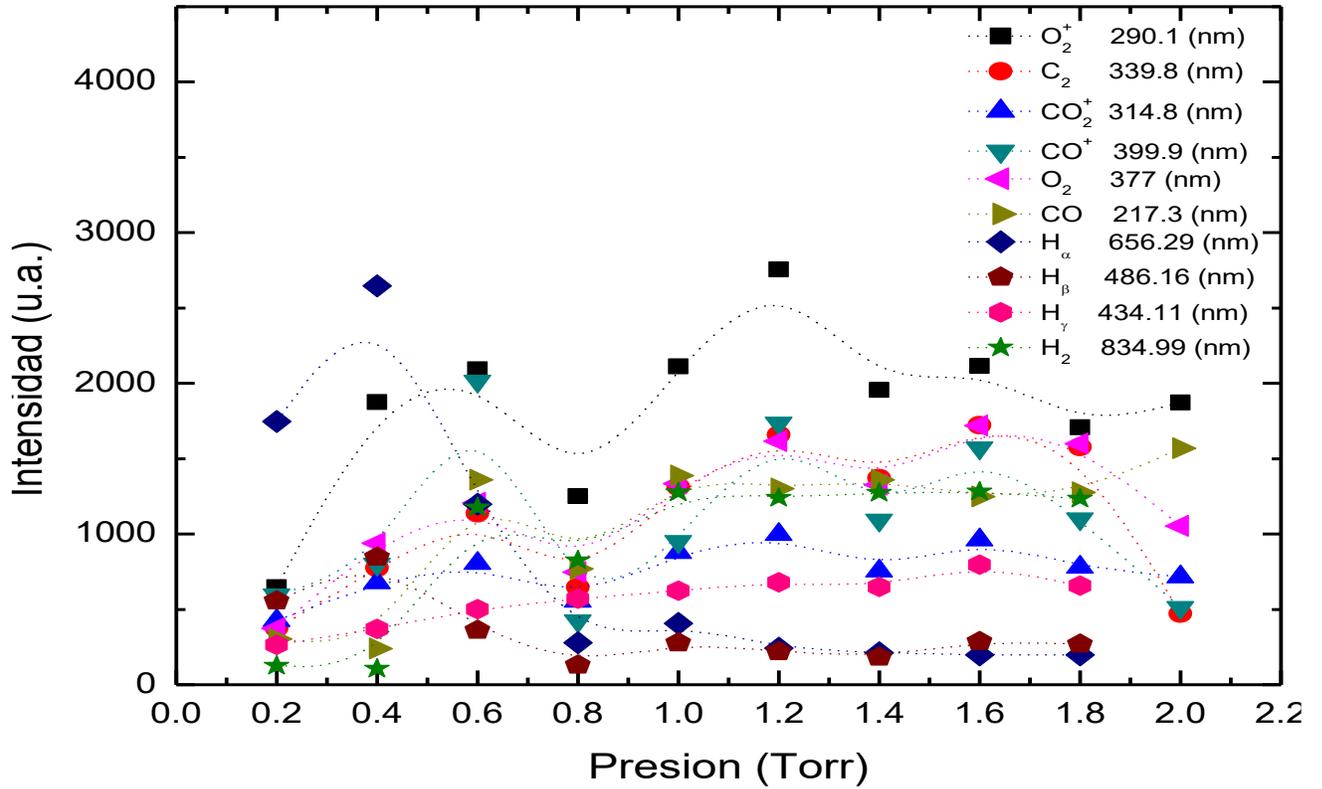
No. Especie	Especie	λ Experimental	λ Teórica	Transición
1	O_2^+	290.17	290.1	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		314.42	314.1	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		339.6	339.3	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		385.9	385.9	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		408.31	408.2	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		411.6	411.5	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		436.5	436.3	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		482.21	482.02	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		487.8	487.7	$A^2\Pi_u - X^2\Pi_g$
		733.6	733.4	$b^4\Sigma_g^- - a^4\Pi_u$
2	C_2	285.6	285.5	$B^3\Pi_g - X'\Pi_u$
		298.9	298.7	$B^3\Pi_g - X'\Pi_u$
		339.94	339.9	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		340.61	340.5	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		358.7	358.6	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		362.86	362.7	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		385.6	385.2	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		410.42	410.2	$c^1\Pi_g - b^1\Pi_u$
		589.9	589.9	$A^3\Pi_g - X^3\Pi_u$

		287.1	287.4	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		306.2	306.3	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		316.4	316.4	$A^2\Pi - X^2\Pi$
3	CO_2^+	387.21	387.05	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		407.12	407.07	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		412.21	412.08	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		415.9	415.9	$A^2\Pi - X^2\Pi$
		218.7	218.5	$B^2\Sigma - X^2\Sigma$
4	CO^+	368.98	368.8	$A^2\Pi - X^2\Sigma$
		370.6	370.5	$A^2\Pi - X^2\Sigma$
		395.6	395.3	$B^2\Sigma - A^2\Pi$
		397.67	397.7	$B^2\Sigma - A^2\Pi$
		294.7	294.5	$A^3\Sigma_u^+ - X^3\Sigma_g^-$
		298.7	298.4	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
5	O_2	337.12	337	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
		351.8	351.7	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
		367.31	367.1	$B^3\Sigma_u^- - X^3\Sigma_g^-$
		217.7	217.3	$A^1\Pi - X^1\Sigma$
		219.78	219.6	$A^1\Pi - X^1\Sigma$
6	CO	297.89	297.7	$b^3\Sigma - a^3\Pi$
		451.21	451.09	$B^1\Sigma - A^1\Pi$
		489.7	489.7	$d^3\Delta - a^3\Pi$
		640.1	640.1	$d^3\Delta - a^3\Pi$
7	H α	656.29	656.27	$2p^2p^0$
8	H β	486.16	486.13	$2p^2p^0$
9	H γ	434.11	434.04	$2p^2p^0$
10	H $_2$	602.12	603.1	
		834.99	834.95	

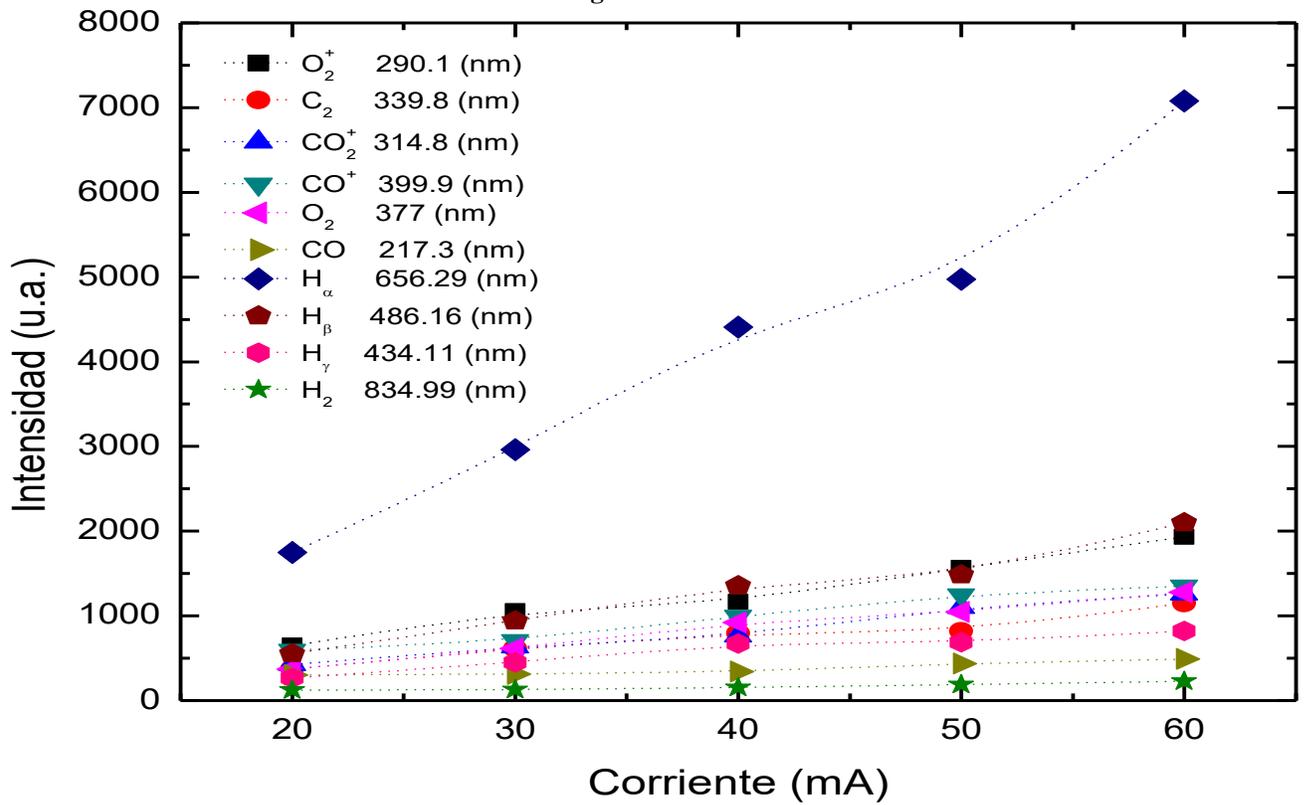
Tabla 4. Especies observadas mediante OES de la descarga de Dióxido de Carbono/Hidrógeno.



Grafica 11. Espectroscopia Óptica de Emisión de la mezcla de gases (Dióxido de Carbono/Hidrógeno) a presiones de 0.2 a 2.0 Torr.



Grafica 12. Intensidades máximas de O_2^+ , C_2 , CO_2^+ , CO^+ , O_2 , CO , H_α , H_β , H_γ , H_2 de una descarga luminiscente de Hidrógeno de 0.2 a 2.0 Torr.



Grafica 13. Intensidades máximas de las especies de la descarga luminiscente de CO_2/H_2 a diferentes corrientes (20, 30, 40, 50 y 60 mA).

3.2 Experimentación (Sonda de Langmuir)

Programa de computo (ajuste)

La adquisición de datos mediante el método de sonda de Langmuir, permite obtener una curva representativa del comportamiento de los iones y electrones dentro de una descarga luminiscente, al realizar la gráfica de Corriente vs Voltaje se obtiene un comportamiento ideal descrito en la sección 1.5.3.2, todo esto con ayuda del programa Origin Pro 8, que es el software de gráficos y análisis de datos, ofrece una interfaz fácil de usar, combinada con la capacidad de realizar personalizaciones avanzadas a medida que se familiariza con la aplicación.

Una de las ventajas de Origin es la compatibilidad con diferentes herramientas: LabVIEW, así como también permite la importación de datos desde aplicaciones como: MatLAB y Excel entre otros; lo cual genera una ampliación investigativa para hacer mejor uso de la ciencia y tecnología en cualquier campo de acción que contribuya a la promoción y generación de conocimiento para así obtener ventajas competitivas en los diferentes sectores.

El ajuste que se realizó a cada grafica permite obtener una visión del comportamiento real de los datos de la sonda, el comportamiento del ajuste es no lineal, es decir se sobrepone una función de distribución de Boltzmann. Esta distribución nos muestra la probabilidad de que un sistema estará en un estado determinado como una función de la energía y la temperatura del sistema al que se aplica la distribución de ese estado.

Para obtener los ajustes antes mencionados tenemos que graficar los datos de I-V (Corriente y Voltaje), seleccionar los datos y graficar una función de Boltzman como aparece en la Fig. 10, lo que nos da la comparación del comportamiento ideal contra los datos obtenido por la Sonda de Langmuir.

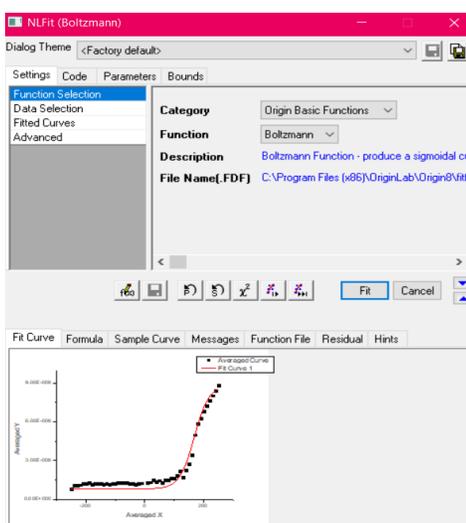
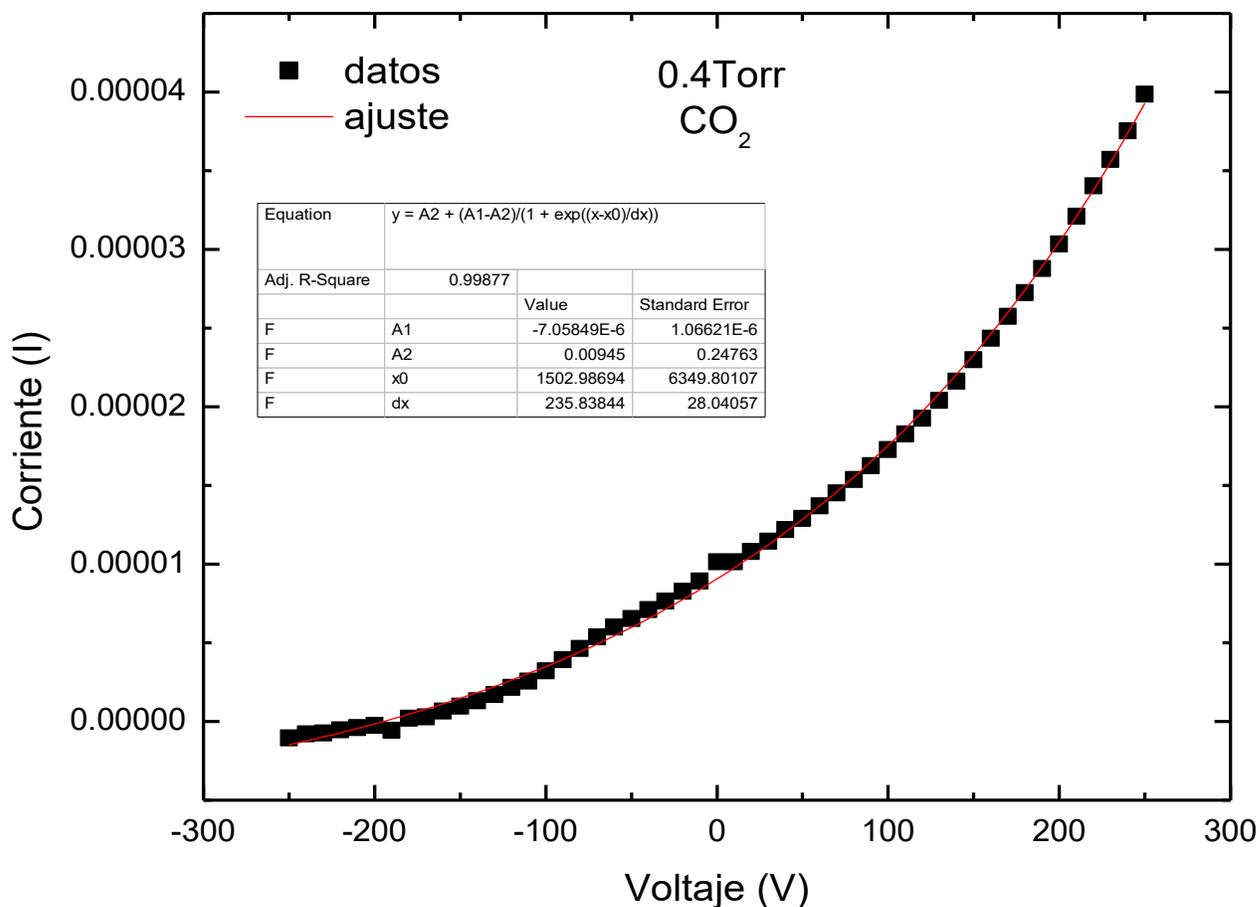
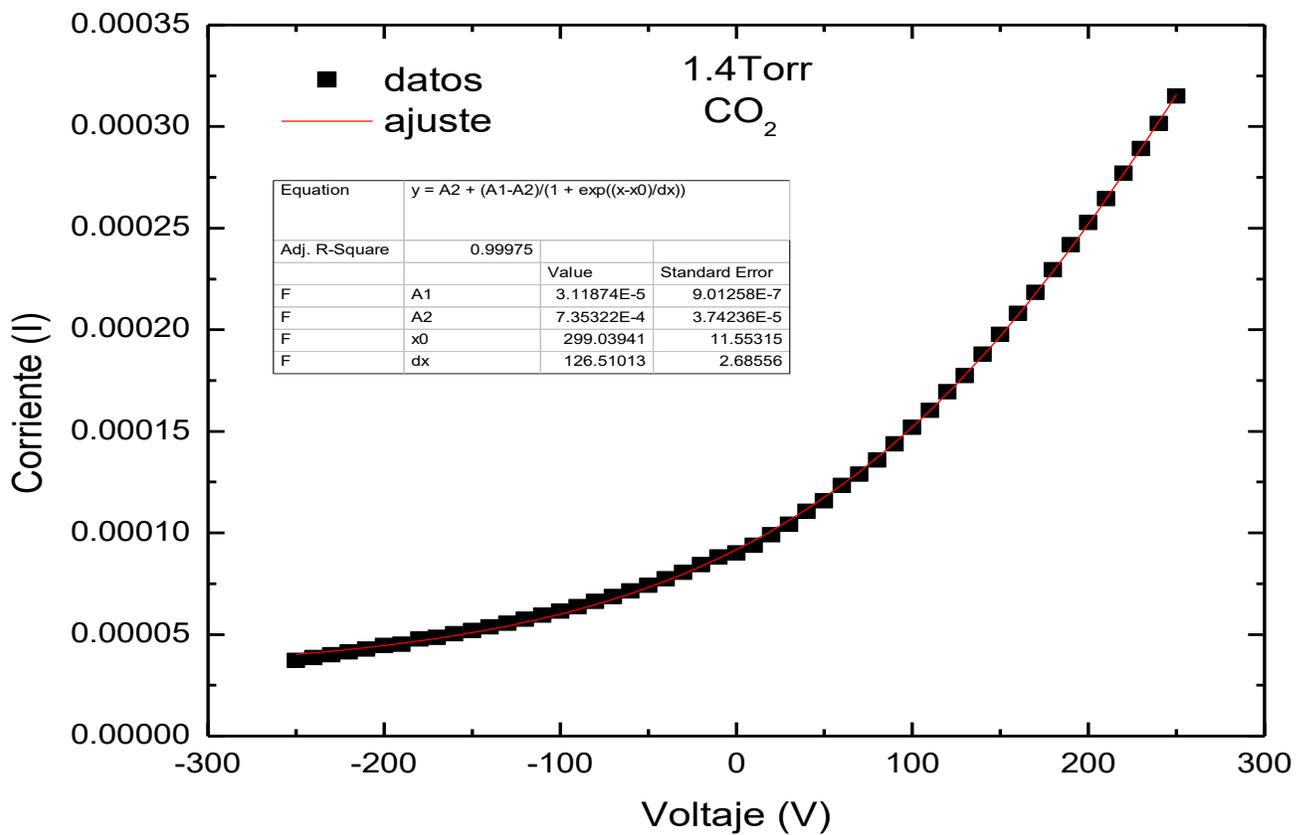
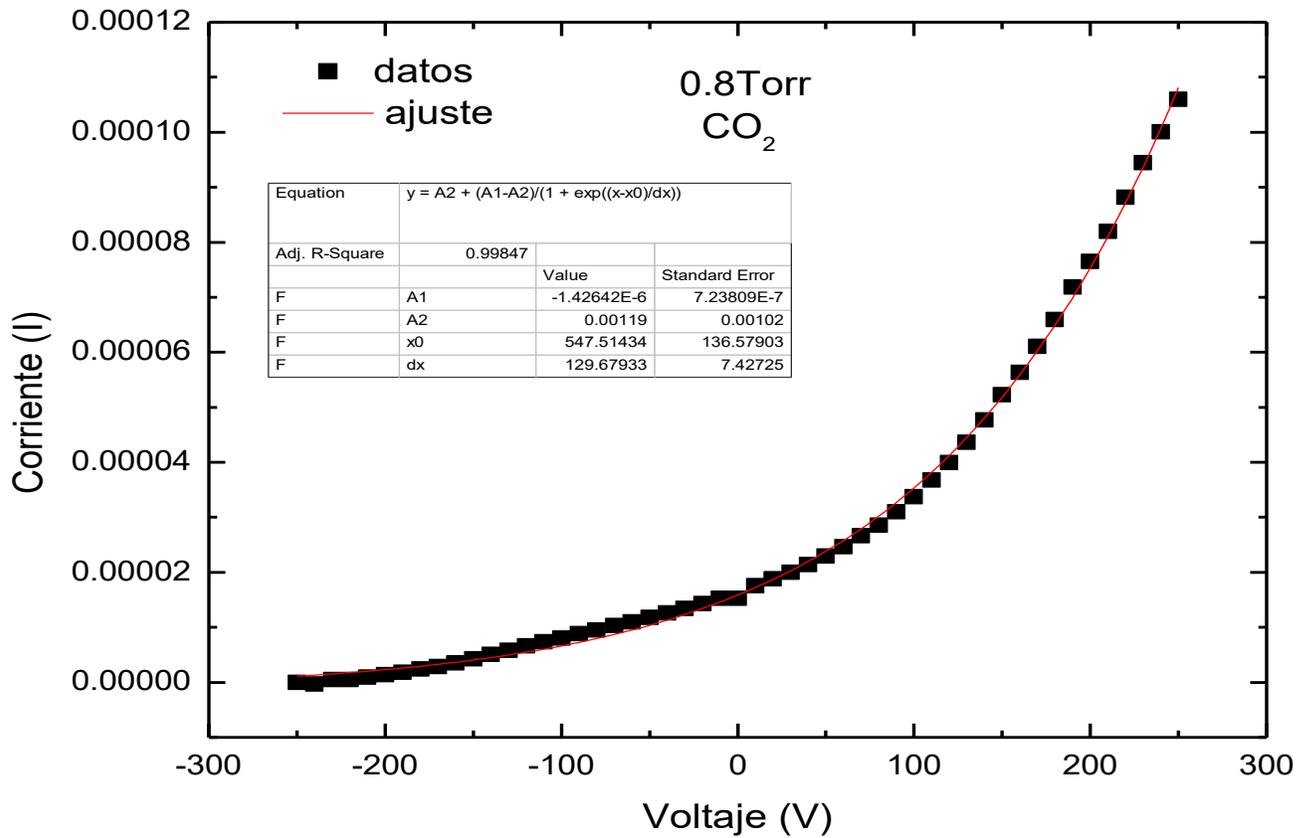


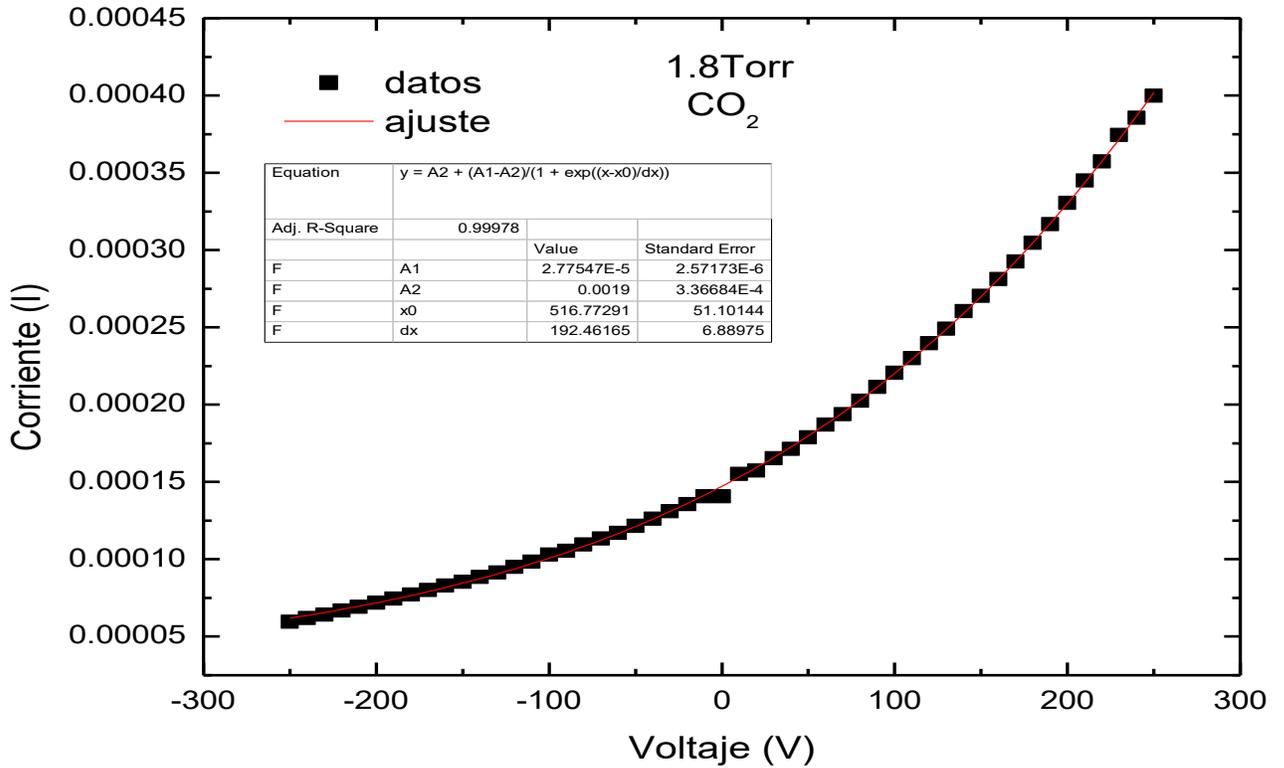
Figura 10. Cuadro de ajuste de datos OriginPro8.

A continuación, se presentan algunos de los ajustes realizados por los datos obtenidos en la medición. El procedimiento tomado en la caracterización mediante OES lo retomamos en esta parte de los resultados. Se presentan los ajustes de los gases analizados, CO₂, H₂ y mezcla de ambos a presiones de 0.4, 0.8, 1.4, 1.8 Torr.

CO₂

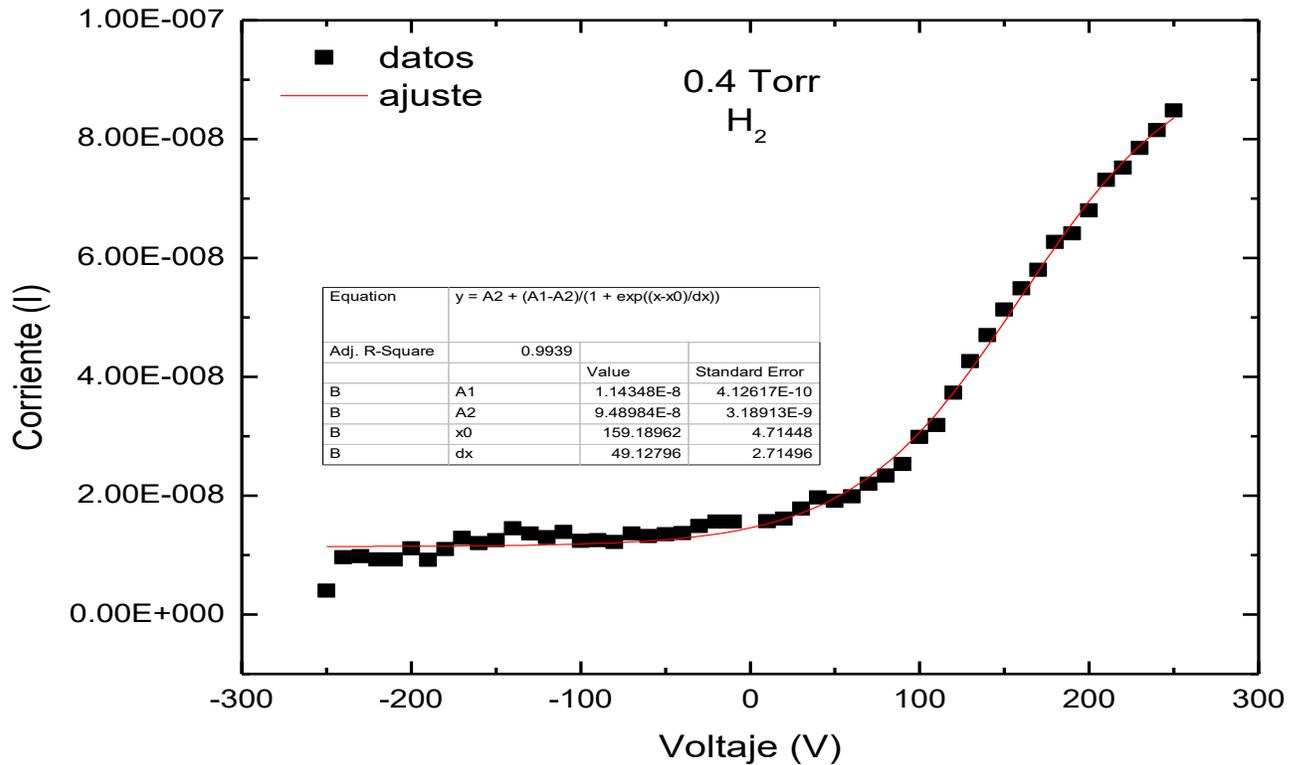


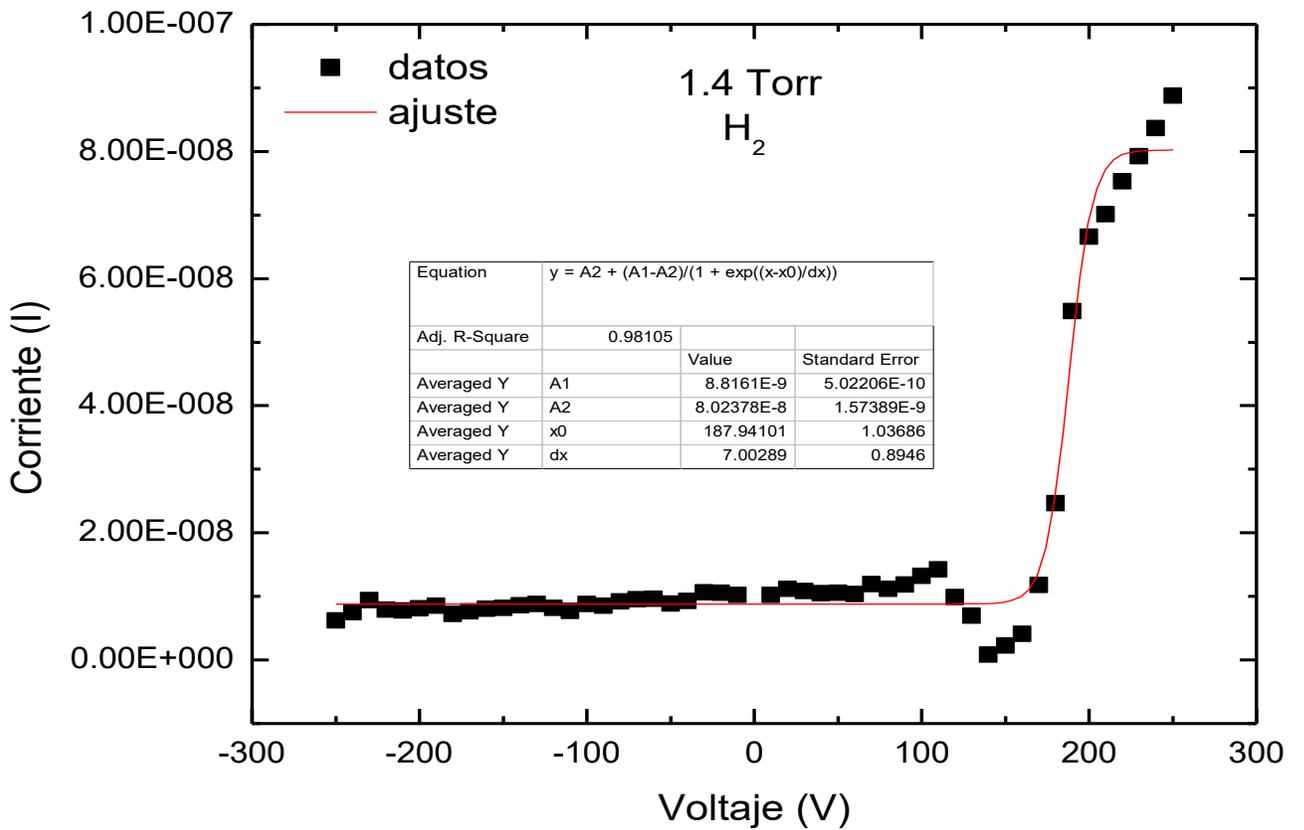
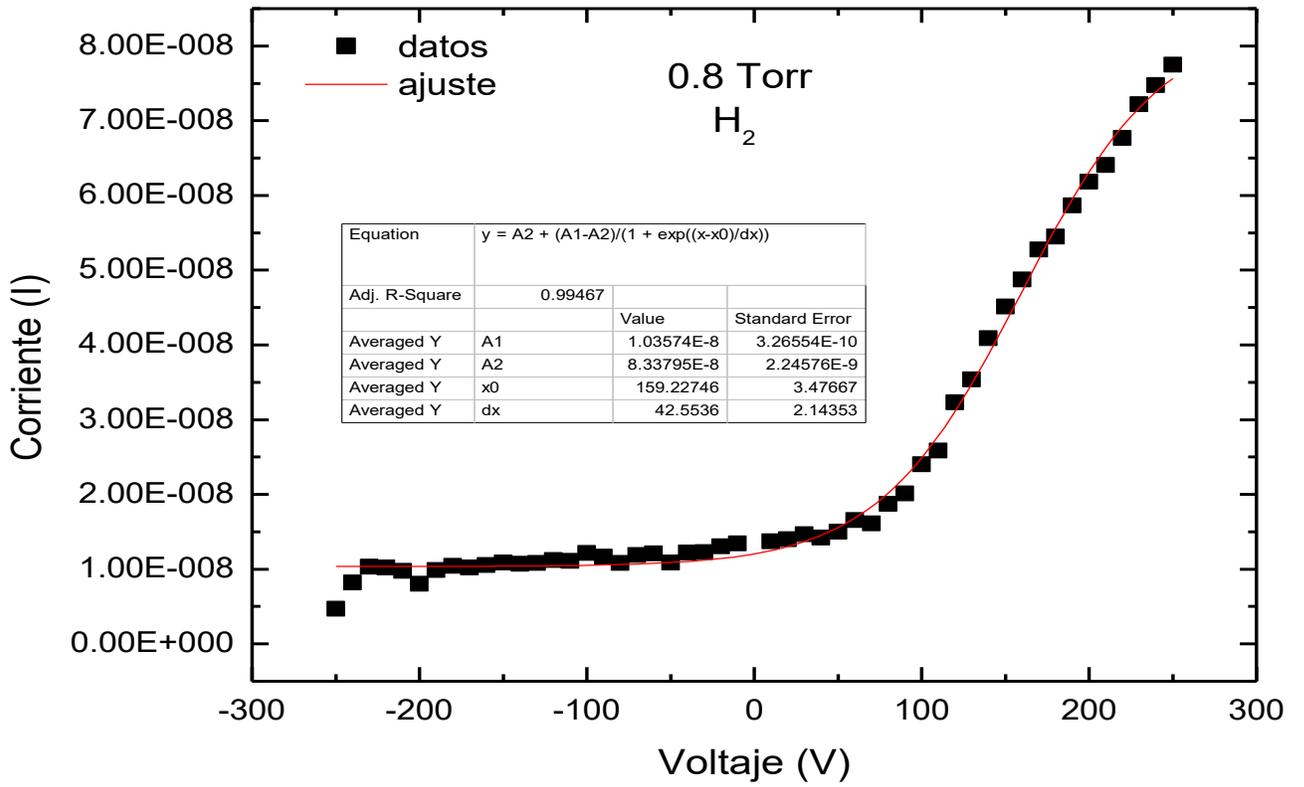


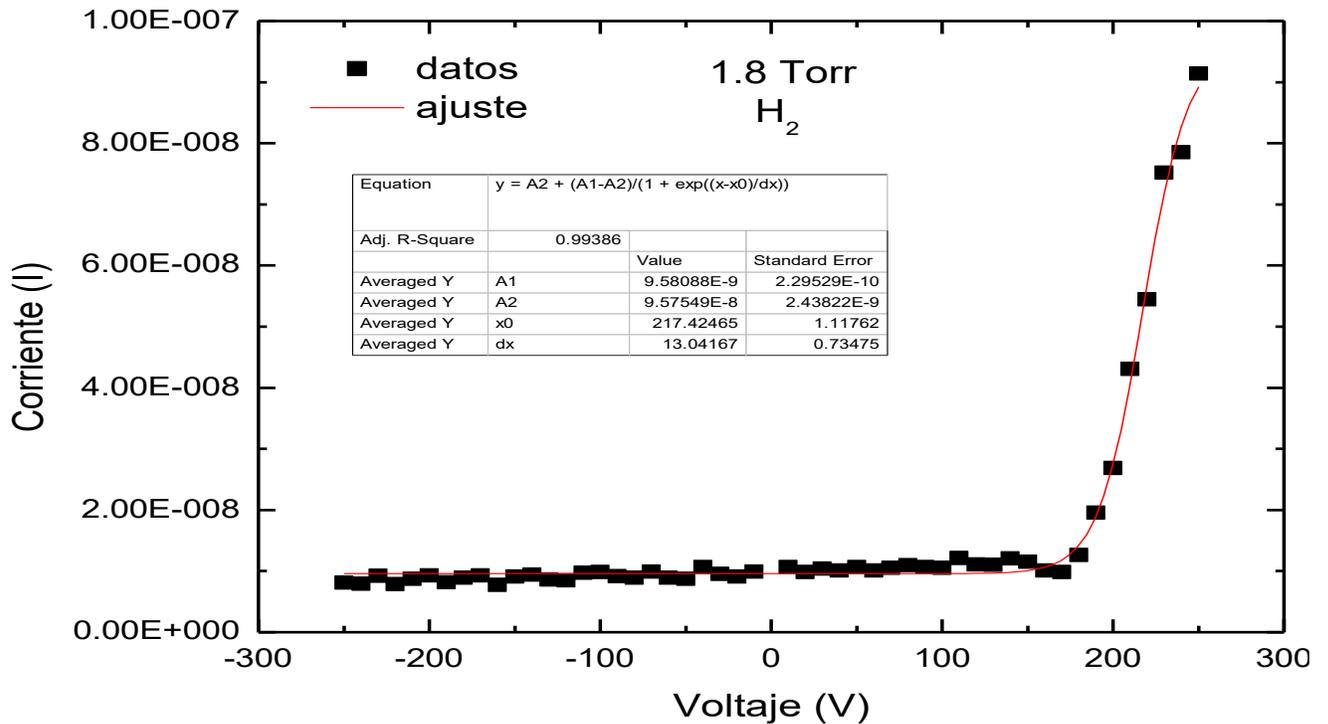


Grafica 14. Ajuste realizado a presiones de 0.4, 0.8, 1.4 y 1.8 Torr a Corriente de 60 mA para Dióxido de Carbono.

H₂





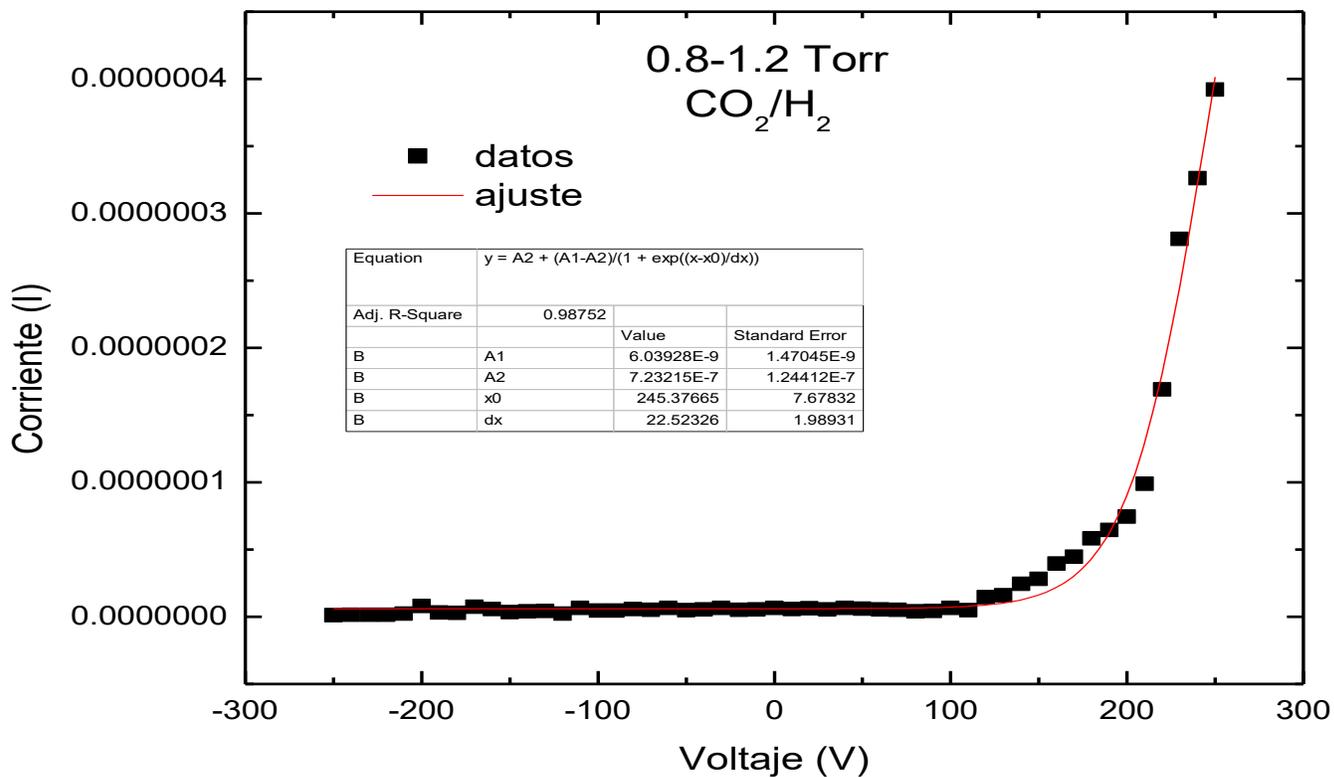
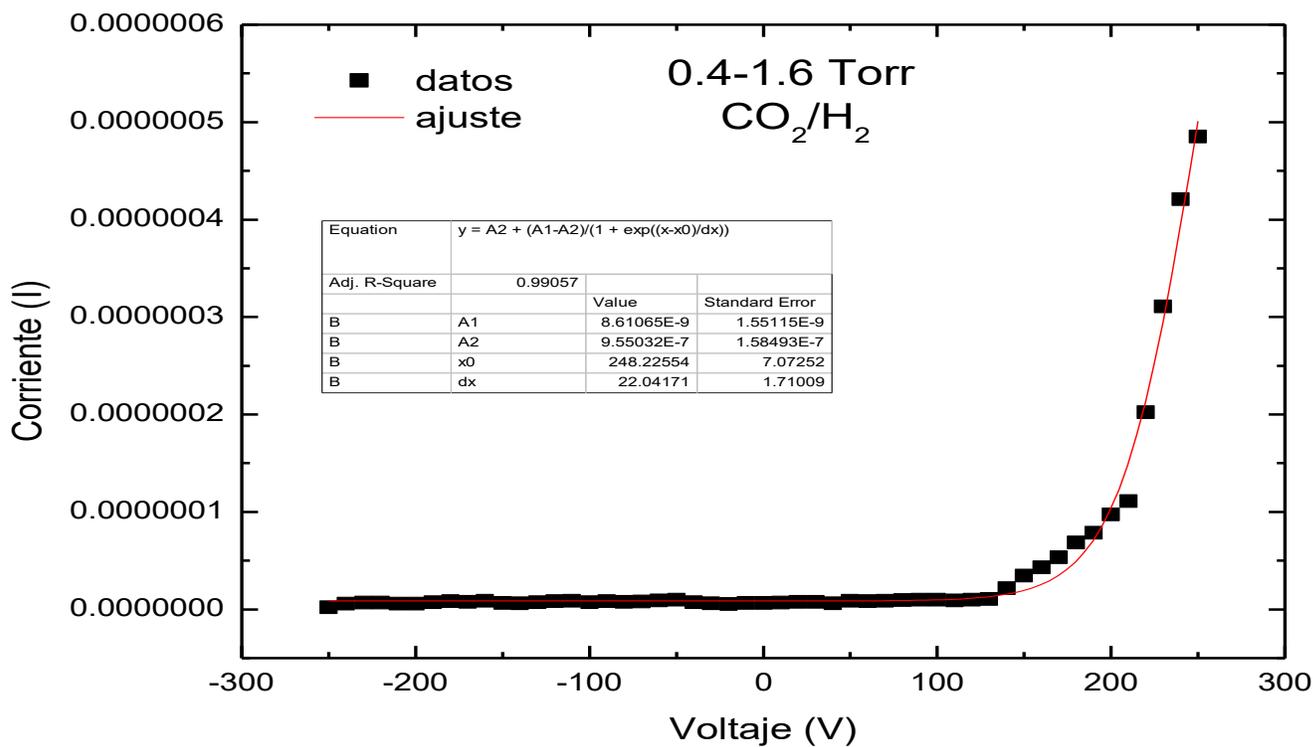


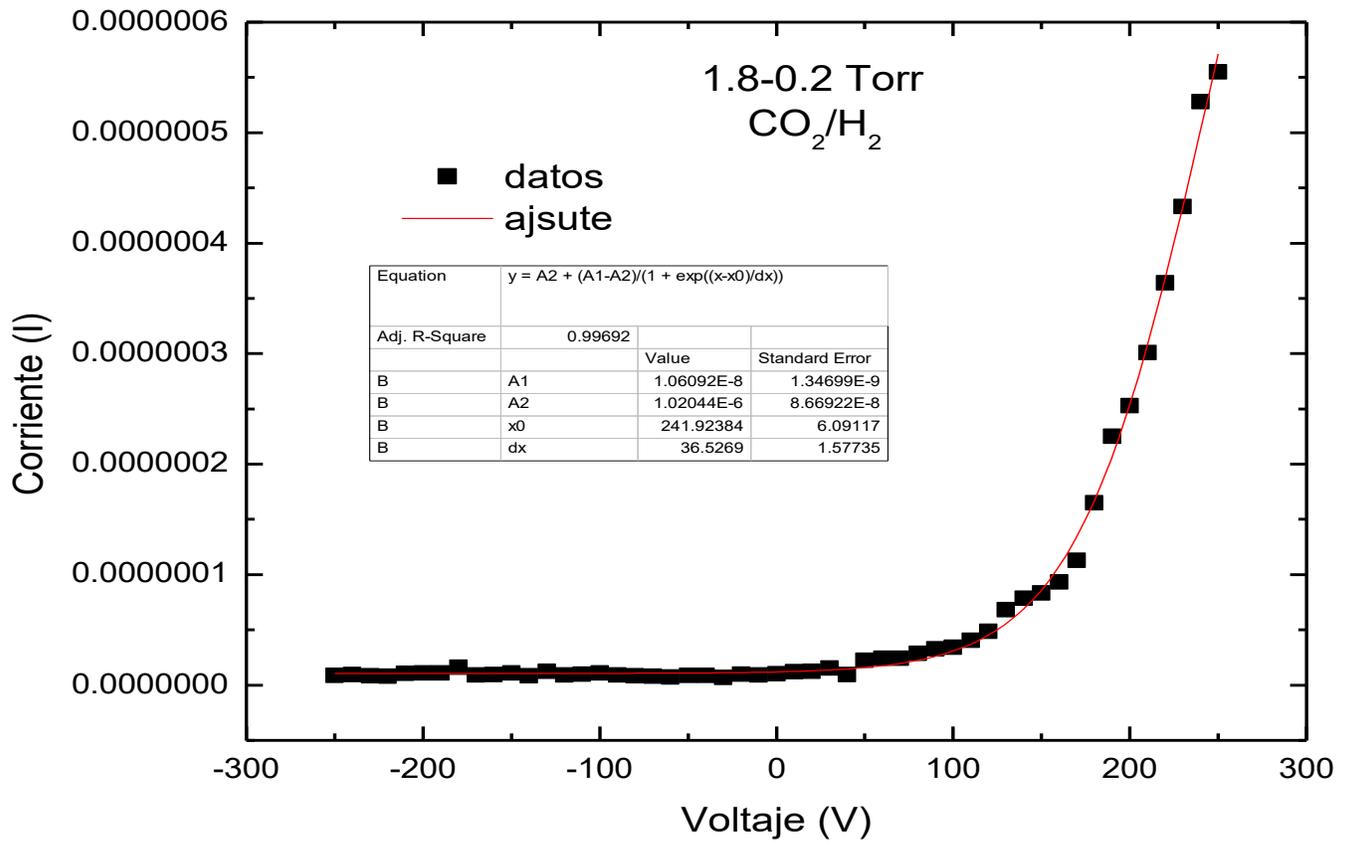
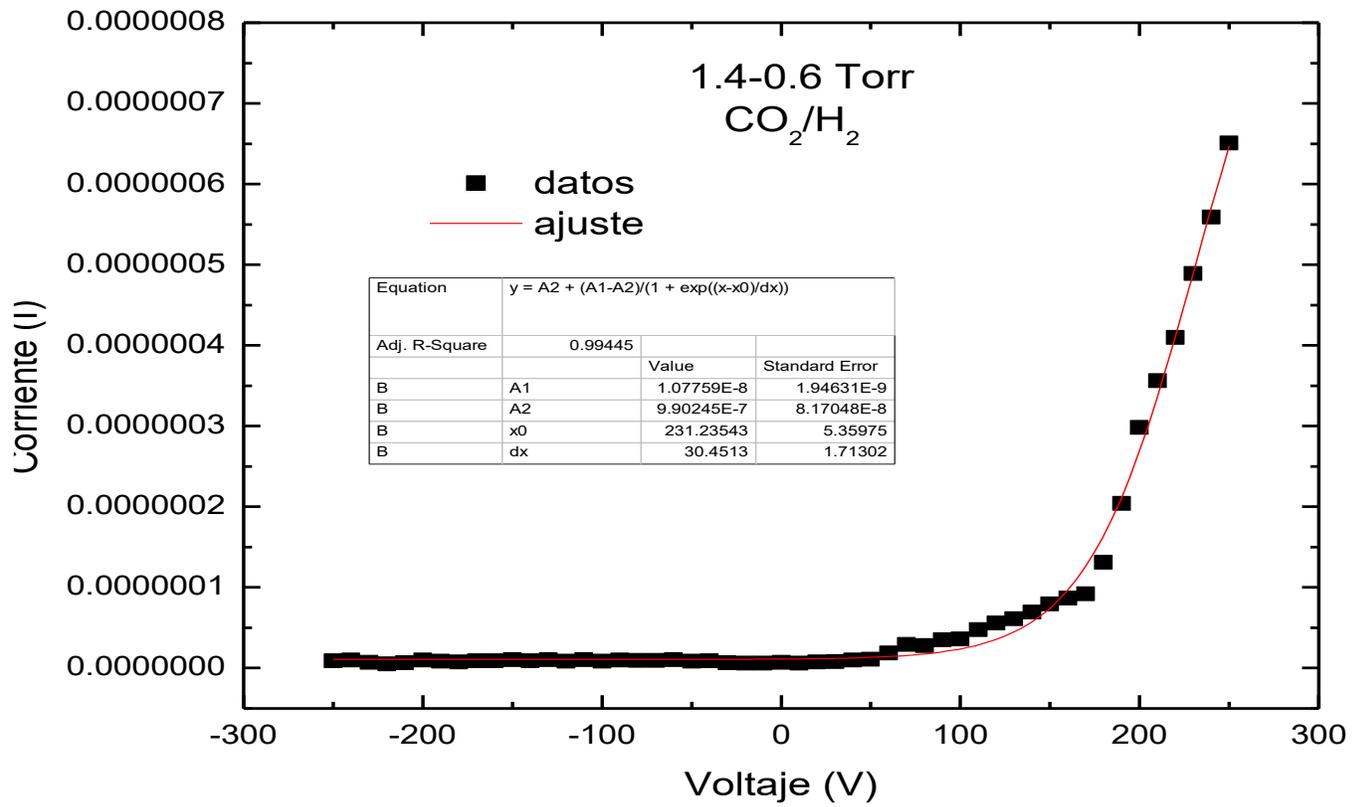
Gráfica 15. Ajuste realizado a presiones de 0.4, 0.8, 1.4 y 1.8 Torr a corriente de 60 mA para Hidrógeno.

La descripción del comportamiento en la medición mediante la sonda de Langmuir a 1.4 Torr de presión de Hidrógeno se observa en la gráfica 15, la cual muestra un comportamiento general en todo el barrido de voltaje, excepto entre 100 y 200 Volts, puede entenderse como una perturbación cuando la sonda adquiere un potencial positivo aplicado por la fuente de voltaje; cabe mencionar que el barrido del potencial se realiza de negativo a positivo, en todos los casos), el cual es mayor que el potencial de flotado (V_f) en el plasma, donde la corriente iónica como electrónica se igualan. Este efecto se da por el voltaje aplicado a la sonda que repele a los electrones y la corriente cae a 0, induciendo corriente iónica (I_i).

La longitud de Debye (λ_D) definida como la distancia mínima de interacción entre dos cargas para la generación de un plasma, es un factor a considerar en la medición que se está analizando, es la razón de que la distancia que hay entre iones y electrones disminuya, la sonda experimenta un cambio de voltaje que ocasiona que los iones sean repelidos, la distancia entre las cargas se reduce ocasionando mayor interacción entre estas y por diferencia de masas habrá algunos que tengan la suficiente energía para colisionar con la sonda, presentando un comportamiento atípico solo para el Hidrógeno. En 1.4 Torr es el cambio más notable y en presiones como 1.2 Torr esta perturbación comienza a notarse y en 1.6 Torr prácticamente desaparece, cabe mencionar que este efecto no se aprecia en presiones de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 1.0, 1.8 y 2.0 Torr de este gas en específico.

CO₂/H₂





Grafica 16. Ajuste realizado a presiones de 0.4-1.6, 0.8-1.2, 1.4-0.6 y 1.8-1.2 Torr a Corriente de 60mA para la mezcla de gases CO₂/H₂

Análisis mediante Sonda simple de Langmuir

De la sección 1.1.3 se desarrolló el método de Druyvesteyn que evalúa la función de probabilidad de los electrones mediante (4).

Donde e y m_e son la carga y masa del electrón, V y I_p es la tensión y la corriente medidos con la sonda, A es el área de la sonda cilíndrica, calculada a partir de la longitud (1.23cm) y el diámetro (0.0010125cm), y una superficie de la sonda $A = 6.44124788 \times 10^{-4} \text{cm}^2$. $\frac{d^2 I_p}{dV^2}$ es la segunda derivada de la curva característica.

De esta manera con (5) obtenemos la función de distribución de la energía de los electrones y mediante (6) y (7) determinar la temperatura electrónica (T_e) y la densidad electrónica (n_e).

A continuación, se presentarán los resultados de Temperatura y Densidad electrónica para cada gas (CO_2 , H_2) y la mezcla de ambos (CO_2/H_2).

CO_2

Presión (Torr)	Corriente (mA)	T_e (eV)	n_e (e/m ³)
0.2	20	6.95	2.31E06
	30	6.84	1.39E06
	40	20.83	2.58E04
	50	24.85	2.49E05
	60	31.76	5.21E04
0.4	20	27.49	4.81E02
	30	33.84	1.15E01
	40	31.02	6.30E02
	50	20.62	1.62E01
	60	28.04	2.40E01
0.6	20	21.88	1.24E06
	30	15.14	8.88E07
	40	11.25	6.69E07
	50	12.22	7.18E07
	60	12.36	7.53E07
0.8	20	5.83	4.97E05
	30	5.49	1.73E04
	40	5.50	2.18E04
	50	6.74	8.58E04
	60	7.42	1.02E03
1.0	20	1.87	1.81E05
	30	1.93	2.25E05
	40	2.66	3.26E05
	50	2.41	2.72E05
	60	2.7	3.68E05
	20	2.76	2.94E05

1.2	30	1.54	1.43E05
	40	12.4	1.54E05
	50	1.84	2.06E05
	60	2.78	3.89E05
1.4	20	1.46	1.04E05
	30	1.82	2.95E05
	40	3.1	1.98E04
	50	2.29	3.90E05
	60	2.68	3.74E05
1.6	20	1.16	7.58E06
	30	1.92	1.69E05
	40	2.01	2.88E05
	50	2.88	1.33E04
	60	3.78	1.14E04
1.8	20	1.45	9.04E06
	30	1.19	8.62E06
	40	1.52	1.59E05
	50	3.48	4.35E05
	60	6.88	3.36E04
2.0	20	26.74	1.51E01
	30	3.57	8.67E05
	40	1.83	2.49E05
	50	10.89	3.38E04
	60	11.87	1.80E09

H₂

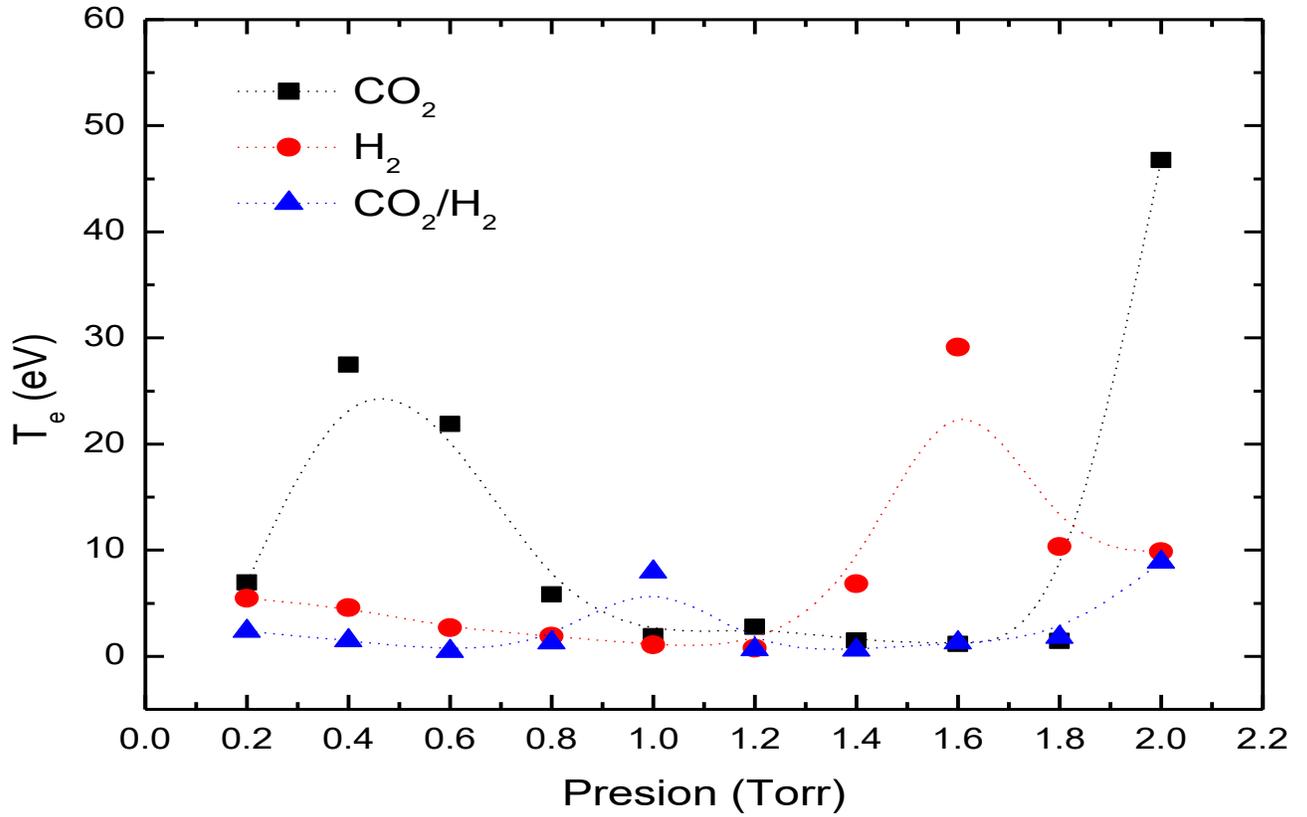
Presión (Torr)	Corriente (mA)	T_e (eV)	n_e (e/m ³)
0.2	20	5.48	6.05E09
	30	5.19	5.21E09
	40	6.21	6.01E09
	50	8.65	2.54E09
	60	3.87	4.34E09
0.4	20	4.56	5.07E09
	30	4.35	4.94E09
	40	4.69	5.98E09
	50	6.49	1.89E08
	60	2.69	3.18E09
0.6	20	2.7	2.56E09
	30	3.9	4.31E09
	40	3.3	3.25E09
	50	3.1	3.61E09
	60	3.4	3.94E09
0.8	20	1.88	2.38E09
	30	1.96	2.16E09
	40	2.3	2.30E09

	50	2.13	2.37E09
	60	2.14	2.25E09
1.0	20	1.06	1.59E09
	30	1.07	1.39E09
	40	1.65	2.04E09
	50	1.89	2.24E09
	60	1.45	1.71E09
1.2	20	0.75	1.59E09
	30	0.7	1.39E09
	40	0.98	2.04E09
	50	1.31	2.24E09
	60	1.36	1.71E09
1.4	20	6.38	1.36E09
	30	6.65	1.60E09
	40	14.84	3.17E09
	50	6.19	1.68E09
	60	6.99	1.55E09
1.6	20	9.11	7.09E08
	30	6.9	2.87E09
	40	5.07	2.17E09
	50	8.26	1.25E09
	60	8.05	1.52E09
1.8	20	10.34	1.43E09
	30	16.22	2.44E08
	40	11.26	1.25E09
	50	9.16	1.43E08
	60	13.03	2.41E09
2.0	20	9.87	6.98E09
	30	14.76	3.84E09
	40	13.67	1.31E08
	50	16.18	1.46E08
	60	13.04	2.47E09

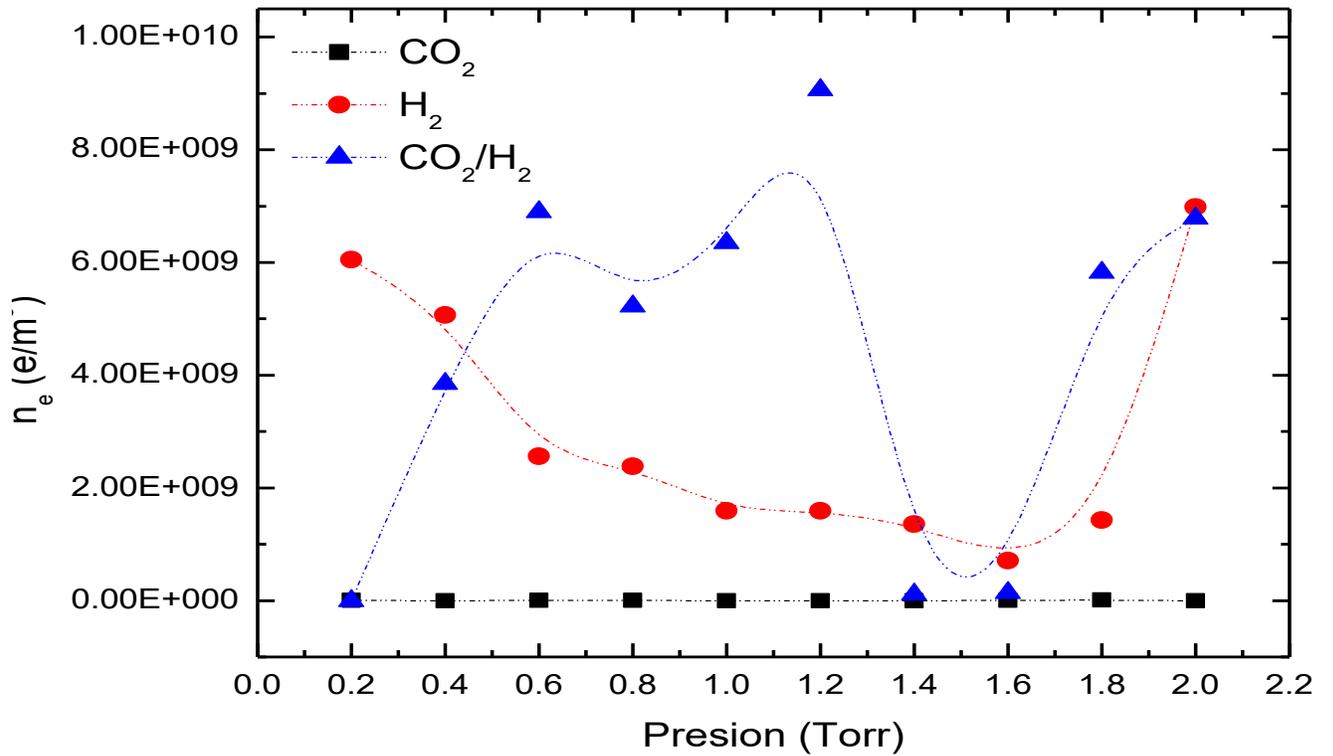
CO₂/H₂

Presión (Torr)	Corriente (mA)	T_e (eV)	n_e (e/m ³)
0.0-2.0	20	8.74	2.51E05
	30	2.57	4.67E05
	40	1.93	3.49E05
	50	8.89	4.38E07
	60	9.87	2.80E09
0.2-1.8	20	2.38	3.85E09
	30	1.83	2.87E09
	40	0.69	7.73E09
	50	1.05	9.13E09

	60	0.68	9.53E09
0.4-1.6	20	1.49	6.90E09
	30	1.92	8.29E09
	40	0.60	9.05E09
	50	3.06	6.57E09
	60	1.22	8.59E09
0.6-1.4	20	0.49	5.22E09
	30	2.15	6.30E09
	40	0.86	6.78E09
	50	1.66	6.67E09
	60	0.77	5.47E09
0.8-1.2	20	1.28	6.35E09
	30	1.05	7.73E09
	40	3.49	9.24E09
	50	1.72	5.06E09
	60	1.98	6.04E09
1.0-1.0	20	7.97	9.06E09
	30	1.01	1.14E08
	40	0.74	1.01E08
	50	0.77	5.52E09
	60	2.82	7.36E09
1.2-0.8	20	0.65	1.08E08
	30	2.89	1.12E08
	40	2.2	2.13E09
	50	0.88	1.12E08
	60	2.58	1.33E08
1.4-0.6	20	0.59	1.37E08
	30	1.15	6.63E09
	40	2.56	8.34E09
	50	1.27	9.68E09
	60	1.71	1.08E08
1.6-0.4	20	1.27	5.82E09
	30	0.98	7.92E09
	40	2.11	7.47E09
	50	0.91	7.28E09
	60	1.95	9.21E09
1.8-0.2	20	1.79	6.78E09
	30	1.22	6.97E09
	40	1.24	4.43E09
	50	1.05	7.19E09
	60	2.11	6.69E09
2.0-0.0	20	8.87	5.98E09
	30	11.76	4.84E09
	40	9.67	3.31E08
	50	13.18	5.46E08
	60	11.04	6.47E09



Grafica 17. Comportamiento de la Temperatura electrónica del CO₂, H₂ y mezcla de ambos a presiones de 0.2 a 2.0 Torr.



Grafica 18. Comportamiento de la Densidad electrónica del CO₂, H₂ y mezcla de ambos a presiones de 0.2 a 2.0 Torr.

4. Conclusiones

- Se logró el diseño y armado de un sistema experimental a bajas presiones, el cual permite realizar descargas luminiscentes para el análisis de un gas o la mezcla de gases.
- Se generaron plasmas mediante descargas luminiscentes de Dióxido de Carbono, Hidrógeno y mezcla de ambos a diferentes presiones tales como: 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 y 2.0 Torr variando la corriente en: 20, 30, 40, 50 y 60 mA, teniendo una potencia para el Dióxido de Carbono de: 12.4, 20.4, 29.6, 39 y 50.4 W, para el Hidrógeno se obtuvo una potencia de: 7, 12, 18, 25.5 y 33.6 W, en la mezcla de gases se obtuvo una potencia de: 10.2, 17.4, 25.6, 35, 44.4 W. Con estos datos se obtuvo la caracterización óptica de la descarga luminiscente, observando el comportamiento que tiene al variar la presión de los gases, y sus mezclas, así como la potencia de la descarga.
- Las especies observadas por OES del Dióxido de Carbono fueron: O_2^+ , C_2 , CO_2^+ , CO^+ , O_2 , CO .
- Las especies observadas por OES del Hidrógeno fueron: H_α , H_β , H_γ y H_2 .
- Las especies observadas por OES de la mezcla de gases fueron: O_2^+ , C_2 , CO_2^+ , CO^+ , O_2 , CO , H_α , H_β , H_γ y H_2 . Estas especies provienen de procesos atómicos y moleculares como excitación y disociación.
- La captura de los datos medidos por sonda de Langmuir se desarrolló por medio de la interfaz gráfica que permite la adquisición de datos de corriente y voltaje de la sonda correspondiente a la descarga luminiscente de Dióxido de Carbono, Hidrógeno y mezcla de ambos a bajas presiones. Los datos fueron obtenidos en una estación programable mediante el uso de LabVIEW y un multímetro FLUKE 8846A, lo que nos permite procesar los datos que realizara la gráfica característica de I-V de la sonda.
- Mediante sonda de Langmuir, se calcularon las temperaturas electrónicas por el Método de Druyvesteyn del Dióxido de Carbono que se encontró entre 1.16 a 33.84 eV, el Hidrógeno entre 0.7 a 16.22 eV y CO_2/H_2 entre 0.49 a 13.18 eV.
- De igual manera mediante sonda de Langmuir, se calcularon las densidades electrónicas con el mismo método obteniendo para del Dióxido de Carbono una densidad entre 1.15E01 a 9.04E06 (e/m^3), el Hidrógeno entre 1.31E08 a 6.98E09 (e/m^3) y CO_2/H_2 entre 2.51E07 a 9.68E09 (e/m^3).

- Al realizar el experimento de descarga luminiscente a baja presión se observó que el experimento es reproducible.

Enfoque del trabajo

El presente trabajo va orientado a la generación de nuevo conocimiento, que fortalezca las bases de la caracterización espectroscópica, particularmente del Dióxido de carbono, Hidrógeno y su mezcla, se utilizaron variables fijas de presión y corriente, la descarga se manifestó en un intervalo de 0.2 a 2.0 Torr con un incremento de 0.2 Torr en cada medición y corrientes de 20 a 60 mA, con un aumento de 10 mA respectivamente. Considerar el impacto ambiental que tienen estos agentes de estudio genera motivación para la caracterización y diagnóstico de esta mezcla bajo condiciones diferentes.

Futuros trabajos

El análisis de estas descargas a condiciones atmosféricas, es uno de los futuros trabajos, caracterizar y diagnosticar su comportamiento comparado con situaciones reales para su comprensión, son factores que influyen en el análisis cuantitativo de estos sistemas. También mencionar la importancia de generar nuevas mezclas como lo es el CO₂ con Alcoholes por la importancia de los Componentes Orgánicos Volátiles (VOC's).

5. Referencias

[1] The Decomposition of CO₂ in Glow Discharge Sergey Y. Savinov, Hwaung Lee, Hyung Keun Song and Byung-Ki Na, Clean Technology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, P.O.Box 131 Cheongryang, Seoul 130-650, Korea (Received 16 February 2002, accepted 23 March 2002) Korean J. Chem. Eng 19(4), 564-566 (2002) SHORT COMMUNICATION.

[2] Effects of adding hydrogen to an argon glow discharge: overview of relevant processes and some qualitative explanations, Department of Chemistry, University of Antwerp (UIA), Universiteitsplein 1, B-2610 Wilrijk-Antwerp, Belgium, Received 13th December 1999, Accepted 2nd February 2000, Published on the Web 15th March 2000. DOI: 10.1039/a909779a.

[3] Electrical characteristics of (N₂-H₂) gas mixture DC glow discharge. M. A.Hassouba and E. A. Mehanna, Physics Department, Faculty of Science, Benha University, Benha, Egypt. Engineering Physics Department, Military Technical College, Cairo, Egypt. Accepted 16 September 2009. International Journal of Physical Sciences Vol. 4 (11), pp. 713-721, November, 2009. Available online at <http://www.academicjournals.org/ijps>. ISSN 1992 - 1950 © 2009 Academic Journals.

[4] V. Milantiev, S. Temko. Física de Plasmas; Ed. Mir Moscu; 1987.

[5] Chen Francis F; Chang Jane P. Principles of Plasma Processing; Ed. Plenum Kluwer Publisher. 2002.

[6] J. D. Swift and M. J. R. Schwar. Electrical probes for plasma diagnostic. New York, NY, USA; Elsevier, 1991.

[7] R. Castell, E. J. Iglesias, J. Ruiz Camacho; Glow discharge plasma properties of gases of environmental interest; Brazilian journal of physics; Vol. 4; No. 4B. 2004.

[8] Andre Anders; Handbook of plasma immersion ion implantation and deposition. Ed. John Wiley and Sons. 2000.

[9] A Bogaerts. Hydrogen addition to an argon glow discharge. A numerical simulation. J. Anal. Atomic Spectrometry, Vol. 17. No. 8, pp 768 – 779, Feb. 2002.

[10] H. M. Mott-Smith and I. Langmuir, \The theory of collectors in gaseous discharges," Physical review, vol. 28, no. 4, p. 727, 1926.

[11] N. Kang, S. Oh and A. Ricard. J. Phys. D: Appl. Phys. 41 (2008) 155203.

[12] V. A.Godyak, R. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich. J. Appl. Phys. 73 (1993) 3657.

[13] Chapman Brian Glow Discharge Processes, A Wiley-Interscience publication, 1980.

- [14] T. H. Chung, H. R. Kang, and M. K. Bae. *Phys. Plasmas* 19 (2012) 113502.
- [15] Jefferson Gonzales Gomez. Identificación de la temperatura electrónica de un plasma frío por medio de redes neuronales artificiales, pp 6-12, diciembre 2015.
- [16] R. Rajesh, B. R. Kumar, S. Varshney, M. Kumar, C. Chavda, A. Thakkar, N. Patel, A. Kumar, and A. Team, "Electron temperature (T_e) measurements by Thomson scattering system," *Pramana*, vol. 55, no. 5-6, pp. 733-740, 2000.
- [17] H. Griem, *Spectral line broadening by plasmas*. Academic Press, New York, 1974. 261.
- [18] Wenping Hu, Michio Matsumura, Kazuaki Furukawa, Keiichi Torimitsu; Oxygen Plasma Generated Copper Oxides Nanoparticles; *J. Phys. Chem. B* 108. 2004.
- [19] J. D. Swift and M. J. R. Schwar. *Electrical probes for plasma diagnostic*. New York, NY, USA; Elsevier, 1991.
- [20] H. Amemiya. Measuring methods of plasma parameters by a differentiating and modulating double probe, *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 27. No. 4, pp. 694 – 695. Feb. 1988.
- [21] H. T. Kim, D. K. Park, and W. S. Choi. Measurements of plasma parameters in low-frequency (60 Hz) hydrogen discharge. *J. Korean Phys. Soc.* Vol. 42. Pp. S916 – S919. Feb. 2003.
- [22] A Brockhaus, C. Borchardt, and J. Engemann. Langmuir probe measurements in commercial plasma plants. *Plasma Sour. Sci. Technol.* Vol. 3. No. 4, pp 539 – 544, Nov. 1994.
- [23] Optical emission spectroscopy of CO₂ glow discharge at low pressure. P. G. Reyes, E. F. Mendez, D. Osorio-Gonzalez, F. Castillo, and H. Martínez, *current topics in solid state physics*, p hys. stat. sol. (c) 5, No. 4, 907–910 (2008) / DOI 10.1002/pssc.200778306.
- [24] E. F. Mendez, P. G. Reyes, D. Osorio-González, F. Castillo, and H. Martínez. Langmuir probe and optical emission spectroscopy studies of low-pressure gas mixture of CO₂ and N₂. *Plasma Sci. Technol*; Vol. 12, No. 3, pp 314 – 319, Jun. 2010.
- [25] Plasma diagnostics of glow discharges in mixtures of CO₂ with noble gases. P.G. Reyes. A. Gómez. J. Vergara. H. Martínez. C. Torres. *Revista mexicana de física. versión impresa* ISSN 0035-001X. Rev. mex. fis. vol.63 no.4 México jul./ago. 2017. PACS: 52.20. Fs; 52.25.Os.
- [26] Study of DC Ar–CO₂ mixture plasma using optical emission spectroscopy and mass spectrometry techniques. H. Martinez, S. Perusquía, M. Villa, P. G. Reyes, F. B. Yousif, F. Castillo, and U. Contreras. *PHYSICS OF PLASMAS* 24, 043508 (2017). (Received 15 November 2016; accepted 24 March 2017; published online 11 April 2017. Published by AIP Publishing. [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4979995>])

[27] Production of Hydrogen-Rich Synthesis Gas by Pulsed Atmospheric Plasma Submerged in Mixture of Water with Ethanol. L. Bardos. H. Barankova. A. Bardos. Plasma Chem Plasma Process. DOI 10.1007/s11090-016-9766-6. Received: 19 April 2016 / Accepted: 20 November 2016. The Author(s) 2016. This article is published with open access at Springerlink.com.

[28] Atmospheric pressure methane–hydrogen dc micro-glow discharge for thin film deposition. T Farouk, B Farouk, A Gutsol and A Fridman. Department of Mechanical Engineering and Mechanics, Drexel University, Philadelphia, PA 19104, USA. Published 8 August 2008 Online at stacks.iop.org/JPhysD/41/175202.

[29] Broekaert, J. A. C. Analytical Atomic Spectrometry with Flames and Plasmas. Second edition. Wiley-VCH. Weinheim. 2005.

[30] Study of DC Ar–CO₂ mixture plasma using optical emission spectroscopy and mass spectrometry techniques. H. Martinez, S. Perusquia, M. Villa, P. G. Reyes, F. B. Yousif, F. Castillo, and U. Contreras, PHYSICS OF PLASMAS 24, 043508 (2017).

[31] M. Hopkins and W. Graham, "Langmuir probe technique for plasma parameter measurement in a medium density discharge," Review of scientific instruments, vol. 57, no. 9, pp. 2210{2217, 1986.

[32] M. Hopkins and W. Graham, "Langmuir probe technique for plasma parameter measurement in a medium density discharge," Review of scientific instruments, vol. 57, no. 9, pp. 2210{2217, 1986.

[33] R. L. Merlino, "Understanding langmuir probe current-voltage characteristics," American Journal of Physics, vol. 75, no. 12, pp. 1078{1085, 2007.

[34] J. G. Laframboise, "Theory of spherical and cylindrical Langmuir probes in a collisionless Maxwellian plasma," University of Toronto Aerospace Studies Report No. 11 (1966).

[35] R. L. Merlino, "Understanding langmuir probe current-voltage characteristics," American Journal of Physics, vol. 75, no. 12, pp. 1078{1085, 2007.

[36] 27. A Brockhaus, C. Borchardt, and J. Engemann. Langmuir probe measurements in commercial plasma plants. Plasma Sour. Sci. Technol. Vol. 3. No. 4, pp 539 – 544, Nov. 1994.

[37] Maxwell, J. C. (1867). "On the Dynamical Theory of Gases". Philosophical Transactions of the Royal Society of London 157: 49.

[38] Hart, E.J., Nucleónico, 19, 45, 1961. O'Donnell, J.H. y Sangster, D.F., Principles of Radiation Chemistry, American Elsevier Publishing Co., New York, 1970.