



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ESTUDIO DE UN PLASMA GENERADO POR UN PULSO
LÁSER DE NANSEGUNDOS EN AIRE MEDIANTE SEÑALES
ELÉCTRICAS PRODUCIDAS POR LA PERTURBACIÓN DEL
CAMPO ELÉCTRICO DE UN CAPACITOR.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

FÍSICO

P R E S E N T A:

ULISES VARGAS NOLASCO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. MAYO VILLAGRÁN MUNIZ

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2020





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno
Vargas
Nolasco
Ulises
55 48 46 12 70
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Física
309339652
2. Datos del asesor
Dr.
Mayo
Villagrán
Muniz
3. Datos del sinodal 1
Dr.
Jorge Alejandro
Reyes
Esqueda
4. Datos del sinodal 2
Dr.
Alejandro
Reyes
Coronado
5. Datos del sinodal 3
Dr.
Jesús
Flores
Mijangos
6. Datos del sinodal 4
M. en C.
Augusto
Cabrera
Manuel
7. Datos del trabajo escrito
Estudio de un plasma generado por un pulso láser de nanosegundos en aire mediante señales eléctricas producidas por la perturbación del campo eléctrico de un capacitor.
65 p
2020

Agradecimientos

En primera instancia quiero agradecer a mis padres toda la ayuda que me han brindado y haciendo uso de sus medios, siempre me han impulsado a ser una mejor persona. Quisiera dedicaros unos versos que valieran lo que vale vuestra luz. Pero no cabe en un folio el universo. Tampoco en una frase cabe mi gratitud.

Al Dr. Mayo Villagrán Muniz, por aceptarme como su estudiante, darme orientación, compartir conmigo sus conocimientos y darme su apoyo más allá del ámbito académico. Por confiar en mis habilidades y permitir desarrollar mi curiosidad como físico experimental. Por darme la oportunidad de participar en congresos, además de darme consejos y motivación en la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Tupak García Fernández por tener la paciencia de ensañarme y apoyarme en el desarrollo de la automatización de mi experimento. Por ser como mí segundo tutor, por las maravillosas ideas, por haberme apoyado en la realización de este proyecto, sobre todo por brindarme su amistad y su apoyo más allá del laboratorio.

A los miembros de mi Jurado el Dr. Jorge Alejandro Reyes Esqueda, el Dr. Alejandro Reyes Coronado, el Dr. Jesús Flores Mijangos y al M. en C. Augusto Cabrera Manuel por su atención, sus sugerencias y comentarios para mejorar este trabajo.

A mi hermano, que a pesar de nuestras diferencias de pensamiento, ha influenciado y ha ayudado a mejorar mi persona en todos los aspectos.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) por permitirme hacer uso de sus instalaciones y otorgarme una beca para poder concluir este trabajo. Y particularmente a todo el grupo del Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas, que me han brindado sus enseñanzas, su apoyo y sobre todo su amistad. Que me han hecho sentir que el laboratorio es como un segundo hogar.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) que me han formado y brindado tantas oportunidades de aprendizaje. Y que además me ha permitido conocer a personas excepcionales en el transcurso de mi formación. Por los apoyos otorgados para la realización de esta tesis, a través del proyecto IG100418 del Programa Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).

Por último y no menos importante a todos mis AMIGOS que me quieren y que quiero, que preferí no escribir nombres por si alguno se quedaba en el tintero. Les agradezco todas las experiencias vividas y que seguiremos viviendo. Por todas las enseñanzas que me han brindado y sobre todo, su cariño.

*A mi madre, por ser las columnas de mi templo.
Por enseñarme con su amor y con su ejemplo.*

*A mi padre, por ser bondadoso, lleno de paz y sabiduría.
Porque amas la verdad.*

*A mi hermano, por ser calor y abrigo.
Por perdonarme cuando no sé lo que digo.
Y por estar siempre conmigo, como el sol está en el trigo.*

Resumen

En este trabajo se estudiaron plasmas generados en aire por pulsos de luz láser de nanosegundos, mediante el análisis de señales eléctricas. Al enfocar un rayo láser pulsado en aire, se produce una densidad de radiación suficientemente alta para ionizar un átomo por medio de la fotoionización ¹. Los electrones libres producidos de esta manera son acelerados por el campo de radiación (bremsstrahlung inverso) y comienzan una cadena reacción de ionizaciones de impacto. Entonces, el aire es ionizado en la región focal generando un plasma. El plasma está formado por iones (principalmente de O y N) y electrones ².

Este estudio consistió en producir un plasma dentro de un campo eléctrico uniforme creado por un condensador de placas paralelas. La perturbación generada por el plasma en el campo eléctrico produce una redistribución de cargas en el par de placas. Esta redistribución produce una corriente eléctrica muy rápida que puede medirse como una caída de tensión a través de una resistencia conectada a tierra. Esta perturbación es captada por medio de un osciloscopio. Dicha perturbación depende de ciertos parámetros, en particular con los que se trabajó son los siguientes: la tensión aplicada a las placas, la energía de los pulsos del láser, la posición del plasma y la distancia entre placas. Para ello se optó por crear un sistema que permitiera hacer los experimentos de una manera lo más automatizada posible, incluyendo el desarrollo de varios programas en Matlab para controlar un láser de Nd:YAG, un generador de pulsos, un medidor de energía, una fuente de alto voltaje, unas mesas de desplazamiento y un osciloscopio. Esta automatización permite realizar el estudio *in-situ* y en tiempo real.

En el primer experimento se varió la posición del plasma y se fijaron los demás parámetros, obteniendo la posición óptima donde el área y la amplitud del primer pico de la señal eléctrica son máximas. Los siguientes dos experimentos consistieron en variar la distancia entre las placas. En el primero, se fijó una placa y se cambió la distancia de la otra placa alejándola, la posición del plasma se ubica a 7 (0.05) mm de la placa fija. En el segundo experimento, se generó el plasma en medio de las dos placas y se varió la separación de estas. Se realizó un análisis de la señal eléctrica en función de la separación de las placas y en particular con el segundo experimento se corroboró los resultados obtenidos por O. Bredice et al.³. En el último experimento los parámetros que se variaron fueron la tensión entre las placas y la energía de los pulsos del láser. En todos

los experimentos se colocó un medidor de energía después del lugar de formación del plasma. Esto con la finalidad de medir la energía transmitida.

La posición óptima del plasma donde el área y la amplitud del primer pico de la señal eléctrica son máximas es a 7 (0.05) mm de la placa de tierra. Por otro lado, cuando se dejó fija una placa y se movió la placa conectada a tierra, se encontró que la amplitud cae con una potencia de $x^{-2.4}$ y el área con una potencia de $x^{-2.49}$, en función de la distancia entre placas. En cambio, cuando el plasma es producido en medio de las placas y las placas se van alejando al mismo tiempo, se corrobora que la dependencia del área y la amplitud con respecto la distancia entre las placas tiene un comportamiento como $x^{-2.71}$ y $x^{-2.77}$, respectivamente. Esto empata con los resultados obtenidos por el O. Bredice y sus colaboradores. En el último experimento donde se varía la energía de los pulsos del láser y la tensión entre las placas, se encontró una relación que vincula estos dos parámetros.

$$A(V_s, E) = \{(1.33 \times 10^{-9}) + (3.38 \times 10^{-11})E\} \\ + \{(-1.35 \times 10^{-9}) - (3.37 \times 10^{-11})E\} e^{\{(-5.99 \times 10^{-4}) + [(6.55 \times 10^{-5}) \ln(E - 54.46)]\}} V$$

La semi-automatización permitió robustecer la estadística y de esta manera asociar una ecuación al experimento.

Se logró obtener una interpretación física de las señales estudiadas, que permite la correspondencia entre teoría y experimento. Los resultados obtenidos a partir de los experimentos sobre la energía transmitida muestran que la intensidad del campo eléctrico producido por el condensador de placas paralelas no afecta a la energía transmitida.

Índice general

AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	V
ÍNDICE GENERAL	VII
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1. ESTADO DEL ARTE	4
1.1 PLASMAS.....	4
1.2 PLASMAS INDUCIDOS POR LÁSER EN AIRE	5
1.2.1 ROMPIMIENTO EN AIRE (“ <i>BREAKDOWN</i> ”), RADIACIÓN DE FRENADO (“ <i>BREMSSTRAHLUNG</i> ”) Y EL “INVERSO DE <i>BREMSSTRAHLUNG</i> ”.....	5
1.2.2 CARACTERÍSTICAS Y FENÓMENOS DESPUÉS DEL ROMPIMIENTO	6
1.3 ANTECEDENTES Y TRABAJOS REALIZADOS MEDIANTE ESTUDIOS ELÉCTRICOS A LIPS.....	8
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	12
2.1 ARREGLO EXPERIMENTAL	12
2.2 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE PLACAS Y POSICIÓN DEL PLASMA	14
2.2.1 VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DEL PLASMA Y DISTANCIA ENTRE PLACAS FIJA	14
2.2.2 VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DE LA PLACA CONECTADA A LA FUENTE, POSICIÓN DEL PLASMA FIJO.....	17
2.3 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE PLACAS	18
2.4 VARIACIÓN DE LA TENSIÓN ENTRE PLACAS Y VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DE PULSOS LÁSER	19
2.5 TRATAMIENTO DE LAS SEÑALES.....	20
2.6 ANÁLISIS DE LA ENERGÍA TRANSMITIDA.....	24
2.7 RESUMEN DE EXPERIMENTOS REALIZADOS	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.1 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE PLACA Y POSICIÓN DEL PLASMA.....	27
3.1.1 VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DEL PLASMA Y DISTANCIA ENTRE PLACAS FIJAS.....	28
3.1.2 VARIACIÓN DE LA POSICIÓN DE LA PLACA CONECTADA A LA FUENTE, POSICIÓN DEL PLASMA FIJO.....	32
3.2 VARIACIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE PLACAS	33
3.3 VARIACIÓN DE LA TENSIÓN ENTRE PLACAS.....	35
3.3.1 ANÁLISIS DE LA TENSIÓN ENTRE LAS PLACAS.....	37

3.4	VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DEL PULSO DEL LÁSER	39
3.5	ECUACIÓN DE TENSIÓN-ENERGÍA	41
3.6	INTERPRETACIÓN FÍSICA DE LA SEÑAL ELÉCTRICA	43
4.	CONCLUSIONES.....	47
5.	TRABAJOS FUTUROS	49
6.	REFERENCIAS.....	50
7.	APÉNDICE	53
7.1	VARIACIÓN DE LA TENSIÓN ENTRE LAS PLACAS	53
7.1.1	ANÁLISIS DE LA TENSIÓN ENTRE LAS PLACAS.....	54
7.2	VARIACIÓN DE LA ENERGÍA DEL PULSO DEL LÁSER	55

Introducción

El conocimiento que se tiene del universo y su composición hasta ahora indica que 73% representa la energía oscura, 23% materia oscura y 4% materia normal ⁴. La mayor parte de la materia normal que podemos ver en el firmamento se encuentra en estado de plasma. El Sol, las estrellas calentadas por fusión nuclear, los vientos solares, las nebulosas (dentro de su composición también se halla polvo cósmico) son algunos ejemplos de materia en forma de plasma que se encuentran fuera de nuestro planeta. Por otro lado, dentro de la Tierra se encuentran fenómenos en estado de plasma, como las auroras boreales y los relámpagos ⁴. Sin embargo, dentro de la vida diaria podemos encontrar más ejemplos, los tubos fluorescentes o monitores con pantalla de plasma.

La generación de los plasmas inducidos por láser, “LIP” (por sus siglas en inglés “*laser induced plasmas*”) ha traído consigo el interés de conocer con más profundidad el proceso y los fenómenos que del se desprenden. Esto ha llevado a la incesante investigación y el desarrollo tecnológico de láseres y tecnologías de detección.

En 1960, se reporta la operación del primer láser en un cristal de rubí ⁵. Tres años después, se observa que enfocando el láser de rubí, se produce una chispa ^[4-6]. En ese mismo año nace una de las técnicas más poderosas: la técnica de espectroscopia de rompimiento inducida por láser, “LIBS” (por sus siglas en inglés “*Laser-induced breakdown spectroscopy*”). Dicha técnica en los años posteriores logra hitos de gran importancia en diferentes campos de la investigación. En 1966, se analizó metal fundido directamente con el chispazo láser ⁵; en 1980, LIBS es utilizado en la industria de la energía nuclear ⁵; en 1992, se utiliza para detectar metales en suelos ⁵.

Por otro lado, el entendimiento de los LIPs también ha servido para sistemas de encendido por láser que producen un consumo menor de combustible, además de la reducción de gases de combustión ^[7-9].

Este trabajo se centra en estudiar plasmas inducidos por láser. Se abarcarán conceptos fundamentales de la física de plasmas, diferentes métodos de análisis y algunas de sus implicaciones dentro del desarrollo tecnológico.

El LIBS permite la detección y medición de especies elementales a través del análisis espectral de la luz emitida por el LIP ^[4,10]. Sin embargo, para el estudio del LIP se utilizan otras técnicas que involucran fenómenos, como el cambio en el índice de refracción, que se estudia a través de la técnica de sombras (“*Shadowgraphy*”) ¹¹. También se utiliza el cambio de fase que permite medir la densidad de electrones y la temperatura del gas, a través de interferometría ¹¹. Otra técnica que permite estudiar los componentes de la

muestra, los valores cuantitativos de la temperatura y la densidad electrónica es la espectroscopia de emisión resuelta en tiempo ¹¹. Otro fenómeno que está inmerso en la generación de los LIPs es el efecto fotoacústico, que se produce cuando pulsos de láser interactúan con la materia, produciendo ondas ultrasónicas. Esta técnica basada en el efecto fotoacústico, permite obtener información sobre propiedades termoelásticas de los materiales ^[11,12].

Por otro lado, durante la formación del plasma se observan otros fenómenos particulares, como: la variación espacio-temporal del potencial del campo eléctrico y los campos magnéticos autogenerados ¹³. Para realizar el estudio de estos fenómenos se utilizan sondas de cable coaxial y sondas \dot{B} (bobina inductiva de 4 vueltas) ^[13-15].

En este trabajo se utilizó un método alternativo, un diagnóstico eléctrico que utiliza el mismo procedimiento que la espectroscopia fotogalvánica ^[12,15]. El procedimiento utilizado es el siguiente: mediante un par de placas paralelas circulares se genera un campo eléctrico; en la parte central del condensador donde el campo eléctrico es uniforme se produce una descarga mediante un pulso de luz láser. Dicho condensador es parte de un circuito eléctrico. La perturbación generada por el plasma en el campo eléctrico produce una redistribución de las cargas en las placas. Esta redistribución produce una corriente eléctrica muy rápida que puede medirse como una caída de tensión a través de una resistencia conectada a tierra ^[9, 15]. En los métodos antes mencionados, generalmente se requiere de una instrumentación sofisticada, en cambio el método aquí utilizado resulta fácil de implementar.

En el presente trabajo se estudiaron LIP's hechos en aire, mediante el diagnóstico eléctrico. Para realizar el estudio se variaron algunos de los parámetros, como: la energía de los pulsos del láser, la tensión aplicada a las placas, la distancia entre las placas y la posición del plasma dentro del capacitor. Se midió la energía transmitida de los pulsos láser como un análisis complementario.

Con la intención de ampliar el número de mediciones a realizar en los experimentos, se optó por semi-automatizarlos. El arreglo experimental fue similar al usado por el Dr. Fausto O. Bredice, quien junto a sus colaboradores fue el que originalmente propuso esta técnica ³. La diferencia entre los dos arreglos fue un condensador eléctrico, que no participa en el circuito utilizado en este trabajo. El condensador conectado en paralelo con una resistencia cumple la función de filtro en el trabajo de Fausto O. Bredice.

Objetivos

Objetivo general:

Estudiar señales producidas en el circuito eléctrico por la acción de los plasmas producidos por pulsos de láser, así como sus dependencias de parámetros experimentales.

Objetivos particulares:

1. Desarrollar un sistema experimental lo más automatizado posible, incluyendo la implementación de programas en Matlab para la obtención de los datos, así como para el procesamiento in-situ y en tiempo real de estos datos.
2. Estudiar el efecto de la energía de los pulsos láser en el comportamiento de la señal eléctrica.
3. Estudiar el efecto de la tensión entre el par de placas en el comportamiento de la señal eléctrica.
4. Estudiar el efecto de la distancia entre placas del condensador en el comportamiento de la señal eléctrica.
5. Estudiar el efecto de la posición relativa del plasma en el comportamiento de la señal eléctrica.
6. Encontrar relaciones matemáticas que describan el comportamiento de las mencionadas dependencias.

1. Estado del Arte

En este capítulo se presentarán conceptos básicos utilizados durante este trabajo. Primero se abordará el concepto de plasma y sus características. Después, se describirán los LIPs en aire, sus características y los fenómenos posteriores que se producen cuando el aire pierde su propiedad aislante. Por último, se revisarán los antecedentes y los trabajos realizados de LIPs mediante estudios eléctricos.

1.1 Plasmas

De la materia normal en el Universo, se sabe que el 3.96% de la materia está conformada por el cuarto estado de la materia. El otro 0.04% por los tres estados de la materia restantes ⁴.

El concepto contemporáneo de plasma se remonta a inicios de los años cincuenta. Un plasma es un gas ionizado, pero en general los gases presentan cierto grado de ionización. Entonces, una de las definiciones más comunes es la siguiente:

*Un plasma es un gas cuasi-neutral de partículas neutras y cargadas, que exhibe un comportamiento colectivo.*⁴

Por comportamiento colectivo se refiere no solo a las interacciones que se puede tener con los alrededores (condiciones locales) sino también del estado del plasma en regiones remotas del mismo. Por ejemplo, si a un gas neutro se le aplica una fuerza macroscópica, ondas sonoras por medio de un altavoz, esta fuerza se transmitirá por medio de colisiones. Sin embargo, en un plasma es distinto. Las partículas cargadas al moverse pueden generar concentraciones de carga eléctrica positiva y negativa. Esto resulta en la generación de campos eléctricos y magnéticos.

Cuando a un átomo se le extrae o da uno o más electrones, lo que resulta es un átomo con exceso o escasez de cargas negativas, a esto se le denomina ion. Una manera de ionizar un gas puede ser a través de un calentamiento a altas temperaturas (superiores a $T=11,600$ K) ⁴. También puede ser inducida a través de la aplicación de campos electromagnéticos intensos, como el de un láser o un generador de microondas.

Entonces, un gas ionizado que pierde electrones y que los mantiene en sus cercanías puede ser llamado un plasma. El hecho de que el plasma sea neutro significa que $n_i \approx n_e \approx n$, donde n_i la densidad iónica, n_e la densidad electrónica y n una densidad llamada densidad del plasma, pero no tan neutro para que las interacciones electromagnéticas pierdan importancia ^[4,16].

1.2 Plasmas inducidos por láser en aire

Al enfocar un pulso láser en un volumen submilimétrico de un medio gaseoso, el gas pierde su propiedad aislante y pasa a ser conductor. Esto debido a que los campos eléctricos del láser son muy intensos (del orden de 10^6 a 10^7 V/cm^{-1} ⁵) y superan el valor límite de la intensidad de campo eléctrico del medio (aire), como consecuencia ocurre lo que llamamos rompimiento del gas. El rompimiento genera una chispa de temperatura y densidad de partículas altas ($T > 10^4$ y $n > 10^{20}$) [2, 18, 19].

1.2.1 Rompimiento en aire (“*breakdown*”), radiación de frenado (“*bremssstrahlung*”) y el “inverso de *bremssstrahlung*”

Para producir un plasma en aire a una presión de 580 torr (presión similar a la de la CD. MX.) se necesita que la intensidad del láser sea del orden de 10^9 W/cm^2 o superiores ⁵. El plasma es generado por el rompimiento del gas debido al campo eléctrico asociado al láser. El umbral necesario para que esto suceda es del orden de 10^6 a 10^7 V/cm^{-1} ⁵. El umbral de ruptura se produce cuando el campo eléctrico en el punto focal supera la rigidez dieléctrica del aire y no debido a la absorción selectiva de la radiación láser por un átomo o molécula ¹⁹.

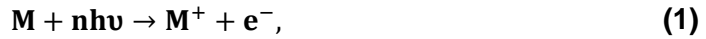
La ruptura depende de parámetros experimentales, como la duración del pulso láser, la longitud de onda, la irradiancia relacionada con el material óptico (el tamaño del punto focal), las características del blanco, entre otros ¹³.

Para el proceso de ruptura del gas, tienen que suceder dos etapas:

En la primera, en las inmediaciones del volumen focal del pulso deben encontrarse unos cuantos electrones (por lo menos uno). Estos pueden ser liberados por luz ultravioleta, rayos cósmicos o la radiactividad natural de la Tierra. Sin embargo, también pueden ser emitidos por la interacción de los primeros fotones del pulso láser con los átomos. Liberando del polvo iones negativos como O_2^- a través de la ionización multifotónica de átomos y moléculas en la atmósfera ⁵. Los procesos multifotónicos son imprescindibles para la ionización de ciertas especies debido a que sus energías de ionización son mucho mayores que la de los fotones utilizados normalmente en los pulsos de luz láser. Por ejemplo, para O_2 y N_2 se necesitan energías de ionización de 12.2 eV y 15.6 eV, respectivamente. Las energías de los fotones del láser Nd:YAG 1064, 532 y 266 nm es de 1.25, 2.33 y 4.7 eV, respectivamente ¹³.

La segunda etapa, consiste en crear una avalancha de ionización en la región focal. Para ello existen dos procesos distintos que esencialmente dependen de las densidades de energía del láser que se utilicen, la ionización multifotónica “*multiphoton ionization (MPI)*” y el *bremssstrahlung* inverso.

La ionización multifotónica requiere generalmente que los electrones adquieran energías mayores que la energía de ionización del gas, además es un proceso no lineal. Este proceso conlleva la absorción simultánea de una cantidad suficiente de fotones por una molécula o átomo produciendo finalmente la ionización. La producción de iones se puede expresar de la siguiente manera:



donde n es número de fotones absorbidos y M representa al átomo o molécula del gas. Entonces un electrón en la zona focal absorbe fotones y adquiere la energía cinética suficiente para ionizar otros átomos por medio de colisiones. Los electrones que chocan son reemplazados por electrones de baja energía. Estos absorben fotones del pulso láser de tal manera que se produce una avalancha de ionización. Este proceso de multiplicación de electrones continúa hasta finalizar el pulso láser. Este efecto es dominante cuando la longitud de onda está en ultravioleta.

En el momento en que la radiación entra en contacto con la materia (en este caso aire), el campo asociado al pulso acelera a los electrones libres que se encuentran en el ambiente y provoca choques elásticos con los núcleos atómicos. Este proceso es conocido como *bremssstrahlung* inverso. Entonces, en los choques elásticos las partículas más pesadas (átomos/iones) tienen la función de conservar el momento y la energía, mientras que durante la colisión los electrones absorben fotones. Esto conduce a una termalización de la distribución de energía de los electrones, una pequeña parte de estos electrones tendrá la suficiente energía para ionizar un átomo a través de la reacción:



Los nuevos electrones se aceleran debido al campo eléctrico presente y continuará la cascada de ionización, hasta finalizar el pulso láser. Este proceso es dominante cuando se utilizan pulsos láser en la región del infrarrojo ¹³.

1.2.2 Características y fenómenos después del rompimiento

Los fenómenos expuestos con anterioridad terminan en un plasma formado en la vecindad del punto focal. Una característica que se nota de manera inmediata es la formación de un pequeño “chispazo”, una fuente de luz intensa, que irradia en todas las direcciones. La luz proviene de los procesos de recombinación de electrones libres, teniendo como resultado la formación de átomos neutros y luego moléculas. Durante el proceso, en todo momento hay electrones decayendo a estados de energía más bajos (espectro continuo) con el tiempo, más rápido que las líneas espectrales. El continuo se debe a eventos *bremssstrahlung* (libre – libre) y recombinación (libre – ligado). El *bremssstrahlung* inverso es responsable de la absorción de la radiación laser ²⁰. Instantes después el plasma empieza a expandirse, dada su alta densidad y elevada temperatura, superiores a los 10,000 K. La energía utilizada en la formación del plasma, instantes después es transmitida, reflejada, dispersada o absorbida. La energía absorbida es disipada en varios mecanismos: absorción multifotónica, radiación del plasma, energía acústica y los efectos mecánicos como la onda de choque. El sonido se escucha inmediatamente después del rompimiento es debido a la onda de choque durante el rompimiento óptico.

Los plasmas se han fotografiado y han analizado su estructura cuidadosamente. En 1966, Young et al. ² observaron 3 regiones. La primera un núcleo extremadamente intenso con

la forma de un cilindro alargado, alineado en la dirección de la lente. La segunda, es una región menos intensa donde se puede observar divisiones de lóbulo o estrías. Por último, una nube que rodea a las dos anteriores regiones. Esta nube probablemente constituida por átomos excitados de iones y electrones (ver Figura 1.1). Uno de los resultados importantes en el trabajo de Young, es que independientemente de la energía utilizada, el plasma es prácticamente reproducible en todas sus características.

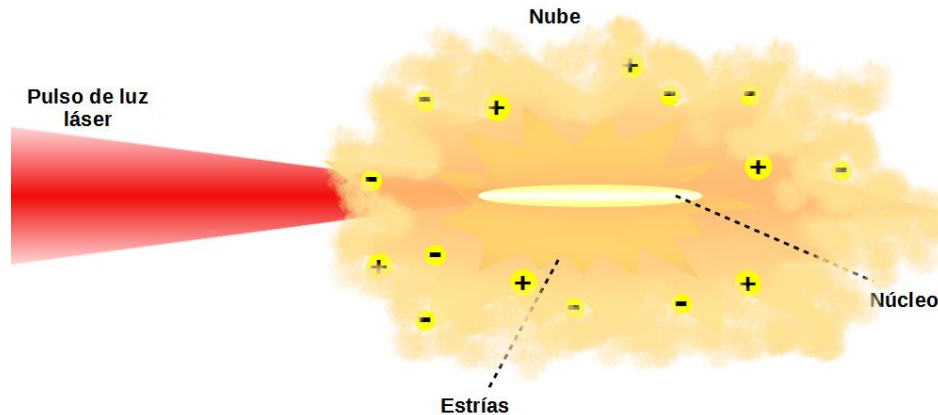


Figura 1.1. Esquema del plasma. Se observan las tres regiones que lo conforman.

En otros trabajos [21–24], se crearon múltiples plasmas al estudiar el valor absoluto del campo de un haz láser por sistemas ópticos con aberración esférica²⁵. Años más tarde, Morgan et al. (1975)²⁶ estudiaron el papel que tienen las aberraciones esféricas en los LIPs. Como resultado de estas investigaciones, sabemos que cuando un láser se enfoca con una lente, la distribución de la irradiancia en el foco depende del modo de oscilación del láser, de las aberturas en los sistemas ópticos y de los parámetros de la lente.

Otros de los parámetros estudiados a lo largo de los años es el comportamiento del rompimiento a diferentes presiones. Sivanandan S. Hiralal et al.¹³ encontraron que la fracción de energía absorbida disminuye fuertemente con la presión, además de alterar el tamaño y la forma del plasma. No proporcionan números cuantitativos sobre estas características. Nick Glumac y Greg Elliott¹³ realizaron un estudio más detallado de los efectos de la presión. En el rango de 0.1 a 1 atm se estudió el tamaño, la temperatura, la forma, la densidad de electrones y la fracción de energía absorbida y dispersada.

En 2005, Phuoc²⁷ produce LIPs a presión atmosférica. Dentro de sus resultados, sugiere que la energía absorbida del láser se transmite principalmente a la onda de choque (51–70 %), la radiación emitida a los alrededores (22–34 %) y en energía térmica (7–8 %).

En una investigación donde se trabajó con un plasma formado a través de un pulso láser de 1064 nm, se observa que la absorción del LIP aumenta con la energía incidente del láser, y a energías superiores llega a observarse una saturación de absorción³.

Por otro lado, la radiación del láser que interacciona con el plasma se divide en la energía que se dispersa y se absorbe, esta última dando lugar a las líneas espectrales y al espectro continuo.

Un fenómeno interesante y que fue reportado por Askar'yan et al. (1965)²⁸ fue el de la aparición de un momento dipolar eléctrico inducido. Esto debido a la interacción del pulso láser enfocado en aire. El momento dipolar se observó en dirección opuesta al flujo de luz.

La carga positiva es acumulada en la parte frontal y la carga negativa en la parte posterior. Desde este momento se han publicado trabajos de estructuras del potencial eléctrico en plasmas producidos por pulsos láser [13,28,29]. En dichos trabajos se reportan distribuciones dipolares y cuadrupolares del potencial de campo eléctrico.

Se han medido las estructuras espacio-temporales del potencial de los campos eléctricos mediante diferente tipo de sondas. Kabashin y Nikitin (1997) ³⁰ encontraron estructuras cuadrupolares del potencial de campo eléctrico, que consisten básicamente en dos dipolos colineales en sentidos opuestos en la parte frontal y posterior del plasma.

De igual forma se reporta estudios donde se observan campos magnéticos espontáneos o autogenerados (por sus siglas en inglés “*spontaneous*” or “*self-generated*” *magnetic fields*). V. V. Korobkin y R. V. Serov (1966) midieron el campo magnético del plasma inducido por láser ³¹. Observaron que el momento resultante fue perpendicular a la dirección de propagación del láser. En 1985, investigaciones realizadas por V. I. Konov et al. ³², donde el rompimiento fue realizado por pares de pulsos en aire, el LIP generado posee una distribución eléctrica cuadrupolar, esto debido al cambio resultante en la dirección de las estructuras espacio-temporales del SMF, los cuales son asociados con la presencia de corrientes opuestas al plasma.

En 2013, Fuentes et al. ¹⁵, observaron un LIP generado con un láser de longitud de onda de 1064 nm. En este trabajo postula lo siguiente, “*A possible explanation of the observed dipole is that the electrons move outward faster when separating from the ionization front, resulting in a positive zone on the wave-front and polarizing the plasma. Thus it produced a net positive charge in the front side. The displacement of the ionization front can be considered as a positive current moving towards the lens. This current generates an azimuthal magnetic field around the plasma. The electrons which escape radially are deviated to the rear part of the plasma due to the Lorentz force, generating an accumulation of negative charge in the trailing front. In this way the dipole is formed*”.

1.3 Antecedentes y trabajos realizados mediante estudios eléctricos a LIPs

En numerosos trabajos se ha reportado la interacción de un plasma inducido por láser ante un campo eléctrico [17,27,32-37]. Generalmente estos estudios son motivados por las aplicaciones físicas, en particular con tensiones altas (40 kV a 3 MV) ³⁸, debido a las diferentes aplicaciones, como los interruptores de descargas de alta tensión ³⁹ o como disparadores láseres ^{38,39}.

Bredice et al. ³ desarrollaron un método similar a la espectroscopia optogalvánica. Dicho método consiste en generar un LIP dentro de un campo eléctrico producido por un condensador de placas paralelas C1, ver Figura 1.2. El chispazo dentro de las placas produce una perturbación en el campo eléctrico, que se puede medir a través de una resistencia R conectada en paralelo con un condensador C2 a la placa de tierra. La perturbación producida por el chispazo genera una redistribución de cargas generando una pequeña corriente eléctrica.

La señal eléctrica producida guarda una estrecha relación con los siguientes parámetros: la energía de ruptura, la tensión utilizada entre las placas y la distancia entre las placas ³.

$$h = k_c E_b \frac{V}{d^{2.8}}, \quad (3)$$

donde h es la amplitud máxima de la señal, k_c es una constante que depende de los parámetros del circuito, E_b es la energía de los pulsos láser utilizada para producir la ruptura, V la tensión aplicada a las placas y d es la distancia entre el par de placas.

En diversos trabajos realizados por el grupo del Laboratorio de Fotofísica y Películas Delgadas del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, se ha utilizado esta técnica eléctrica. En 2005, con este método se estudió la ablación láser en metales. Se generó un plasma mediante un pulso láser de Nd:YAG. El pulso láser fue enfocado en un blanco metálico en aire. Para el análisis del plasma, se colocó el par de placas paralelas tratando que el blanco y el plasma quedaran justo en medio.

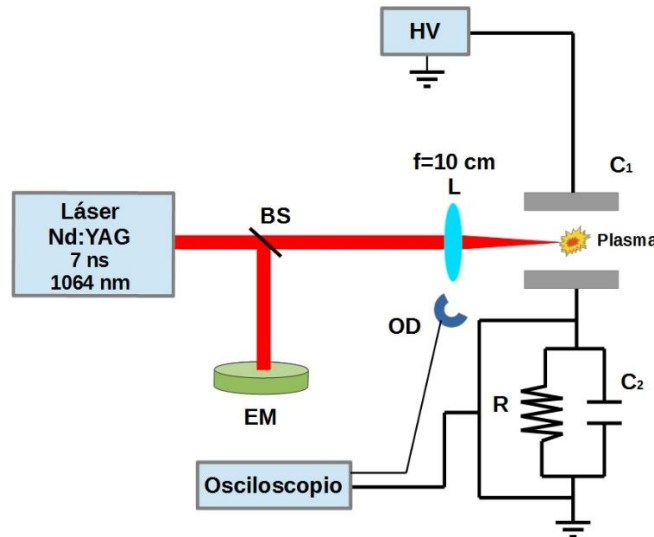


Figura 1.2. Arreglo experimental utilizado por Bredice et al. ³, para analizar la perturbación producida por el chispazo láser ante un campo eléctrico dc. EM: medidor de energía, HV: fuente de alto voltaje, OD: fotodiodo, BS: divisor de haz, R: resistencia, C₁ y C₂ capacitores.

Detrás del blanco se colocó un sensor piezoeléctrico, con él se registró una señal fotoacústica que fue grabada en el osciloscopio. Para medir la energía dispersada se retiraron las placas paralelas y se colocó un filtro interferencial conectado a un medidor de energía (ver Figura 1.3). Del análisis de las señales obtenidas con los diferentes métodos anteriormente mencionados, se obtuvo información para hacer un balance de la energía utilizada para generar el plasma. Por otro lado, usando la señal eléctrica se optimizó el punto de ablación en los blancos metálicos ⁴⁰.

En 2007 ⁴¹, enfocando un pulso laser de Nd:YAG en aire y en blancos de cobre, se realizó la medición de la perturbación del chispazo dentro de un campo eléctrico producido por un par de placas paralelas.

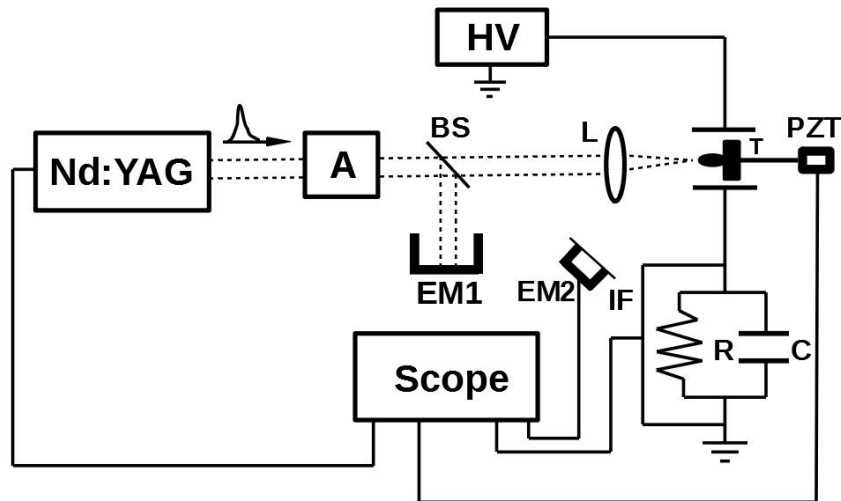


Figura 1.3. Arreglo experimental utilizado para analizar la energía utilizada en la ablación láser, en aire y en blancos sólidos. A: atenuador, BS: divisor de haz, EM: medidor de energía, IF: Filtro interferencial, T: blanco, L: lente, PZT: sensor piezoeléctrico, HV: fuente de alto voltaje, R: resistencia, C: capacitor. Imagen tomada de ⁴⁰.

De manera paralela, se utilizó un espectrómetro para medir el ensanchamiento Stark de las líneas H_{α} (ver Figura 1.4). En este trabajo se encontró una relación unívoca de la evolución temporal del ensanchamiento Stark de la línea H_{α} y el pico de la señal eléctrica medido a través de la resistencia. Este método, después de realizar una calibración adecuada con el material de estudio, se puede usar para predecir la evolución temporal de la densidad de electrones del plasma generado.

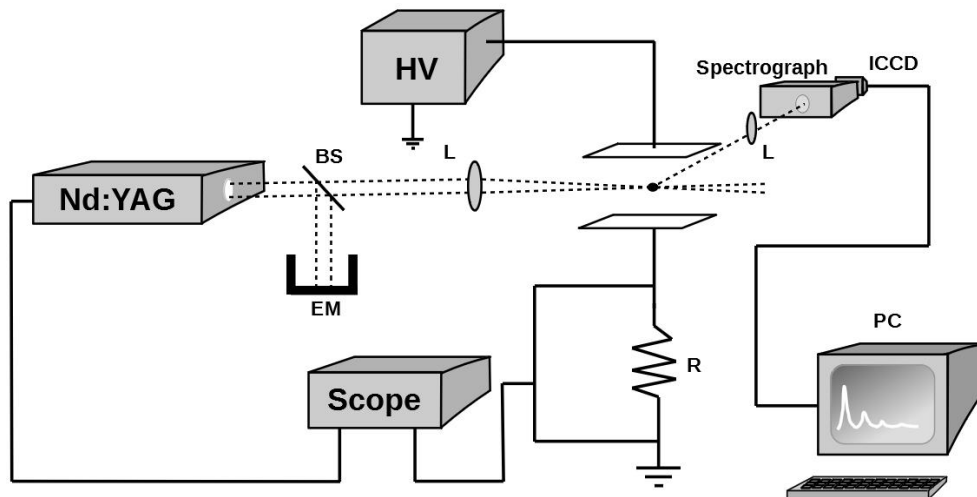


Figura 1.4. Arreglo experimental para medir las líneas H_{α} y la señal eléctrica. BS: divisor de haz, HV: fuente de alto voltaje, EM: medidor de energía, L: lente, R: resistencia. Imagen tomada de ⁴¹.

En 2018, Pacheco et al. ⁴², llevó a cabo experimentos analizando el fenómeno de ablación láser en metales mediante la técnica de señales eléctricas ³. Se utilizó un arreglo experimental similar a ⁴⁰. En esta ocasión se relacionó la amplitud máxima de la señal medida a través del resistor con la cantidad de masa ablacionada.

La gran mayoría de métodos para analizar un plasma requieren de una sofisticada instrumentación. El método eléctrico que se utilizó en este trabajo tiene una muy buena

relación señal-ruido y además permite construir curvas de calibración para realizar mediciones cuantitativas.

2. Desarrollo Experimental

En la elaboración del experimento se utilizó un láser pulsado de nanosegundos con una longitud de onda de 1064 nm, para producir un plasma en aire. Se usó un circuito eléctrico para estudiar el comportamiento de las señales producidas en el mismo, cuando enfocamos el láser entre las placas paralelas de un capacitor. Las señales producidas se detectaron mediante un osciloscopio y se hizo un análisis *in-situ* de dichas señales.

Se variaron parámetros experimentales del láser y del circuito eléctrico (la energía del pulso láser, la tensión entre las placas, la posición del plasma y la distancia entre placas), de manera que se pudieron estudiar señales eléctricas producidas en el circuito.

Los experimentos fueron realizados de una forma semi-automatizada y controlados mediante un programa escrito en Matlab. Cabe mencionar que el proceso de semi-automatización y la escritura del programa en Matlab es una implementación de mi autoría. Para el desarrollo de lo anterior mencionado se consultó los manuales de los aparatos involucrados en el experimento ^[43–49].

Este capítulo está dividido en varios tópicos, donde se indican los pasos involucrados, los equipos y dispositivos utilizados. La explicación de los experimentos se hará de dos maneras. Una de forma general, donde no se entrará en detalles. La segunda, se hará explicando los detalles pertinentes que involucran las posiciones específicas de los aparatos y el uso de los programas escritos en Matlab. El anexo donde se encuentra el código de cada uno de los experimentos no se agrega al trabajo debido a la gran cantidad de hojas que ocupa.

2.1 Arreglo experimental

El arreglo experimental usado en este trabajo se muestra en la Figura 2.1. Se usó un láser Nd:YAG, modelo Surelite III-10 de la firma Continuum, con longitud de onda de 1064 nm. Inmediatamente después del láser se colocó un atenuador de la marca Newport, modelo 935-10. El atenuador controla la energía de los pulsos. A continuación, se colocó un espejo E1 para cambiar la dirección del haz hacia la lente de ablación. La lente L1

utilizada es convergente, plano convexo de una pulgada de diámetro, de cuarzo y de 100 mm de distancia focal. En la región del haz enfocado se colocaron las placas paralelas del circuito con el que se llevó a cabo el análisis del plasma. Los elementos del circuito fueron los siguientes: una fuente de alto voltaje marca Stanford Research Systems, modelo PS350, dos resistencias, R1 de 330 (16.5) Ω de marca comercial (la forma en que se reporta las incertidumbres se justifica en ^{50,51}) y R2 de 1 (0.05) Ω (un alambre de aluminio, con un grosor de 0.7 (0.05) mm y una longitud de 89 (0.05) mm) y un par de placas paralelas de aluminio, con un diámetro cada una de 5 (0.005) cm hacen la función de capacitor. Este parámetro no se cambió y se mantuvo constante ya que el factor del tamaño de las placas no afecta a la amplitud del primer pico de la señal eléctrica ⁵². Todos estos elementos conectados en serie. Detrás de E1 se colocó un fotodiodo de respuesta rápida modelo DET10A, marca Thorlabs, que monitoreó el comportamiento de los pulsos de láser. El fotodiodo se conectó a un osciloscopio de la marca Tektronix, modelo 5054B con una impedancia de 50 Ω . Por otro lado, se conectó en paralelo la resistencia R2 al osciloscopio.

Para la medición de los pulsos se utilizó un medidor de energía y potencia modelo VEGA y un cabezal piroeléctrico de alta energía modelo PE50BF-DIFC/PE50BF-DIFH-C marca OPHIR. Para determinar la energía utilizada el cabezal del piroeléctrico se colocó después del espejo E1, en la posición del cuadro punteado mostrado en la Figura 2.1. Después de calibrar el atenuador con la energía requerida, se colocó el cabezal del piroeléctrico detrás de donde se forma el plasma, para medir la energía transmitida.

El par de placas paralelas montadas en soportes fueron colocadas encima de dos mesas de desplazamiento movidas por dos servomotores Z825B conectados a dos dispositivos controladores TCH001 y TDC001, de la marca Thorlabs. En el concentrador TCH001 se colocaron dos controladores TDC001, que sirven de interfaz y se encargan de mandar instrucciones a los servomotores desde una PC. Todos los elementos de los desplazadores son de la firma Thorlabs.

La PC también controló un generador de pulsos, modelo DG645, marca Stanford Research Systems, que disparó el láser. De igual manera, le mandó instrucciones al medidor de energía y al osciloscopio acerca de en qué momento empezar a recabar la información. También, le dio instrucciones a la fuente de alto voltaje para fijar y cambiar la tensión que hubo entre las placas paralelas. La computadora manipuló todos los aparatos, excepto el atenuador, debido a la falta de condiciones de motorización. El osciloscopio, la fuente de alto voltaje y el generador de pulsos se controlaron mediante una interfaz GPIB-USB-HS de la marca National Instrument. Las mesas de desplazamiento y el medidor de energía fueron conectados mediante una interfaz USB – RS 232. Se utilizó un programa escrito en Matlab, versión 2014b, para controlar el generador de pulsos, osciloscopio, fuente de alto voltaje, mesas de desplazamiento y el medidor de energía. En los subcapítulos siguientes se describirá de forma más detallada los diferentes experimentos que se realizaron con este arreglo experimental.

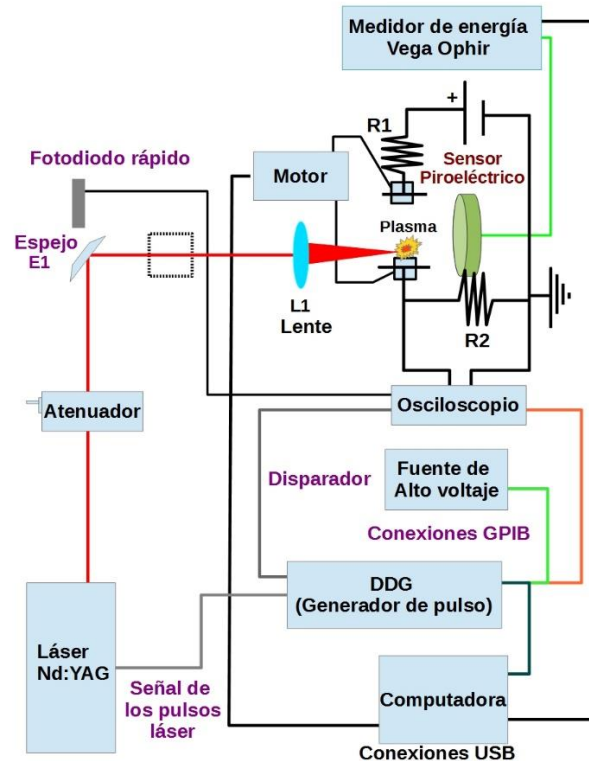


Figura 2.1. Esquema del arreglo experimental para estudiar la interacción de un circuito simple con la generación de un plasma dentro de un capacitor de placas paralelas. El recuadro punteado entre el espejo E1 y la lente L1, es la posición donde se coloca el sensor piroeléctrico para calibrar los pulsos del láser.

2.2 Variación de la distancia entre placas y posición del plasma

El experimento de esta sección constó de dos partes, que involucran uno de los parámetros importantes dentro del circuito: la variación de la posición del plasma con respecto a las placas.

Antes de realizar el experimento se hizo una calibración de los pulsos de láser. Debido a que el láser es controlado por la computadora y solo dispara cuando se le da la orden, se requiere que los pulsos sean lo más estables posibles antes de tomar datos. 150 fue el número mínimo de pulsos que se necesitaba que el láser disparara para que la energía de estos fuera estable.

2.2.1 Variación de la posición del plasma y distancia entre placas fija

En esta parte del experimento se determinó, cuál sería la mejor posición del plasma entre las placas paralelas, tomando en cuenta que la distancia entre las placas es fija y las mesas de desplazamiento se mueven en la misma dirección. La mejor posición hace referencia al lugar donde la amplitud y área del primer pico de la señal eléctrica es máximo.

Descripción general: se posicionó las placas paralelas de tal forma que entre ellas hubo una distancia fija de 35 (0.05) mm. Se generó el plasma con una energía de 80 (1) mJ en medio del par de placas. El plasma hizo un recorrido desde las cercanías de la placa A (a

1.5 (0.05) mm de la placa) hasta las cercanías de la placa B (a 1.5 (0.05) mm de la placa, ver Figura 2.2). Es decir, recorrió desde el milímetro 1.5 hasta el milímetro 33.5, tomando en cuenta que la placa A se encuentra en el milímetro cero. En cada milímetro de recorrido se hizo una recolección de señales, es decir, en el milímetro 1.5 se tomó las señales proporcionadas por la perturbación del plasma. Después, en el milímetro 2.5 se volvió a tomar las señales detectadas por el circuito y así sucesivamente hasta llegar al milímetro 33.5 mm. A unos centímetros de donde se generó el plasma, se colocó un medidor de energía, en la misma dirección del haz del plasma. La tensión aplicada fue de 200 (1) V, después se realizó el mismo experimento pero con, 2800 (5) V.

Descripción detallada: en primera instancia se colocó el cabezal del piroeléctrico en el cuadro punteado (ver Figura 2.1) para poder ajustar el atenuador y tener 80 (1) mJ en un promedio de 10 pulsos. Una vez obtenido esto, se regresó el sensor piroeléctrico atrás de las placas paralelas. Después se disparó el láser generando el plasma y se utilizó como referencia hasta colocar el par de placas paralelas en la posición inicial. La configuración de la posición inicial consiste en colocar la placa A a 1.5 (0.05) mm del centro del plasma. Una vez fija la placa A, se colocó la placa B a 35 (0.05) mm de distancia de la placa A. Teniendo en cuenta que las mesas de desplazamiento tienen un rango de movimiento de 0 a 25 mm, se colocó una mesa en la posición 0 mm y el otro en el punto 25 mm (ver Figura 2.2). Lo anterior quiere decir que la posición final del plasma generado por el láser, cuando las mesas terminaron su recorrido, fue de 26.5 mm, medido desde la placa A. Dado que las placas no tienen la capacidad de recorrer más de 25 mm, se optó por tener una segunda configuración inicial inmediata después de terminar el recorrido anterior.

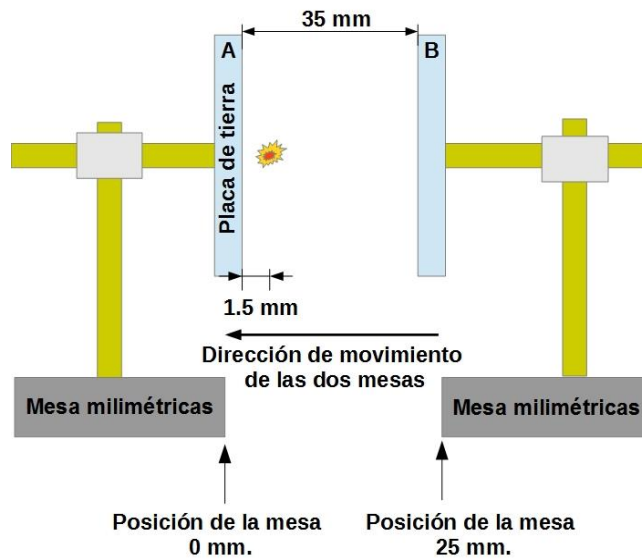


Figura 2.2. Se muestra la posición inicial de las mesas milimétricas y la posición del plasma respecto a las placas. La placa de tierra está referida con la letra A y la placa conectada a la fuente está referida con la letra B.

La segunda posición inicial parte de colocar el plasma a 26.5 (0.05) mm de la placa A. La distancia entre placas se mantiene. La segunda posición inicial parte del final de la primera posición inicial, esto quiere decir que tendremos dos señales pertenecientes a la posición 26.5. La posición de la mesa de desplazamiento conectada a tierra es colocada

en 18 mm y la otra en la posición 8 mm (ver Figura 2.3), de tal manera que se haga el recorrido que falta. El recorrido de la placa A y B es de la siguiente forma de 18 mm a 25 mm y de 8 mm a 0 mm, respectivamente.

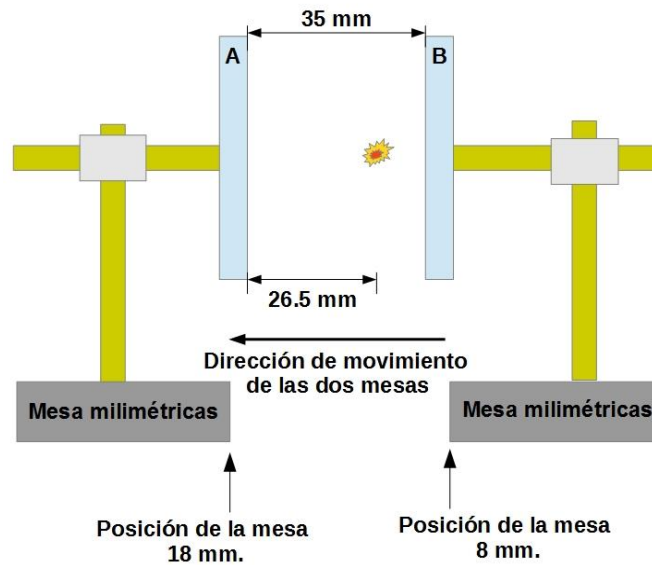


Figura 2.3. Segunda posición inicial. Muestra la posición del plasma con respecto a las placas y la posición de las mesas milimétricas.

Teniendo los preámbulos listos se procedió a correr el programa hecho en Matlab.

La dinámica del programa consistió en lo siguiente: se inicializó el generador de pulsos, el osciloscopio, los motores que mueven las mesas de desplazamiento, el medidor de energía y la fuente de alto voltaje. Seguido, las mesas de desplazamiento se colocaron en la posición inicial.

Antes de continuar, cabe mencionar que el osciloscopio se configuró de tal manera que la señal que se obtiene es el resultado de promediar 70 señales (cada señal se produjo por un pulso de luz láser y dado que se realizaron 70 disparos, se obtuvieron 70 señales), lo cual aplica para todos los experimentos de este trabajo.

Posteriormente, se abrió la carpeta donde se guardaron los archivos generados. A continuación, se entró en un ciclo que depende de la posición de las mesas, es decir, cuando las mesas hayan concluido su recorrido se sale del ciclo y termina el programa.

Entonces las mesas se colocaron en la posición inicial (mesa A, 0 mm y la mesa B, 25 mm), se ajustó la tensión en 200 (1) V. Cabe mencionar que se utilizó una señal cuadrada que cumplió la función de disparador del láser. Esta señal también activó el osciloscopio en el momento que se mandaron señales para el funcionamiento del láser. Continuando, se configuró el *Q-switch* en 230 μ s, se activó el modo encendido/apagado del osciloscopio y se mandó la señal para la ráfaga. El número de ráfagas fue de 450, es decir, el láser disparó 450 pulsos. Los 450 pulsos se dividieron en 5 secciones, donde cada sección tiene un propósito. La primera sección constó de 90 pulsos y en este se activó el osciloscopio en su modo encendido/apagado y se empezó a generar la señal. Este paso es necesario por dos motivos: el primero debido a la velocidad de captura de datos del osciloscopio y el segundo a la estabilidad del láser. La segunda sección constó de 108

pulsos, en los que el osciloscopio activó su modo secuencia que solo toma en cuenta los primeros 70 pulsos. La tercera sección constó de 36 pulsos, que equivale a 3.6 s. En esta parte el osciloscopio analizó la señal que se generó en la segunda sección y se reescaló. En la cuarta sección que también constó de 108 pulsos, se tomó la señal definitiva. En la quinta sección se hizo el decodificado de las dos señales (fotodiodo y señal eléctrica), se guardó en archivos .txt, también se guardaron los pulsos recabados por el medidor de energía. Después se analizó *in-situ* y en tiempo real las señales tanto del osciloscopio, como del medidor de energía. De las señales se analizó el valor cuadrático medio (*RMS* por sus siglas en inglés), valor pico a pico, amplitud del primer pico y área bajo la curva del primer pico. Finalmente se graficaron los descriptores estadísticos anteriormente mencionados con respecto a la posición del plasma para observar la evolución del experimento. En la quinta sección el láser disparó 108 pulsos. La finalidad de esto es para que el láser estuviera en funcionamiento constante y la energía de los pulsos de luz láser fueran lo más estable posibles.

Terminando el primer ciclo se repite de nuevo, pero ahora las mesas cambian de posición. La mesa A se colocó en la posición 1 mm y la otra en la posición 24 mm, se repite de nuevo lo escrito anteriormente, hasta que las mesas estén en la posición 25 mm y 0 mm, mesa A y B, respectivamente.

Después de que las mesas terminan este ciclo y se cierra el programa, se colocan las mesas en la segunda posición y se corre un programa similar, con la variante que la mesa A se moverá de 18 mm a 25 mm y la otra de 8 mm a 0 mm.

Este proceso se repite 5 veces con la finalidad de mejorar la estadística.

Después se repitió el mismo proceso, pero usando una tensión de, 2800 (5) V.

2.2.2 Variación de la posición de la placa conectada a la fuente, posición del plasma fijo

Descripción general: Se colocó la placa A en una posición fija y se produjo el plasma generado por el láser a 7 (0.05) mm de la placa A. La placa B se colocó a 14 (0.05) mm de la placa A. La energía utilizada en los pulsos fue de 80 (1) mJ y la tensión entre las placas fue de, 2800 (5) V. La dinámica del experimento consistió en mover la placa B 20 mm en pasos de 1 mm. En cada paso se recolectan las señales generadas por la perturbación del plasma y los datos recolectados por el medidor de energía.

Descripción detallada: A partir de los resultados arrojados del experimento, se realizó un experimento similar al anterior. La variación consistió en generar el plasma a 7 (0.05) mm de la placa A.

La placa A se quedó fija, la placa B se movió (ver Figura 2.4). La placa B se movió de la posición 25 mm a la posición 5 mm y la tensión aplicada a las placas fue, 2800 (5) V. La energía utilizada en los pulsos láser fue de 80 (1) mJ.

La única variación es la posición del plasma respecto a las placas y el movimiento de la placa B. El funcionamiento del programa es básicamente el mismo, los parámetros que se cambiaron fueron: la posición de la placa A, el rango de desplazamiento de la placa B y la tensión aplicada. De igual manera se repitió 5 veces este proceso.

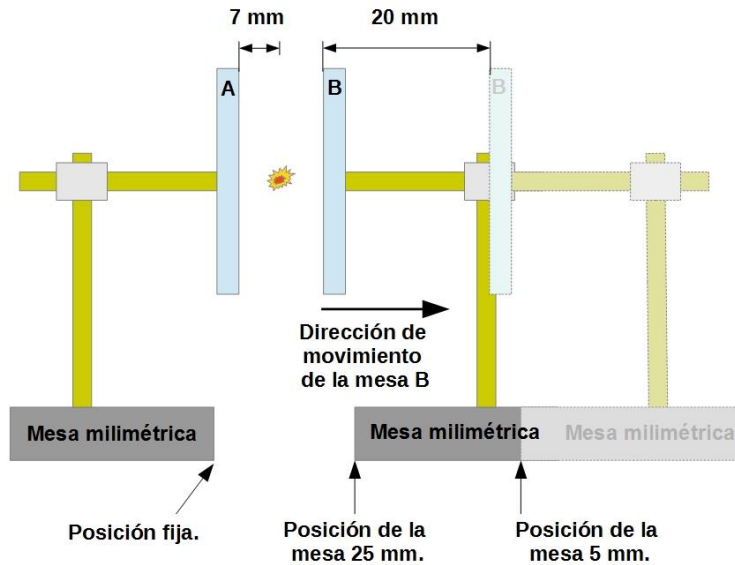


Figura 2.4. Posición inicial. Se muestra la posición del plasma respecto a las placas y la dirección del movimiento de la placa conectada a la fuente. En color más tenue se muestra la posición final de la placa B, este haciendo un recorrido de 20 mm.

2.3 Variación de la distancia entre placas

Este experimento tuvo la finalidad de realizar una comparación con lo reportado en el trabajo de Bredice et al. ³.

Descripción general: las placas A y B fueron colocados a una distancia entre ellas de 8 (0.05) mm. El plasma fue generado exactamente en medio de las dos placas, es decir, que tanto de la placa A, como de la placa B hay una distancia de 4 mm al plasma. El plasma quedó fijo. La energía de los pulsos del láser fue de 80 (1) mJ y la tensión entre las placas fue de, 2800 (5) V. La dinámica del experimento consistió en alejar las placas del plasma en pasos de 1 mm en 1 mm, de tal manera que cada placa hizo un recorrido de 23 mm.

Descripción detallada: los dos experimentos anteriormente abordados y este, tienen cierta similitud. Los parámetros variados son: la distancia y la tensión aplicada al par de placas. Esto hizo que el programa para controlar el experimento fuera solo uno. Entonces, basto con variar algunos parámetros dentro del código dependiendo del experimento. En el experimento actual, se varió los parámetros correspondientes a las mesas de desplazamiento.

El plasma fue colocado en medio de las dos placas (plasma fijo), la energía utilizada en los pulsos del láser de igual manera fue de 80 (1) mJ. La distancia de las placas fue de 8 (0.05) mm y la posición de las placas es la siguiente: la placa A estuvo en la posición 0 mm y se movió de 0 mm a 23 mm; la placa conectada B estuvo en la posición 25 mm y se movió de 25 mm a 2 mm (ver Figura 2.5). La tensión suministrada a las placas fue de, 2800 (5) V. El experimento se repitió 5 veces de igual manera.

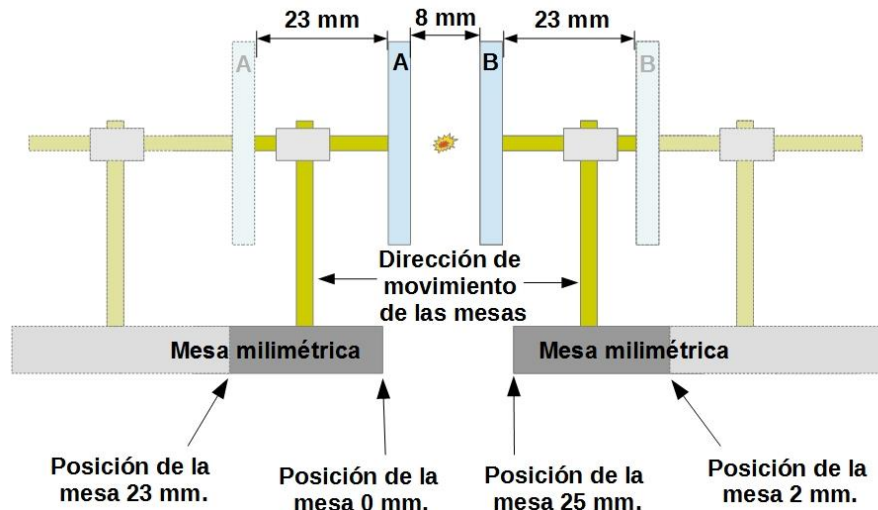


Figura 2.5. Se muestra la posición inicial. Se observa la posición del plasma, el movimiento de las placas y en color más tenue se muestra la posición final de las placas.

2.4 Variación de la tensión entre placas y variación de la energía de pulsos láser

De los resultados obtenidos en el experimento de la variación de la posición del plasma y distancia entre placas fija, se observó que la mejor posición para colocar el plasma es a 7 (0.05) mm de la placa A. Se disparó un par de pulsos para acomodar la placa A en la posición adecuada. Después se colocó la placa B a 35 (0.05) mm de la A (ver Figura 2.6). En esta ocasión las placas estarán fijas.

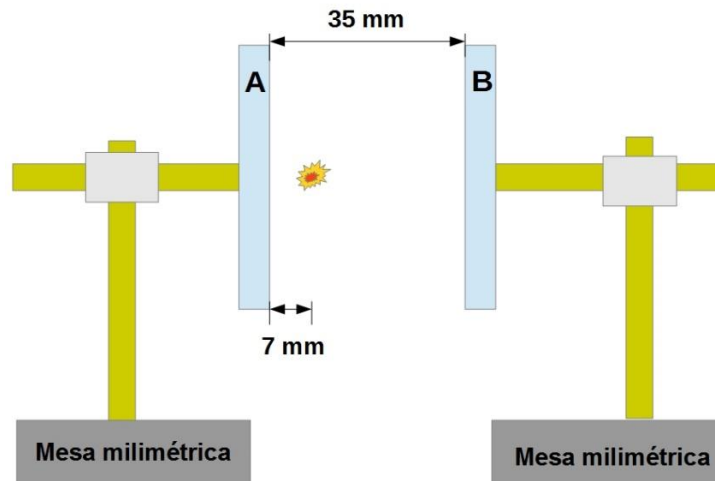


Figura 2.6. Se muestra la posición fija de las placas. La posición óptima entre el plasma y la placa de tierra es 7 (0.05) mm.

En esta parte del experimento se cambiaron dos parámetros importantes del estudio: la energía de los pulsos generados por el láser y la tensión aplicada a las placas paralelas en donde se encuentra inmerso el plasma.

La energía de los pulsos fue cambiada de 80 (1) mJ hasta 300 (1) mJ en pasos de 20 mJ. Por otro lado, la tensión aplicada varió primero de 35 (1) V a 185 (1) V con saltos de 30 V; después la variación fue de 200 (1) V a, 4000 (5) V con saltos de 200 V.

La dinámica es parecida a la de los anteriores experimentos. Se colocó el cabezal del piroeléctrico en la posición del cuadro punteado (ver Figura 2.1) y se envían varios pulsos para ajustar la energía de 10 pulsos de promedio con el atenuador, por ejemplo 80 (1) mJ. Después se colocó el medidor detrás de las placas paralelas y se procedió a correr el programa de Matlab.

Antes de continuar cabe aclarar que se ocuparon dos programas en donde solo se cambió un par de parámetros correspondientes a los intervalos de la tensión utilizada.

En la primera parte del programa se inicializó y ajustaron los parámetros para los siguientes dispositivos: medidor de energía, osciloscopio, fuente de alto voltaje y generador de pulsos. Después el programa entró en el ciclo. Primero se usó el programa que va del intervalo de 35 V a 185 V. Después se dispararon los 450 pulsos para analizar la señal generada por los pulsos láser. Inmediatamente después se guardaron los datos obtenidos por los dos canales (fotodiodo y señal eléctrica) y la energía transmitida. *Ipsa facto* se analizó las dos señales guardadas. Se analizó el valor pico a pico, amplitud, el valor cuadrático medio (*RMS* por sus siglas en inglés) y área bajo la curva. Después se graficaron los resultados para observar la tendencia. De igual manera que los experimentos anteriores, el láser no se detuvo para mantener la energía de los pulsos de luz láser lo más estable posible. Al terminar el intervalo de 35 V a 185 V, se corrió el programa donde se tienen las tensiones de 200 V a 4000 V. El procedimiento para este intervalo es igual al abordado que en el código del programa de 35 V a 185 V.

Se repite cuatro veces más para generar una buena estadística, es decir, para cada energía el experimento se realiza cinco veces.

El proceso anterior se repite hasta terminar el intervalo de energía de 80 mJ a 300 mJ.

2.5 Tratamiento de las señales

Para que el láser pueda funcionar de manera óptima se requiere configurar dos parámetros: la tensión de descarga de la lámpara y el tiempo de abertura del *Q-switch*. Los parámetros para obtener la máxima energía y menor duración de los pulsos del láser son: tensión de la lámpara 1.47 kV y 230 μ s de tiempo de activación del *Q-switch*. Los parámetros antes mencionados solo son válidos si el láser se utiliza en su modo manual (interno). Sin embargo, en nuestro caso se utilizó en modo automático (externo). El parámetro que es afectado por el cambio de modo es el *delay* del *Q-switch*. El retraso que sufre el *Q-switch* es de 360 ns, valor obtenido al disparar el láser en modo automático, utilizando el fotodiodo y el osciloscopio para observar el pulso de luz. Dentro del programa se fue variando el parámetro del *Q-switch* hasta que el inicio del pulso de luz coincidiera con el inicio de la señal enviada por el generador de pulsos utilizado como disparador.

Para poder definir el cero del inicio del experimento no basta con que el pulso de luz coincida con la señal enviada como disparador. Para definir el cero en la parte temporal suponemos que el pulso óptico obedece una distribución gaussiana. La desviación estándar σ se define como la anchura a media altura (*FWHM* por sus siglas en inglés)

$FWHM = 2\sqrt{2\ln 2} \sigma$, por lo tanto, $\sigma = 2.59$ ns. Entonces, considerando 3.8 desviaciones estándar alrededor de la media, corresponde a el 99.99 % del pulso óptico, es decir, tenemos el 0.01 % de probabilidad de que algunos fotones lleguen antes [13,53]. Entonces, se define el cero de la coordenada temporal ($FWHM$ de 6.1 ns) a 9.85 ns antes del máximo pulso óptico (ver Figura 2.7 a)).

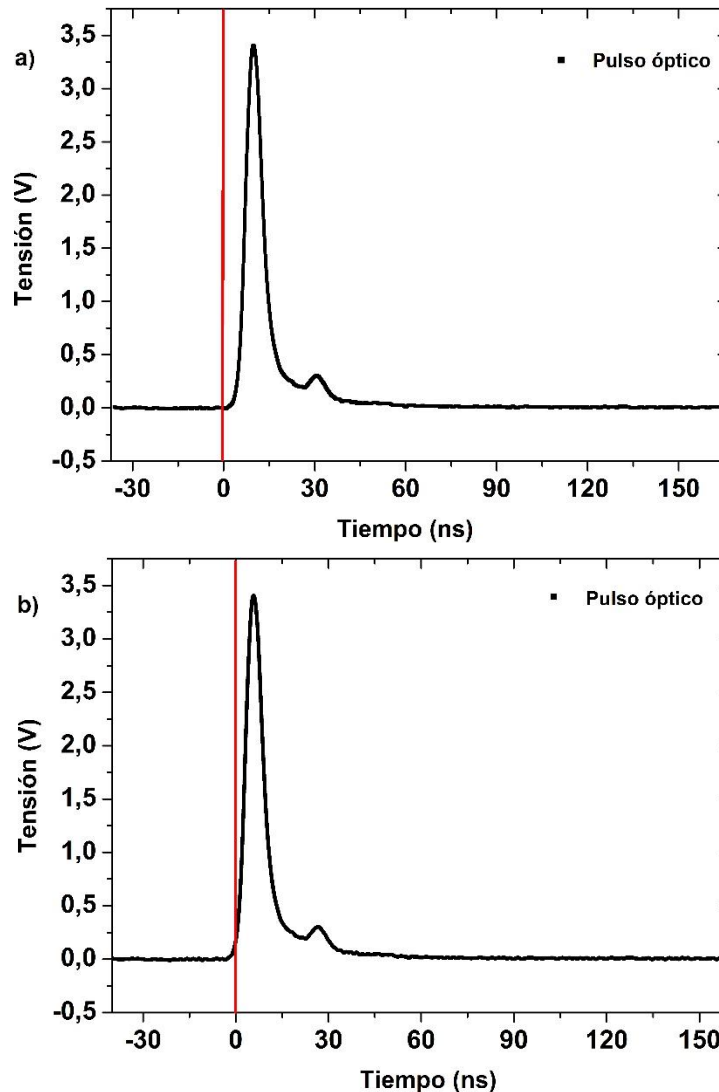


Figura 2.7. Señal óptica de un pulso láser con longitud de onda de 1064 nm. a) Pulso óptico con inicio a 9.85 ns del máximo. b) Pulso óptico con inicio a 5.45 ns del máximo.

Cuando el pulso óptico coincide con la señal enviada por el generador de pulsos, el cero de la coordenada temporal está en 5.46 ns antes del máximo del pulso óptico. El valor anterior se conoce de las señales recabadas por el osciloscopio. Entonces, con ese cero se tienen 2.11 desviaciones estándar alrededor de la media, lo que representa el 96.52 % del pulso óptico, es decir, se tiene 3.48 % de probabilidad de que algunos fotones lleguen antes (ver Figura 2.7 b)). A pesar de que la probabilidad en la Figura 2.7 b) es baja, se optó por colocar el inicio del pulso óptico cuando la probabilidad es 0.01 %.

Las señales obtenidas y analizadas en este trabajo son de dos tipos: la primera son de la forma de una distribución gaussiana (ver Figura 2.7), estas señales monitorearon los pulsos de luz láser y funcionaron como una referencia para definir el inicio del experimento; la segunda tiene un comportamiento oscilatorio (ver Figura 2.8) y son el objeto de estudio de este trabajo.

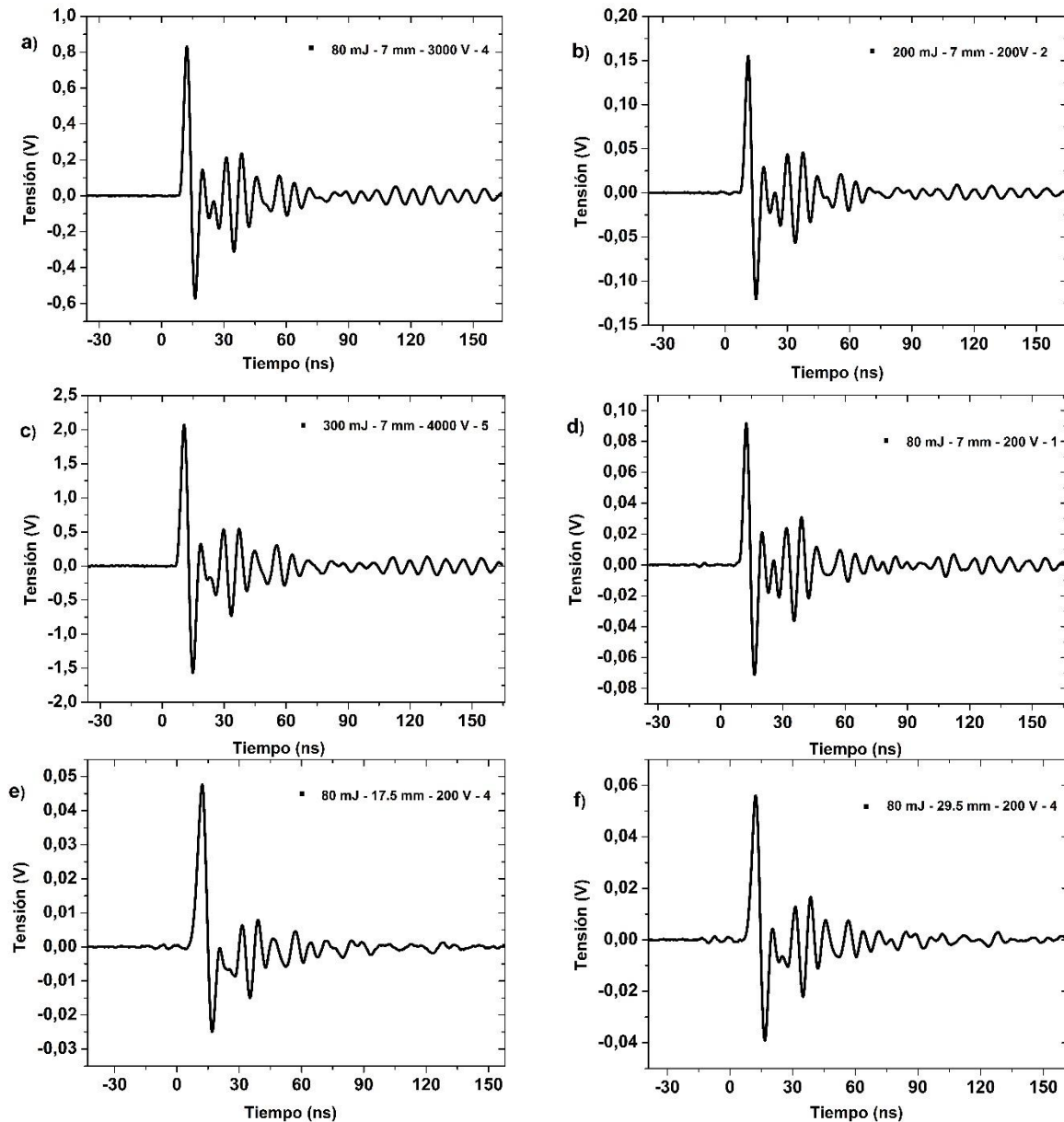


Figura 2.8. Señales eléctricas obtenidas de dos experimentos distintos. Las señales a), b) y c) pertenecen al experimento del apartado 2.4 y las señales d), e) y f) pertenecen a la sección 2.2.1. Nomenclatura de las etiquetas de las señales, XX mJ – XX mm – XXXX V – X. XX mJ, es referido a la energía de los pulsos de luz láser; XX mm, es referido a la distancia del plasma a la placa A; XXXX V, es referido a la tensión aplicada al capacitor; X, es referido al número de repetición del experimento realizado.

Las figuras a), b) y c) representan los experimentos realizados en el apartado 2.4. Las figuras d), e) y f) corresponden a los experimentos descritos en la sección 2.2.1.

Se observó que las señales independientemente de los parámetros utilizados parecen mantener el mismo comportamiento oscilatorio. A primera vista, el único cambio entre las señales es la amplitud de los picos.

Cabe señalar que el comportamiento oscilatorio de las señales es debido a la construcción del circuito con el que se analizó el plasma ³.

En los apartados siguientes se analizará las señales generadas por cada uno de los experimentos. La manera de abordar las señales fue de la siguiente forma:

- Una vez captada la señal por el osciloscopio, se determinaron los siguientes descriptores estadísticos y características de este: área del primer pico ($A(a,b)$), amplitud del primer pico (y_{max}), valor pico a pico (y_{pp}) y valor cuadrático medio (y_{RMS}) ⁵⁴.
- Cada corrida del experimento cuenta con un archivo donde se colocaron los descriptores estadísticos de cada señal. Se realizó un promedio (\bar{y}) con los datos correspondientes a cada señal, para cada una de las cinco repeticiones.
- Ejemplo: la señal $80\text{ mJ} - 7\text{ mm} - 3000\text{ V} - 4$ (figura 2.8 a)) se obtuvo del experimento donde solo se varió la tensión. Se obtuvieron 5 señales similares, se tomó el valor del área del primer pico de cada señal y después se hizo el promedio de los 5 valores. Este mismo procedimiento se aplicó para los demás descriptores.
- Después se aplicó la desviación estándar y el error para pequeños datos ⁵³.

Descriptores estadísticos:

$$\text{Valor pico a pico} \quad y_{pp} = y_{max} - y_{min}, \quad (4)$$

$$\text{Promedio (media)} \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (5)$$

$$\text{Valor cuadrático medio} \quad y_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i^2}, \quad (6)$$

$$\text{Desviación estándar para un conjunto pequeño de datos} \quad \Delta y = \frac{y_{max} - y_{min}}{2}, \quad (7)$$

$$\text{Error} \quad \Delta y_{avg} = \frac{y_{max} - y_{min}}{2\sqrt{N}}, \quad (8)$$

$$\text{Área del primer pico} \quad A(a, b) = \int_a^b f(y) dy, \quad (9)$$

En la sección 3.1 se hace uso de todos los descriptores estadísticos para contar con una referencia y a partir de ello graficar con base en este. En los experimentos de este apartado se cambia el parámetro de la distancia, mientras los demás parámetros permanecen fijos. Se buscó un valor de referencia de la distancia que hay entre las placas y el punto de generación del plasma.

En la sección 3.2 se realizó una comparación con lo reportado en el trabajo de Bredice et al. ³. El parámetro involucrado es la distancia de separación de las placas (los demás parámetros permanecen estáticos).

En la sección 3.3 y 3.4 se utilizó el valor de referencia de la distancia (obtenido en la sección 3.1) para fijar la posición de generación del plasma. Se varió la tensión y la energía de los pulsos de luz láser.

2.6 Análisis de la energía transmitida

En los experimentos descritos, se optó por colocar después del punto de formación del plasma un sensor piroeléctrico (ver Figura 2.1). Los experimentos realizados constaron cada uno de 450 pulsos por ciclo. El sensor piroeléctrico en cada ciclo tomó la lectura de cada uno de los pulsos y los guardó en un archivo. Posteriormente se calculó el promedio de la energía transmitida y el error (ecuaciones (5) y (8), respectivamente). Cabe mencionar que los pulsos utilizados parten desde el pulso 234 al 304, que son los pulsos que generan la señal eléctrica.

A partir del promedio de la energía transmitida se calculó la transmitancia y se graficó con respecto al parámetro de interés (tensión aplicada a las placas, energía de los pulsos del láser, posición del plasma y distancia entre placas). La transmitancia viene dada por:

$$T = \frac{E_t}{E_i}, \quad (10)$$

Donde E_t es el promedio de la energía transmitida y E_i es el promedio de la energía incidente. Cabe mencionar que la energía incidente se monitorea al inicio y a final del experimento. Para el promedio de la energía incidente se tomaron 70 pulsos.

2.7 Resumen de experimentos realizados

Los parámetros variados a lo largo de este trabajo son presentados en la Tabla 2-1. En las columnas se colocó las variables: tensión aplicada a las placas, energía de los pulsos del láser, distancia entre placas y posición del plasma con respecto a la placa A. En los renglones de la primera columna se colocó el número de experimento realizado.

	Tensión aplicada a las placas	Energía de los pulsos del láser	Distancia entre placas	Posición del plasma con respecto a la placa A
Experimento 1 (sección 2.2.1)	200 (1) V. 2800 (5) V.	80 (1) mJ.	Fija, 35 (0.05) mm.	Varió de 1.5 (0.05) mm a 33.5 (0.05) mm.
Experimento 2 (sección 2.2.2)	2800 (5) V.	80 (1) mJ.	Variable, 14 (0.05) mm a 34 (0.05) mm. Placa A fija. Placa B móvil.	Fijo. 7 (0.05) mm.
Experimento 3 (sección 2.3)	2800 (5) V.	80 (1) mJ.	Variable, 8 (0.05) mm a 54 (0.05) mm. Placa A móvil. Placa B móvil.	En todo momento se encontró en medio de las dos placas.
Experimento 4 (sección 2.4)	Varió de 35 (1) V a 185 (1) V. Después de 200 (1) V a 4000 (5) V.	80 (1) mJ a 300 (1) mJ.	Fija, 35 (0.05) mm.	Fijo. 7 (0.05) mm.

Tabla 2-1. Se muestra los parámetros variados en los cuatro distintos experimentos realizados.

3. Resultados y discusión

Anteriormente se mencionó que se cuenta con dos tipos de señales: la señal proveniente de la interacción del plasma y el campo eléctrico generado por el capacitor, señal eléctrica; y la señal proveniente del monitoreo de los pulsos de luz láser, señal óptica. Las señales que se abordaron en este capítulo fueron, las señales eléctricas (Figura 3.1 color rojo). El comportamiento oscilatorio es una de las características que presentan las señales obtenidas en este trabajo, por lo que es difícil tener reproducibilidad. Por otro lado, es notorio que el primer pico de la señal es el de mayor amplitud. En el trabajo de Bredice ³ se encuentra una relación donde el pico máximo es directamente proporcional a la energía de rompimiento y a la tensión entre las placas, e inversamente proporcional al cubo de la distancia (ver ecuación (3)).

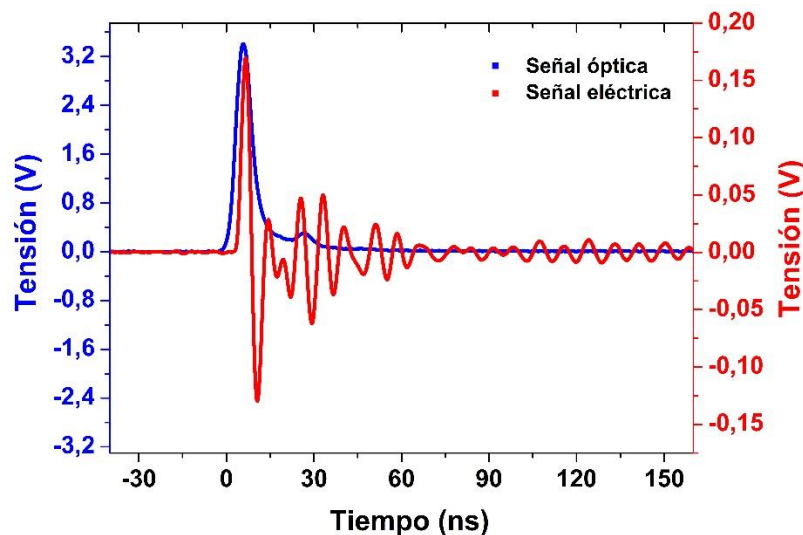


Figura 3.1. Pulso óptico con una energía de 300 mJ y longitud de onda de 1064 nm (curva negra) y señal eléctrica (curva roja). Distancia entre placas: 35 mm y tensión entre placas: 200 V.

El campo eléctrico generado por el capacitor de placas paralelas se mantiene constante, es decir, la tensión no cambia. La interacción del campo con el aire produce la

polarización de las moléculas en el interior del capacitor. El pulso de luz láser es enfocado, iniciando la formación del plasma mediante la recombinación de iones y electrones por efecto de ionización de cascada. Entonces, en los primeros nanosegundos del proceso, el plasma es creado, M. Young et al. ² distinguen regiones del plasma: un núcleo extremadamente intenso que está alineado a lo largo del eje de la lente, seguido una región de menor intensidad que generalmente se divide en lóbulos. Por último, una especie de nube sin estructura.

Entonces, en la formación del plasma los iones son polarizados por el campo eléctrico, generando una carga inducida. El primer pico de la señal es resultado de este proceso. La placa A queda cargada positivamente, lo que genera que la placa tenga que “pedir” electrones de tierra para anular las cargas positivas (en la Figura 3.2 se esquematiza). Este “pedido” de electrones que realiza la placa A es justo en el momento de la formación del plasma.

Ahora, si una parte de los iones se recombina con electrones sueltos, entonces la placa no va a necesitar tantos electrones y los tiene que devolver generando el pico negativo.

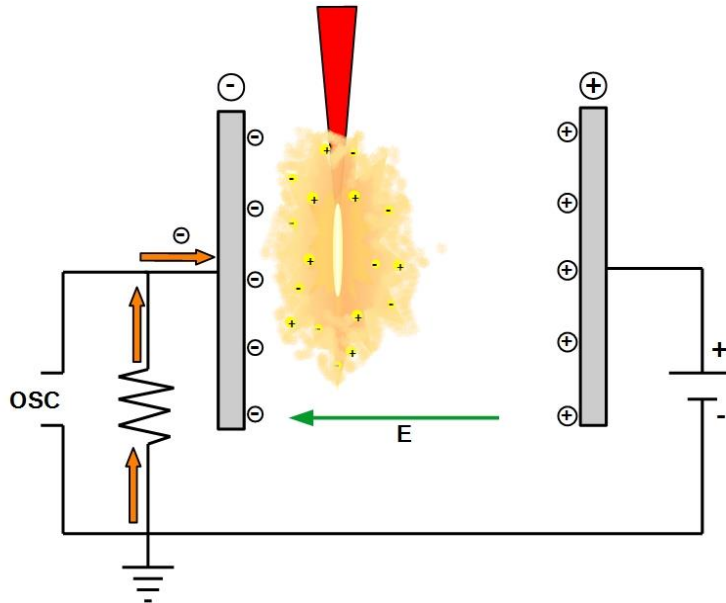


Figura 3.2. Esquema de la formación del plasma.

3.1 Variación de la distancia entre placa y posición del plasma

En los dos experimentos siguientes las variables fueron la posición del plasma y la distancia entre placas. El objetivo del primer experimento fue encontrar la posición óptima entre las placas paralelas en la cual el primer pico de la señal eléctrica es máximo.

En el segundo experimento, una vez se fijó el parámetro de posición óptima del plasma, se observó el comportamiento de cómo decae la amplitud máxima de la señal eléctrica mientras se aleja una de las placas (placa B).

3.1.1 Variación de la posición del plasma y distancia entre placas fijas

Para encontrar la posición óptima entre la distancia del plasma a la placa de tierra, en la que el primer pico de la señal eléctrica fuera máximo, se empleó una energía de los pulsos de 80 (1) mJ a una frecuencia de 10 Hz. Se utilizaron dos tensiones entre las placas, el primero de 200 (1) V y el segundo de 2800 (5) V.

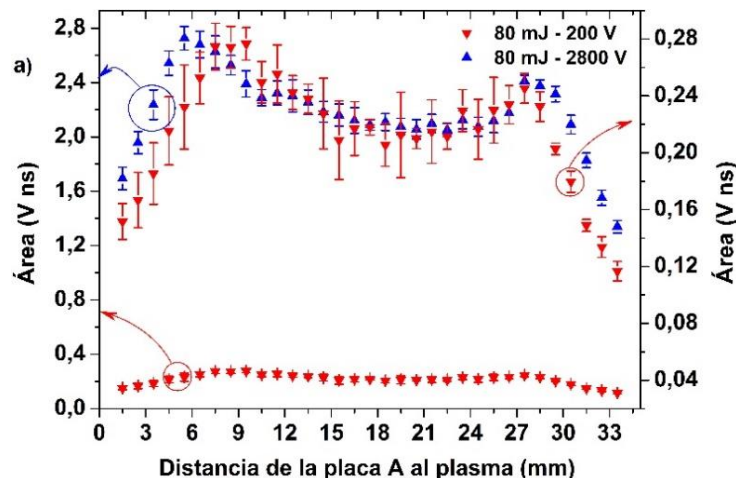
Los resultados se presentan en la Figura 3.3. En rojo muestran los datos generados por la diferencia de potencial de 200 V y en azul la de 2800 V. En todos los gráficos de la Figura 3.3 se observan tres conjuntos de datos. Se observa dos conjuntos de datos superpuestos en la parte superior del gráfico (datos color rojo y azul) y que corresponden a las tensiones de 200 V y 2800 V, respectivamente. Los datos se representan en una escala adecuada para observar similitudes. Por otro lado, observamos un conjunto de datos ubicado en la parte inferior del gráfico (datos color rojo) perteneciente a la tensión de 200 V. Estos datos se graficaron usando la misma escala que la tensión de 2800 V.

Se observa que el conjunto de datos de 2800 V (color azul) comparado con el de 200 V (color rojo), los valores están un orden

Una característica que se observa a primera vista es que el conjunto de datos para 200 V comparado con el de 2800 V están un orden de magnitud abajo, para cualquiera de los cuatro gráficos (Figura 3.3). Se observa que para los cuatro análisis estadísticos los datos simulan la forma de una M, teniendo un comportamiento similar todos ellos (ver Figura 3.3). Se optó por tomar de referencia el análisis del área de la señal para los siguientes experimentos. Esto debido al tamaño del error, comparado con los producidos en los análisis de *RMS*, amplitud y pico a pico.

Del análisis del área (Figura 3.3 a)), se observa dos máximos en las curvas de ambos experimentos, tanto en 80 mJ – 200 V y 80 mJ – 2800 V. El primer máximo para 80 mJ – 200 V se halla en 7.5 mm del origen, el segundo pico se haya a 27.5 mm. Para 80 mJ – 2800 V el primer pico se encuentra a 5.5 mm del origen y el segundo pico se encuentra a 27.5 mm. Observamos que entre el primer máximo de 200 V y el de 2800 hay una diferencia de 2 mm.

Se corrobora que la señal eléctrica tiene un dependencia con la tensión aplicada a las placas, así como lo mencionan Bredice et al. ³.



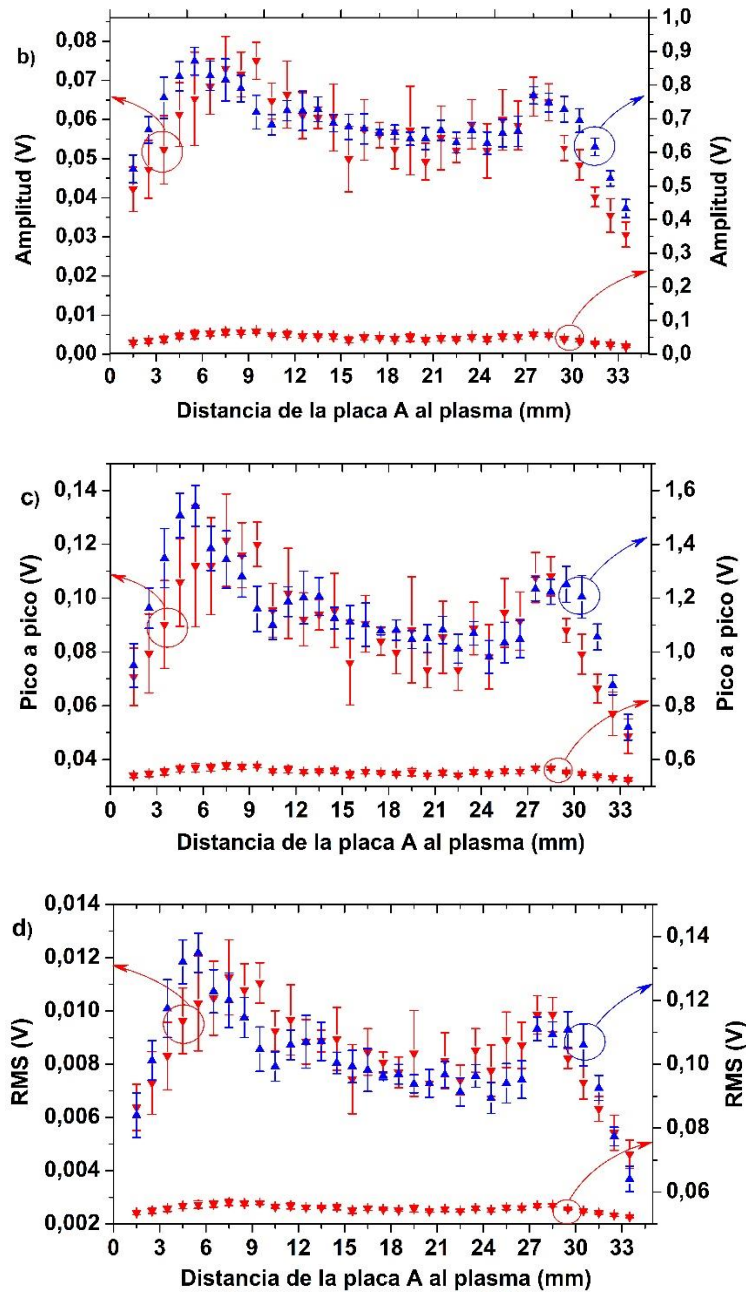


Figura 3.3. Parámetros estadísticos de la señal eléctrica medida graficados contra la distancia de la placa de tierra al plasma: a) Área, b) Amplitud, c) Pico a pico y d) *RMS*. En cada gráfico se muestran tres conjuntos de datos, dos correspondientes a las etiquetas de 80 mJ – 200 V (color rojo) y el otro de 80 mJ – 2800 V (color azul). Uno de los conjuntos de datos de 80 mJ – 200 V y el conjunto de datos de 80 mJ – 2800 V se graficaron con la misma escala como se muestra referido con flechas de su color correspondiente. Por otro lado, el otro conjunto de datos de 80 mJ – 200 V se graficó con otra escala para empatar con el conjunto de datos de 80 mJ – 2800 V.

De lo anterior se optó por fijar la posición del plasma con respecto a la placa A, para los siguientes experimentos. La distancia fijada donde el área del primer pico de la señal eléctrica es máxima fue de 7 (0.05) mm. Esta distancia es la que llamamos mejor posición del plasma.

Al mismo tiempo que se adquirían las señales eléctricas, se obtuvieron las mediciones de la energía transmitida, captadas por un piroeléctrico colocado 85 (0.05) mm delante de donde se forma el plasma. Esto se describe de manera detallada en la sección 2.2.1.

Utilizando la energía transmitida, la energía de incidencia y la Ecu. (9) se obtuvo la transmitancia. La Figura 3.4 muestra el comportamiento de la transmitancia al cambiar la posición del plasma dentro de las placas paralelas a una distancia fija de 35 (0.05) mm entre ellas. Resalta que la transmitancia se mantiene constante en un rango de 29 % a 32 %. Esto quiere decir que el campo eléctrico generado por las placas paralelas a 200 V y 2800 V no tiene repercusión en este fenómeno.

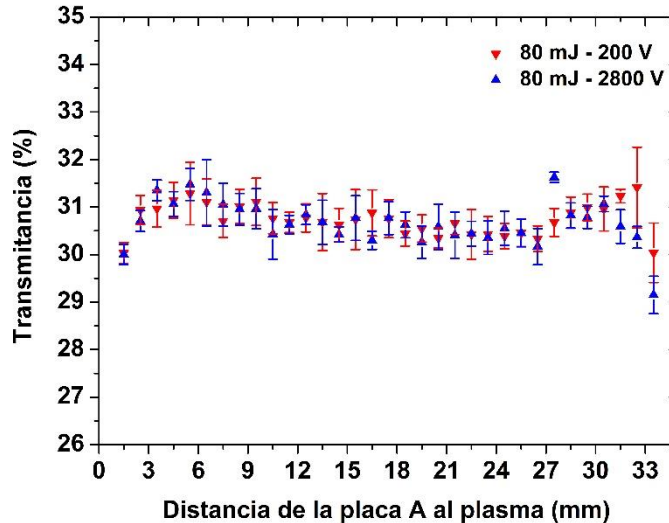


Figura 3.4. Dependencia de la transmitancia con la distancia de la placa de tierra al plasma, para una energía de 80 mJ y variación de dos diferencias de potencial: 200 V y 2800 V.

En los gráficos del área vs distancia de la placa A al plasma (Figura 3.3 a)) y de la transmitancia vs distancia de la placa A al plasma (Figura 3.4) se observó que cerca de los extremos (0 mm y 35 mm) los valores de las curvas tienen un cambio. ¿Qué produce este cambio? Anteriormente se mencionó que el plasma consta de regiones: un núcleo, una región que se divide en lóbulos y finalmente una especie de nube sin estructura ².

Por otro lado, en distintos trabajos se han reportado la aparición de un dipolo eléctrico transitorio inducido como el resultado de la interacción de un pulso láser enfocado en aire [13,27-29,55,56]. Las investigaciones anteriores han dado diferentes interpretaciones a la explicación del mecanismo de la presencia del momento dipolar eléctrico. No se llega a comprender completamente. Fuentes et al. sugieren que una interpretación adecuada debe darse incluyendo el campo magnético espontáneo inducido por el plasma inducido por láser ¹⁵.

El dipolo eléctrico se encuentra alineado con el eje del haz, opuesto a la dirección del vector de Poynting [(- +) <-- láser]. Las cargas negativas están en la parte posterior, mientras que las cargas positivas en la parte frontal del plasma.

Entonces, al colocar el dipolo eléctrico en un campo eléctrico externo, éste se comporta como un conductor flotante [17,35].

Fuentes et al. ¹⁵ midieron la longitud del LIP utilizando una sonda de cable coaxial. Los parámetros utilizados para la generación del plasma fueron: energía de los pulsos de luz

láser, 85 mJ; longitud de onda, 1064 nm; duración del pulso, 10 ns; distancia focal, 100 mm. La longitud reportada del LIP fue de 4 mm.

Otro hecho a considerar es la existencia de una nube, compuesta probablemente de átomos excitados, iones y electrones ², que rodea al plasma. Dicha nube es una capa de gas frío moderadamente ionizado. La nube de ionización se extiende más allá de la onda de choque. Esto es debido a que el plasma producido emite en la región ultravioleta. Entonces, dicha radiación ioniza el aire de la periferia produciendo la nube. Esta nube tiene un diámetro de 2–3 mm [28,36].

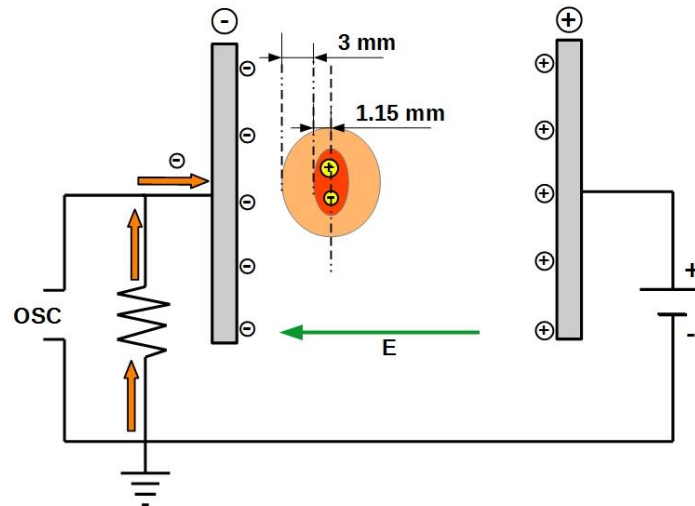


Figura 3.5. Esquema del plasma inmerso en el campo eléctrico generado por el par de placas paralelas. Se observa el grosor del plasma y la nube de ionización.

Por otro lado, teniendo en cuenta la estructura completa del plasma, el diámetro fue de aproximadamente 4 – 4.5 mm. Esto aproximando el plasma a un elipsoide ³⁶. El LIP tiene un volumen aun cuando no sea del todo visible (ver Figura 3.6). Entonces, se tenía que el centro del plasma estaba colocado a una distancia de 1.5 mm de la placa A. Lo anterior implica que el núcleo del plasma no toca la placa, pero la nube de ionización alcanza a traslaparse. Esto supone que los iones y electrones de la nube alcanzaron a la placa estadísticamente y como resultado la señal de detección se redujo. Después, alejando las placas del LIP se encontró la distancia óptima a la cual la amplitud del primer pico y el área de la señal eléctrica fueron máximos.

Por un lado, cuando la tensión entre las placas fue de 2800 V el punto óptimo se encontró a 5.5 mm, pero para 200 V el punto se ubicó a 7.5 mm (Figura 3.3 a)). ¿Qué es lo que causa esta variación en los puntos óptimos? Anteriormente se dijo que la nube de ionización funciona como un conductor flotante, por lo que, al aplicarle un campo eléctrico externo, los electrones exteriores de la nube son atraídos hacia el ánodo y los iones a la placa de tierra. Se observa que a medida que aumenta el campo eléctrico externo producido por el capacitor de placas paralelas, la amplitud del primer pico de la señal eléctrica va creciendo [15,18]. Para el caso de la tensión de 2800 V, sí el plasma está más cercano a la placa A llegan mayores cantidades de iones y los electrones son atraídos con mayor fuerza al sentido contrario. Ahora, sí la tensión es de 200 V, el campo eléctrico que afecta a la nube de ionización es menor, por lo que los iones que llegan a la placa A

son menos. De igual forma que los electrones que llegan al ánodo. Esto genera el ligero desplazamiento entre los dos puntos óptimos con las diferentes tensiones.

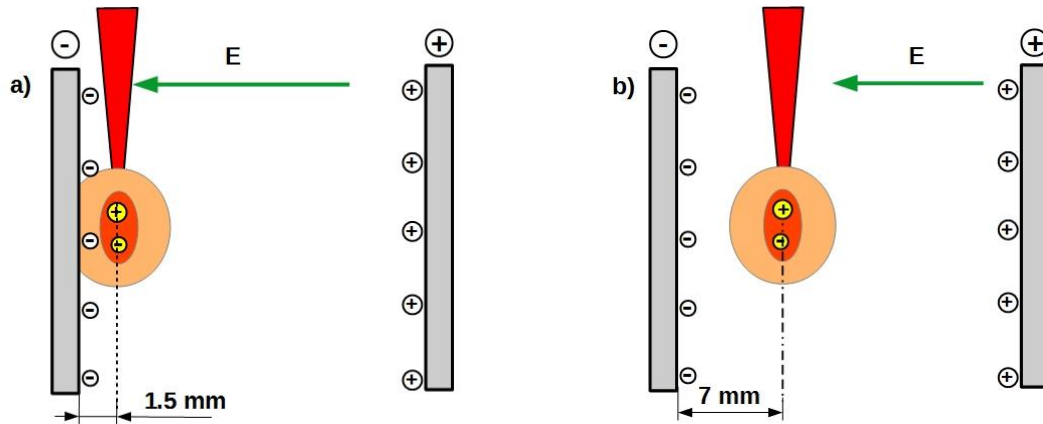


Figura 3.6. Esquema del plasma interactuando con el campo eléctrico. a) plasma a 1.5 mm de la placa de tierra. En b) observamos cuando el plasma está alejado a 7 mm de la placa de tierra.

3.1.2 Variación de la posición de la placa conectada a la fuente, posición del plasma fijo

En este experimento los parámetros fijos fueron: energía del pulso láser 80 (1) mJ, tensión entre las placas 2800 (5) V, distancia del plasma a la placa de tierra 7 (0.05) mm. En la sección 2.2.2 se describió con más detalle las especificaciones del experimento. En la Figura 3.7 se observa el comportamiento que tuvo la amplitud del primer pico y el área de la señal eléctrica cuando se varió la distancia entre placas (la placa A quedó fija).

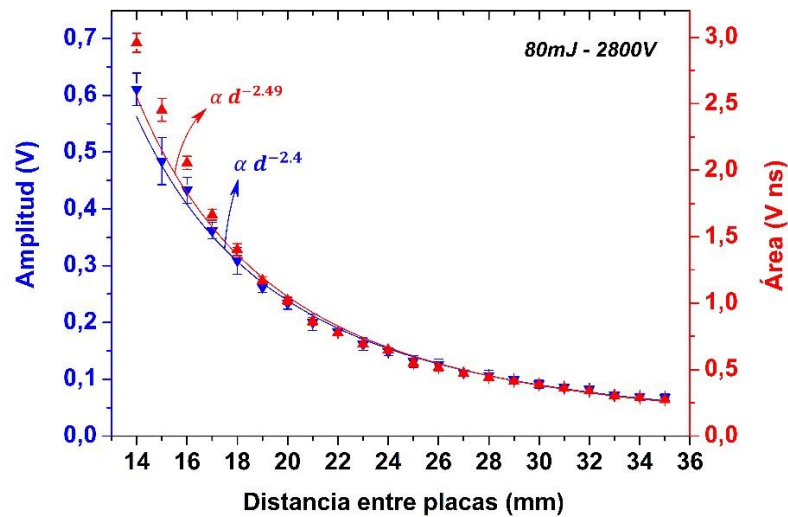


Figura 3.7. Dependencia de la amplitud y el área de la señal eléctrica con respecto a la distancia entre las placas del capacitor, para una energía incidente de 80 mJ y tensión entre placas de 2800 V.

Se observa que el área y la amplitud tienen un comportamiento similar al de la función potencia, $f(x) = x^{-n}$. El área cae como función de la distancia como: $d^{-2.49}$. Mientras que la amplitud la varía con la distancia como: $d^{-2.4}$.

En la Figura 3.8, se observa el comportamiento que tiene la transmitancia con respecto a la variación de la distancia de las placas. Al variar la distancia entre las placas se cambia el campo eléctrico que interacciona con el LIP, sin embargo, se observó que el campo eléctrico no afecta a la transmitancia. Siendo así, se obtuvo un comportamiento constante en un rango de 29.5 % a 31.5 %.

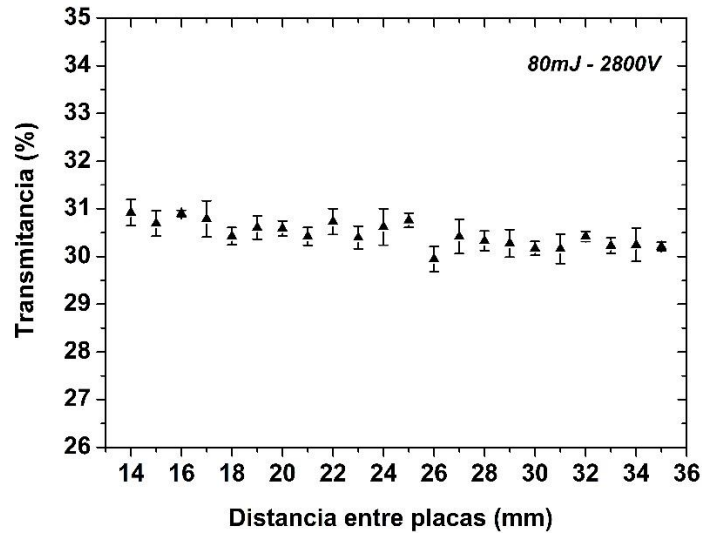


Figura 3.8. Dependencia de la transmitancia con la separación entre las placas del capacitor, para una energía incidente de 80 mJ y una tensión entre placas de 2800 V.

3.2 Variación de la distancia entre placas

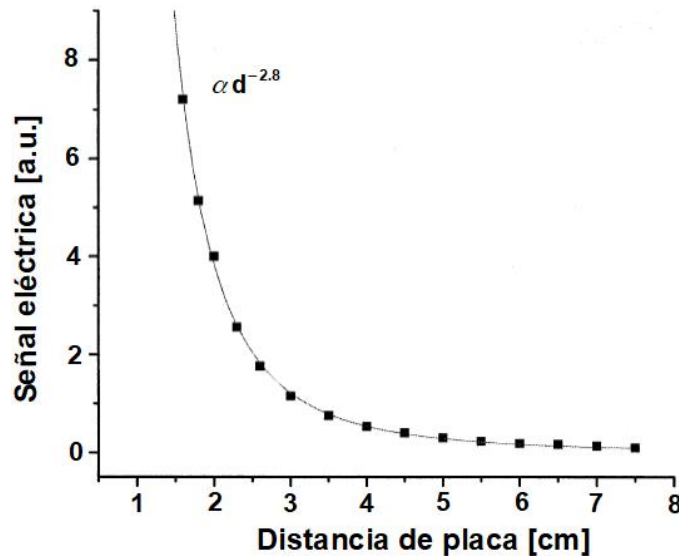


Figura 3.9. Dependencia de la señal eléctrica con la distancia de separación para una tensión aplicada de 2 kV y una energía incidente de 150 mJ ³.

Un resultado importante de la investigación realizada por O. Bredice et al. ³, residió en establecer una relación experimental entre la señal eléctrica y la separación de las placas (ver Figura 3.9).

En la sección 2.3 el objetivo fue corroborar la relación experimental hallada. La relación es la siguiente:

$$h = k_c E_b \frac{V}{d^{2.8}},$$

donde h es la máxima caída de potencial a través de la resistencia (pico de la señal), k_c la constante que depende de los parámetros del circuito, V la tensión aplicada al capacitor, d la distancia entre las placas y E_b la energía de rompimiento del aire.

La energía de incidencia utilizada en el trabajo de O. Bredice et al. fue de 150 mJ y la tensión aplicada a las placas fue de 2000 V.

Por otro lado, en la Figura 3.10 se observa la distribución de los datos mientras las placas se van moviendo a distancias iguales del plasma.

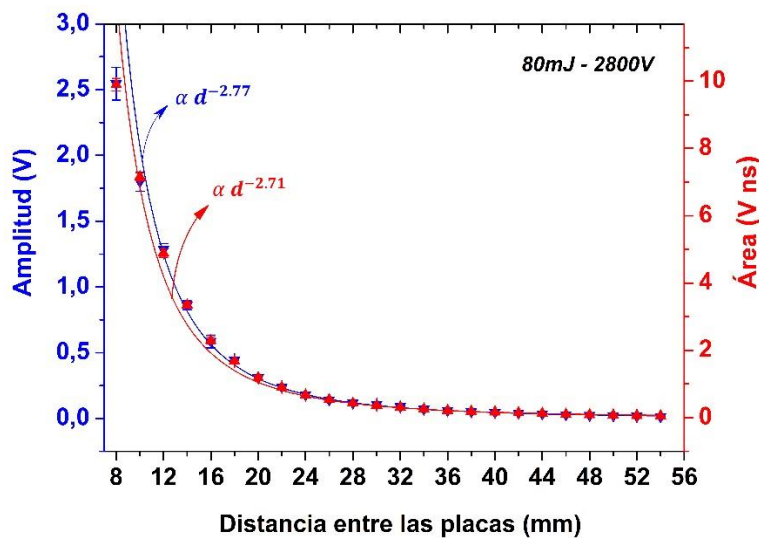


Figura 3.10. La dependencia del área y la amplitud con respecto a la distancia entre las placas. La energía utilizada fue de 80 mJ y la tensión entre las placas fue de 2800V.

La energía usada fue de 80 mJ y la tensión entre las placas fue de 2800 V. Se observó que el comportamiento tanto del área y la amplitud del primer pico de la señal eléctrica mostraron una afinidad a tener la forma de una función potencia (ver Figura 3.10). El área cambia con respecto a la distancia entre placas como: $d^{-2.71}$. En tanto que la amplitud varía con la distancia entre las placas como: $d^{-2.77}$.

Es preciso señalar, que al comparar las Figura 3.9 y Figura 3.10 se observa una coincidencia en los resultados obtenidos por O. Bredice et al. y los resultados mostrados en este trabajo, esto independientemente de la energía utilizada en los pulsos de luz láser. Esto muestra que la variación de la señal eléctrica está directamente relacionada con la variación de la distancia. Por otro lado, se observa que la dependencia del área y la amplitud con respecto a la distancia entre las placas tienen un comportamiento similar (ver Figura 3.10). En la Figura 3.11 se observa la variación de la transmitancia conforme varía la distancia entre placas. Un hecho a resaltar es que la distancia inicial entre las dos placas fue de, 8 mm. A esta distancia el campo eléctrico generado por el par de placas tiene una mayor intensidad, sin embargo, en ningún momento la energía transmitida y por consecuencia la transmitancia se ven afectadas por dicho campo. La transmitancia tiene

un comportamiento constante. La transmitancia se mantiene entre los valores de, 29.5 % a 31.5 %.

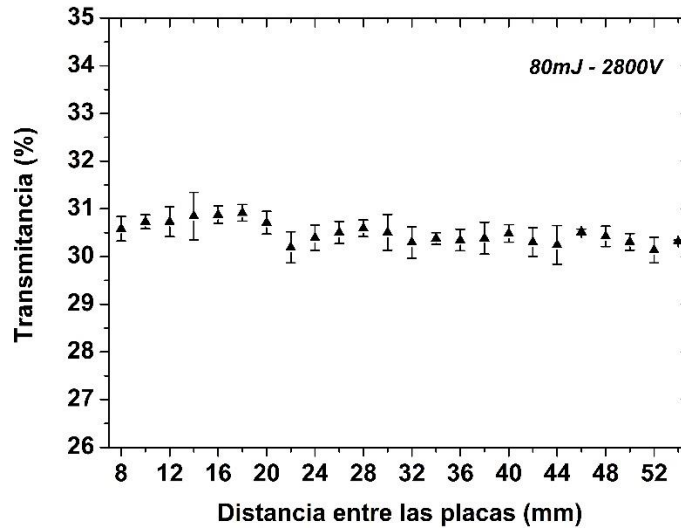


Figura 3.11. Dependencia de la transmitancia con respecto a la distancia entre las placas. La tensión utilizada entre las placas de 2800 mJ y la energía incidente fue de 80 mJ.

3.3 Variación de la tensión entre placas

En esta sección se presentan los experimentos realizados una vez está fijada la distancia del plasma a la placa de A, 7 mm. La distancia entre placas fue de 35 mm y se mantuvo fija. El parámetro que se fue variando fue la tensión entre las placas. La variación fue primero de 35 V a 185 V, con saltos de 30 V; la segunda variación fue de 200 V a 4000 V, con saltos de 200 V. Para la realización del experimento se utilizaron once energías. Las energías utilizadas para los pulsos de luz láser se encontraron en un rango de 80 a 300 mJ (sección 2.4).

En la Figura 3.12 se observa la dependencia del área del primer pico de la señal eléctrica con respecto a cómo varía la tensión entre las placas. En el gráfico (Figura 3.12) solo se muestran tres conjuntos de datos, pertenecientes a tres energías. Los resultados pertenecientes a las doce energías no se graficaron para no saturar la imagen, se tomaron solo tres. El criterio de elección se basó en colocar la energía mínima, máxima y la energía que estuviera a la mitad. Siendo así, los resultados graficados fueron de las energías de: 80 mJ, 200 mJ y 300 mJ. El conjunto de los doce gráficos se observa en el apéndice 7.1.

En la Figura 3.12 se puede observar la tendencia de la curva a seguir aumentando mientras se les aplique más tensión a las placas. Físicamente no puede seguir aumentando al infinito, es decir, la energía utilizada en los pulsos laser y la tensión no puede ser infinita.

Dentro de las funciones que se pueden utilizar para ajustar una curva a datos experimentales se encuentran una variedad amplia, por ejemplo: las polinómicas, las potencias, exponenciales, etc. Así, como una combinación entre las antes mencionadas.

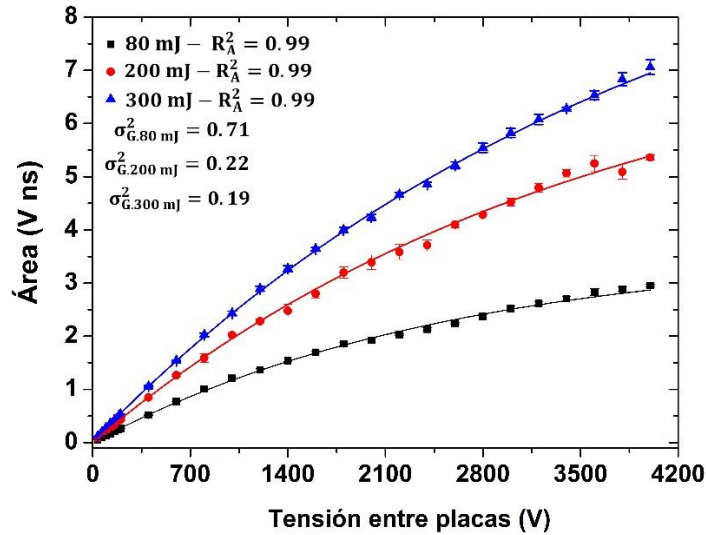


Figura 3.12. Dependencia del área respecto al cambio de tensión entre placas para tres energías, 80 mJ, 200 mJ y 300 mJ. Separación de las placas: 35 mm.

Asimismo, se optó por tomar una función que además de adecuarse a los datos experimentales obtenidos, también tuviera una relación con el fenómeno en cuestión. La ecuación que se ocupó para ajustar los datos experimentales tiene una similitud con la función de carga y descarga de un capacitor.

$$A(Vs) = Y_0 + A_0 e^{R_0 V} , \tag{11}$$

donde Y_0 , A_0 y R_0 , son parámetros encontrados a partir del ajuste de los datos recabados. En la Figura 3.13 se colocó el coeficiente de determinación ajustado (R_A^2) para corroborar la calidad del modelo utilizado. Se observa que para las tres energías (80 mJ, 200 mJ y 300 mJ) R_A^2 tiene valores de 0.99. Este valor es homogéneo para todo el conjunto de energías (ver apéndice 7.1). Por otro lado, el valor de la varianza global (σ_G^2) le da solidez al ajuste utilizado. En la Figura 3.12 se muestra la varianza global para los tres gráficos plasmados. Las tres varianzas muestran valores por debajo de 1 (las varianzas correspondientes a las energías restantes se muestran en el apéndice 7.1). Entonces, el coeficiente de determinación ajustado y la varianza global indican una correspondencia buena para el ajuste utilizado. En la Figura 3.13 se muestra la dependencia de la transmitancia con respecto de la tensión entre las placas.

Se ocupó tres energías para representar el fenómeno con el criterio antes mencionado. Las mismas energías que en la Figura 3.12, 80 mJ, 200 mJ y 300 mJ. En la gráfica (Figura 3.13) se observa que la transmitancia se mantiene constante para las tres energías. Realmente se mantiene constante para las doce energías utilizadas en este experimento (ver apéndice 7.1), es decir, la tensión no afecta a la transmitancia.

De igual forma, se observa que la energía incidente total que se usa para producir el plasma en aire, solo un porcentaje es utilizado. Por ejemplo, para la energía incidente de 80 mJ, se utilizó 70 % de la energía, mientras que el 30 % de la energía es transmitida. Por otro lado, se observa que la transmitancia es menor cuando la energía de incidencia es alta. Se puede observar que para 300 mJ, la transmitancia es del 15 %. Esto quiere decir que el plasma uso aproximadamente un 85 % de la energía incidente para su

formación. Esto se debe a que el plasma se vuelve más denso a medida que la energía incrementa.

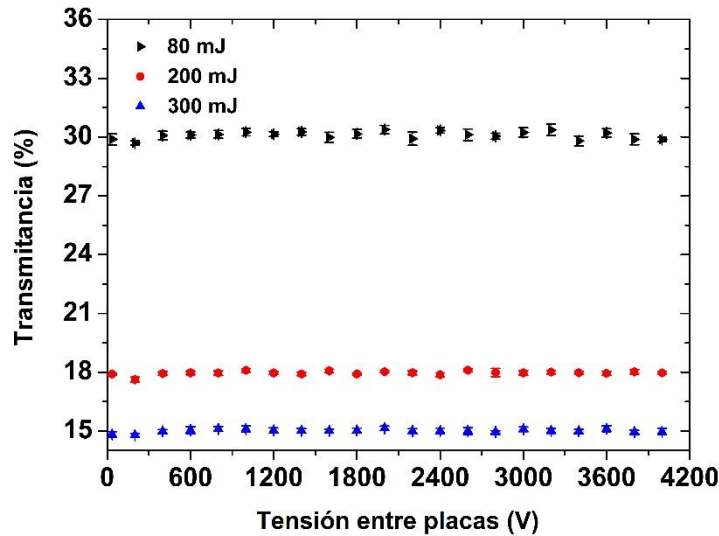


Figura 3.13. Dependencia de la transmitancia con respecto a la tensión aplicada a las placas para tres energías de incidencia, 80 mJ, 200 mJ y 300 mJ. Separación de las placas: 35 mm.

3.3.1 Análisis de la tensión entre las placas

Para cada conjunto de datos, por ejemplo, la curva de 80 mJ (ver Figura 3.12) se ajustó por mínimos cuadrados a la ecuación (11), obteniendo los valores de los coeficientes Y_0 , A_0 y R_0 . Entonces, para cada una de las doce energías se aplicó mínimos cuadrados obteniendo tres coeficientes. Finalmente se obtuvo un total de treinta y seis coeficientes (ver apéndice 7.1.1) y se graficaron con respecto a la energía (ver Figura 3.14). Graficados Y_0 , A_0 y R_0 , se le ajustó una curva a cada uno. A continuación, mostramos la curva ajustada para cada coeficiente.

$$R_0(E) = a - b \ln(E + c), \quad (12)$$

$$Y_0(E) = a' + b'E, \quad (13)$$

$$A_0(E) = a'' + b''E, \quad (14)$$

a , b , c , a' , b' , a'' y b'' son constantes que obtenemos de ajustar las curvas por mínimos cuadrados.

En cada uno de los gráficos de la Figura 3.14 se muestran los coeficientes de determinación ajustada para cada uno de los coeficientes Y_0 , A_0 y R_0 . Los resultados muestran valores aceptables de R_A^2 .

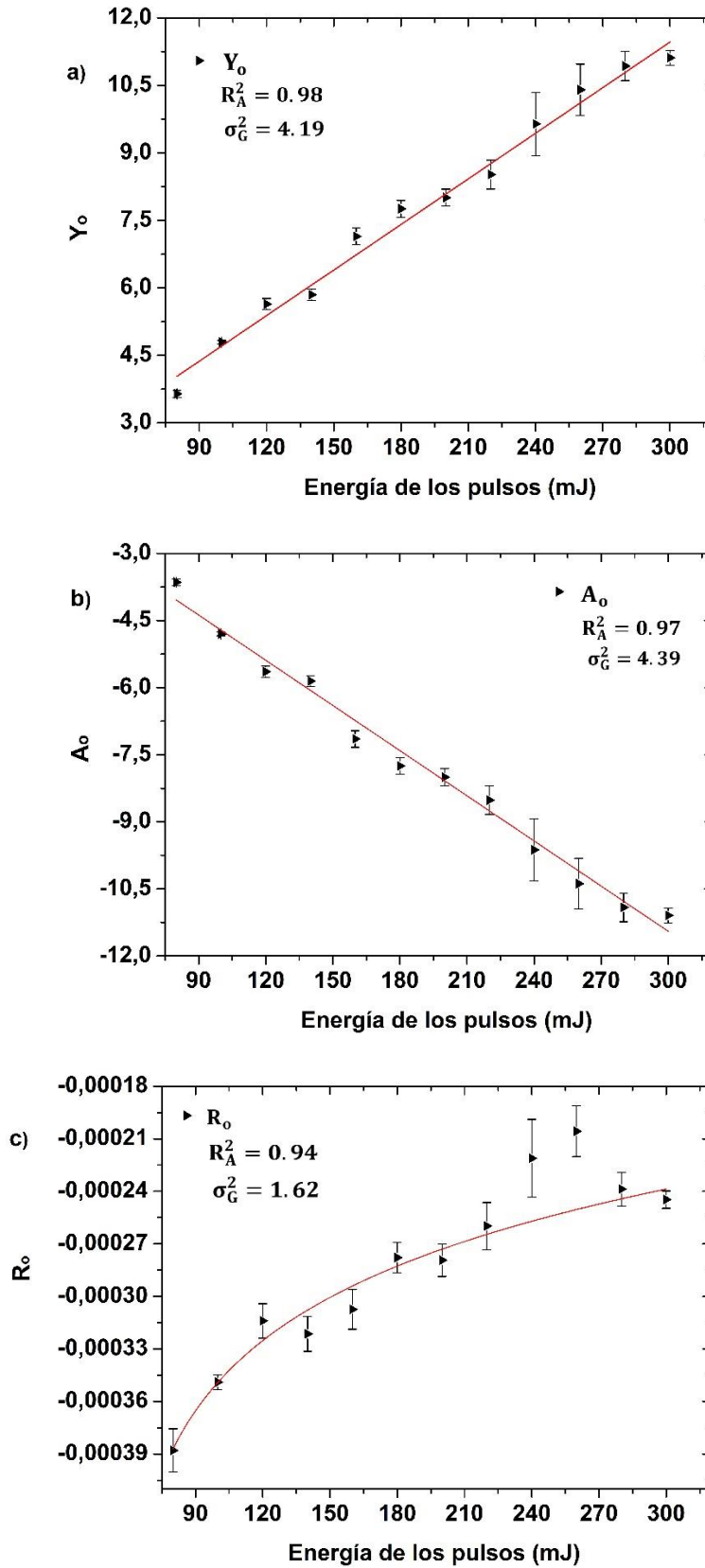


Figura 3.14. Conjunto de datos y curvas de ajuste para cada uno de los coeficientes Y_0 , A_0 y R_0 .

Por otra parte, se muestran los valores de la varianza global para cada uno de los ajustes. Esto indica una correspondencia aceptable con los modelos propuestos para Y_o , A_o y R_o .

A continuación, se muestra las funciones con sus respectivas constantes

$$R_o(E) = (-5.99 \times 10^{-4}) + [(6.55 \times 10^{-5}) \ln(E - 54.46)], \quad (15)$$

$$Y_o(E) = (1.33 \times 10^{-9}) + (3.38 \times 10^{-11})E, \quad (16)$$

$$A_o(E) = (-1.35 \times 10^{-9}) - (3.37 \times 10^{-11})E, \quad (17)$$

3.4 Variación de la energía del pulso del láser

En esta sección se presenta la parte complementaria del experimento presentado en la sección 2.4. Se tuvo una distancia entre placas de 35 mm. Una distancia del plasma a la placa de tierra de 7 mm. Tensiones desde 35 V a 4000 V, con diferentes saltos. Las energías de los pulsos variaron de 80 mJ a 300 mJ.

En la Figura 3.15 se muestra el comportamiento del área del primer pico de la señal eléctrica con respecto a la energía de los pulsos del láser. Se muestran solo tres tensiones en el gráfico, 200 V, 2000 V y 4000 V. El criterio utilizado para elegir las tensiones fue tomar la tensión inicial, final y la de en medio de la segunda corrida tensiones, que va de 200 V a 4000 V. Esto es, para no saturar la imagen (el resto de las tensiones se puede observar en el apéndice 7.2).

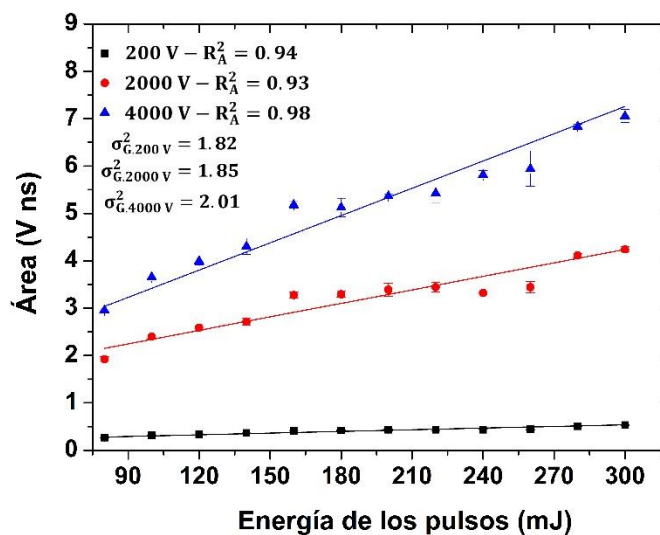


Figura 3.15. Dependencia del área del primer pico de la señal eléctrica con respecto a la energía de los pulsos del láser. Se muestran tres diferentes tensiones, 200 V, 2000 V y 4000 V.

En la Figura 3.15, se ajustó como primera aproximación una línea recta a los tres conjuntos de datos experimentales.

Por otra parte, se reportó los valores de los coeficientes de determinación ajustada y la varianza global para cada una de las tensiones utilizadas (en el apéndice 7.2 se muestra los valores del conjunto total de tensiones). Los resultados de las R_A^2 y las varianzas

muestran que el ajuste utilizado no hace una correspondencia muy buena con los datos experimentales. Sin embargo, como primera aproximación tiene una relación aceptable. Esto muestra que el área del primer pico de la señal eléctrica es directamente proporcional a la energía utilizada para generar el pulso del láser.

Por otro lado, se observa que la dependencia de la transmitancia con respecto de la energía incidente (energía de los pulsos), disminuye conforme los pulsos van siendo más energéticos (ver Figura 3.16). Es decir, se utiliza la mayor parte de la energía al usar 300 mJ, que cuando se usa 80 mJ. Para 80 mJ, el 70% de la energía se utiliza para crear el chispazo. Para 300 mJ, el 85 % de la energía de incidencia es ocupado generar el plasma. Por otra parte, podemos corroborar de nuevo, que la tensión aplicada en al par de placas no influye de ninguna manera en la generación del plasma. En el apéndice 7.2 se muestra los datos completos de la transmitancia con respecto de la energía incidente. En la Figura 3.17, se observa lo que se mencionó con anterioridad, para la energía de 300 mJ el porcentaje de energía utilizada para producir la energía es de 85 %. Mientras que para 80 mJ, se utilizó el 70 %. En el grafico (Figura 3.17) se presenta la fracción de la energía depositada en la formación del plasma con respecto a la energía incidente de los pulsos de luz láser.

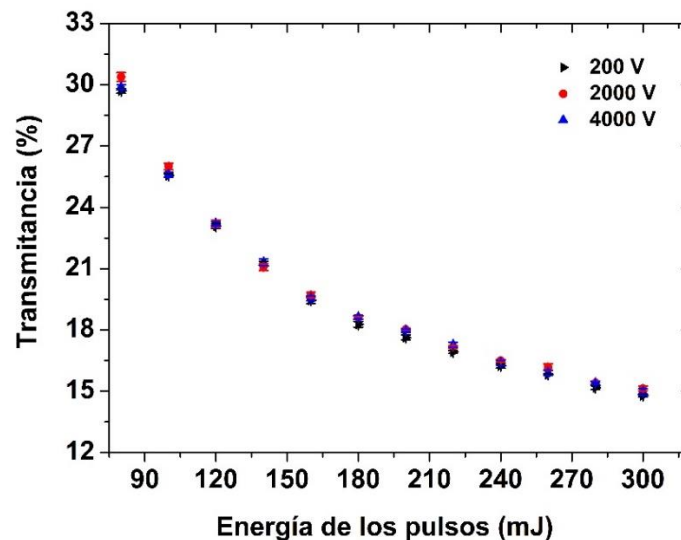


Figura 3.16. Dependencia de la transmitancia con respecto a la energía. Se grafican tres distintas tensiones: 200 V, 2000 V y 4000 V.

Bredice et al. ³, mostraron que para dos lentes con distancias focales diferentes la de menor distancia focal produce un mejor plasma. Es decir, la fracción de la energía depositada es mayor. En su experimento utilizaron una lente con una distancia focal de 75 mm. Se observó que por encima de los 150 mJ se deposita aproximadamente un 90 % de la energía incidente. Por otro lado, para una lente de 150 mm se deposita alrededor del 70 % de la energía incidente. En este trabajo se utilizó una lente con distancia focal de 100 mm y por encima de los 150 mJ se depositó más del 80 % de la energía incidente.

Por lo tanto, un factor de suma importancia para la formación del plasma es la distancia focal de la lente utilizada. Cuando se utiliza lentes con distancias focales grandes se producen inestabilidades de disparo a disparo en el punto de formación del plasma.

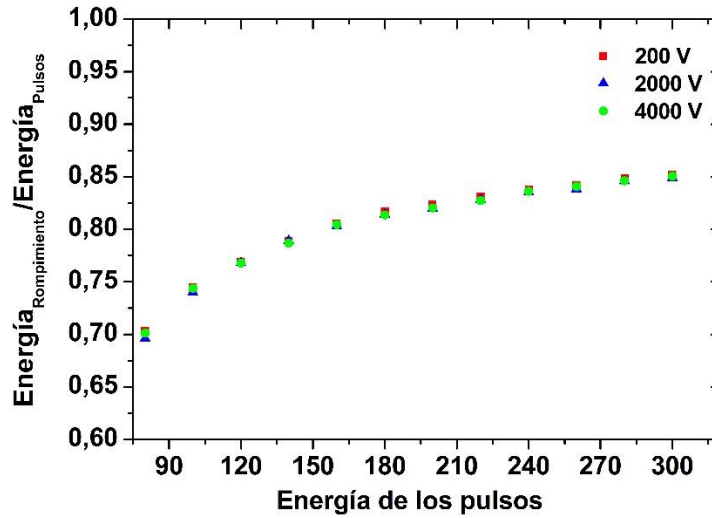


Figura 3.17. Fracción de la energía depositada en la descarga como función de la energía de los pulsos del láser (energía incidente).

3.5 Ecuación de tensión-energía

En la sección 3.3 se hizo un ajuste de los datos realizados del experimento de la variación de la tensión (sección 2.4). Se relacionó el área del primer pico de la señal eléctrica con la tensión aplicada al condensador. Se ajustó una función (Ecu. (11)) y se realizó un análisis para hallar los valores Y_0 , A_0 y R_0 de cada conjunto de datos. Obtenido los valores Y_0 , A_0 y R_0 se graficó con respecto a la energía de los pulsos y se ajustó una curva para cada coeficiente (ver Figura 3.14). Posteriormente, se obtuvo tres ecuaciones: (15), (16) y (17). Los análisis desarrollados permitieron desarrollar una ecuación que relaciona la tensión y la energía de los pulsos de luz láser. De los coeficientes Y_0 , A_0 y R_0 tenemos las siguientes ecuaciones

$$R_0(E) = (-5.99 \times 10^{-4}) + [(6.55 \times 10^{-5}) \ln(E - 54.46)],$$

$$Y_0(E) = (1.33 \times 10^{-9}) + (3.38 \times 10^{-11})E,$$

$$A_0(E) = (-1.35 \times 10^{-9}) - (3.37 \times 10^{-11})E,$$

sustituyendo los coeficientes Y_0 , A_0 y R_0 en la ecuación

$$A(Vs) = Y_0 + A_0 e^{R_0 V},$$

se obtiene lo siguiente,

$$A(Vs, E) = \{(1.33 \times 10^{-9}) + (3.38 \times 10^{-11})E\} + \{(-1.35 \times 10^{-9}) - (3.37 \times 10^{-11})E\} e^{((-5.99 \times 10^{-4}) + [(6.55 \times 10^{-5}) \ln(E - 54.46)])V}. \quad (18)$$

En teoría la ecuación (18) debería poder reproducir adecuadamente los resultados obtenidos en el experimento de la sección 2.4. Además de poder predecir valores intermedios que no se midieron, dada la robustez del experimento y la cantidad de datos obtenidos.

En las Figura 3.18 y Figura 3.19, se realizó una comparación de los datos que se obtuvieron experimentalmente y los datos que se generaron mediante la ecuación (18). Para el caso de la Figura 3.18, donde se grafica la dependencia del área con respecto a la tensión entre las placas, la obtención de los datos mediante la ecuación (18) se obtuvo de la siguiente manera: se fija un valor de la energía y se toma como una constante y después se varía la tensión. En nuestro caso variamos la tensión conforme se varió en el experimento. En el caso de la Figura 3.19 donde se grafica el área con respecto a la energía incidente, se obtuvo los datos mediante la ecuación (18) fijando una tensión y variando la energía de 80 mJ a 300 mJ, como en el experimento.

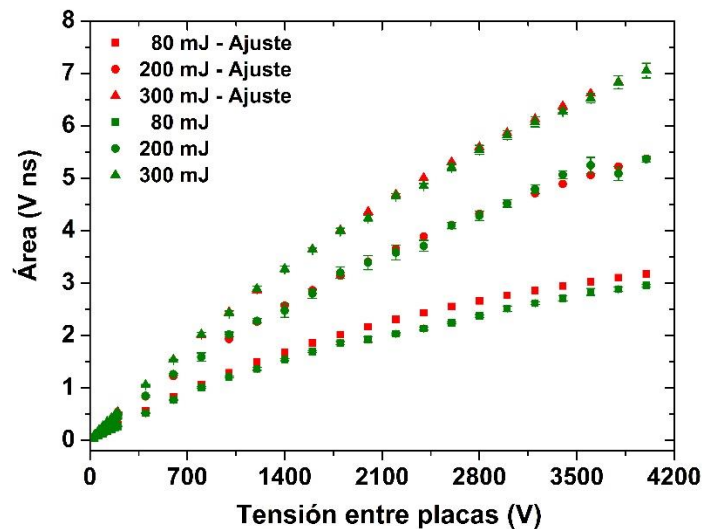


Figura 3.18. Dependencia del área del primer pico de la señal eléctrica respecto a la tensión entre las placas para dos conjuntos de datos. El primer conjunto (verde olivo) es el obtenido mediante los experimentos realizados y el segundo conjunto (rojo) es el obtenido mediante la ecuación (18).

Se puede observar que el ajuste realizado tiene una correspondencia aceptable con los datos obtenidos experimentalmente, por lo que se puede decir que se tiene una buena ecuación empírica.

Por otro lado, la ecuación (18) se puede usar para encontrar datos correspondientes a energías intermedias, que no se utilizaron en este experimento, por ejemplo: para las energías de 90 mJ, 130 mJ, 150 mJ, etc. Además, en experimentos donde se trabaje con láseres pulsados y no se tenga a la mano un medidor de energía, se puede utilizar el circuito con el que se trabajó, conociendo el área de nuestra señal eléctrica y utilizando la ecuación (18), para predecir la energía utilizada por el láser.

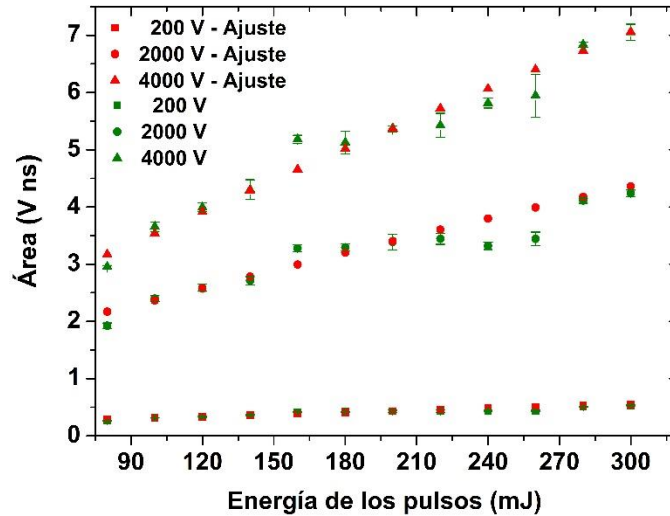


Figura 3.19. Área del primer pico de la señal eléctrica con respecto a la energía de los pulsos del láser. Se muestran dos conjuntos de datos: el conjunto verde es el correspondiente a los datos hallados experimentalmente y el segundo grupo (rojo) es el obtenido mediante la ecuación (18).

3.6 Interpretación física de la señal eléctrica

En este trabajo se estudiaron señales eléctricas producidas por un plasma generado por pulsos láser dentro de un capacitor de placas paralelas que formaba parte de un circuito eléctrico. Esto permitió obtener una ecuación que relaciona parámetros experimentales utilizados como: la energía y la tensión.

A continuación se presenta la interpretación física de las señales eléctricas.

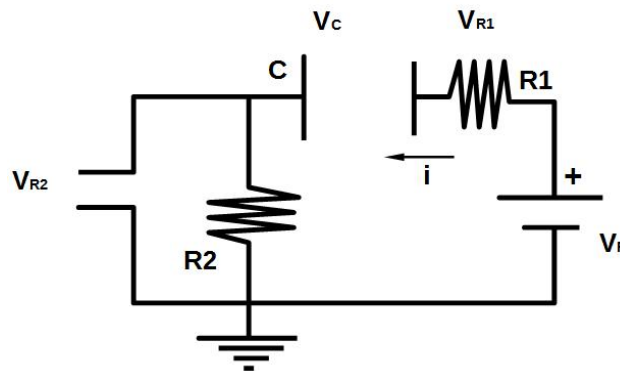


Figura 3.20. Circuito eléctrico utilizado para realizar el análisis eléctrico del plasma.

Para realizar el análisis del circuito (Figura 3.20) se utiliza la segunda ley de Kirchhoff (ley de tensiones), donde la suma de tensiones queda de la siguiente manera:

$$V_{R2} - V_F + V_c + V_{R1} = 0, \quad (19)$$

donde V_F es la tensión generada por la fuente, V_c la tensión en el capacitor, V_{R1} la tensión en la resistencia R_1 y V_{R2} la tensión medida en la resistencia R_2 , despejando:

$$V_{R2} = V_F - V_c - V_{R1} , \quad (20)$$

Por otro lado, de la primera ley de Kirchhoff (ley de nodos) se sabe que la corriente I que pasa por $R1$, debe ser la misma que pasa por el condensador y también que pasa por $R2$.

De la ley de Ohm podemos expresar la corriente I que circula por $R2$ como,

$$I = \frac{V_{R2}}{R2} . \quad (21)$$

Esta corriente I , que pasa por la resistencia $R2$, tiene que ser igual a la corriente de desplazamiento I_D . Para poder definir esta corriente de desplazamiento se hace uso de la ley de Ampere-Maxwell, que es una de las ecuaciones de Maxwell. Dicha ley relaciona la circulación de la intensidad del campo magnético en un contorno con la corriente que pasa a través de ese contorno (ver Figura 3.21) y también la corriente de desplazamiento I_D . De esta manera se expresa la ecuación de Maxwell como:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(\vec{I} + \vec{I}_D) . \quad (22)$$

donde \vec{B} es el campo magnético, $d\vec{l}$ es vector tangente a la trayectoria elegida, μ_0 es la permeabilidad del vacío, \vec{I} es la corriente de conducción e \vec{I}_D la corriente de desplazamiento.

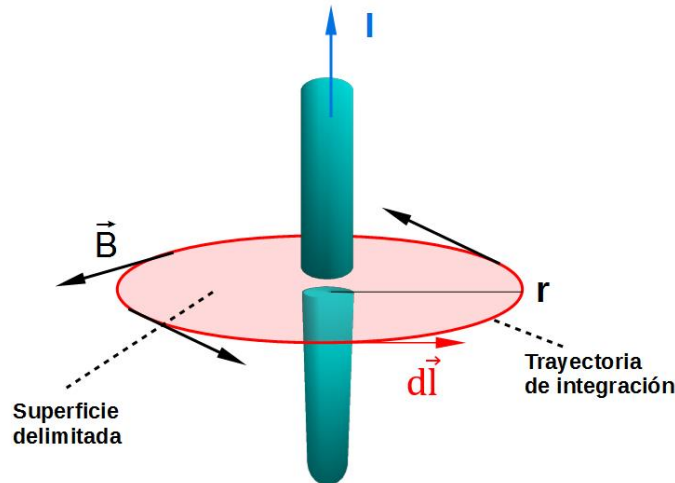


Figura 3.21. Siguiendo la ley de Ampere, una corriente que pasa por un cable produce un campo magnético \vec{B} , cuya dirección viene dada por la regla de la mano derecha. I : la corriente que fluye por el cable, \vec{B} : el campo magnético producido, $d\vec{l}$: el vector diferencial paralelo a la trayectoria y r : radio de la circunferencia con centro en el cable conductor.

Según Maxwell la corriente de desplazamiento I_D se expresa de la siguiente manera:

$$\vec{I}_D = \epsilon_0 \iint \frac{d\vec{E}}{dt} \cdot d\vec{s} , \quad (23)$$

donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío, $\frac{d\vec{E}}{dt}$ es la variación del campo eléctrico en el tiempo y $d\vec{s}$ la diferencial de la superficie. En un capacitor de placas paralelas (Figura 3.22) es necesario hacer uso de la corriente de desplazamiento para poder explicar que en ambos lados de las placas haya una corriente de conducción.

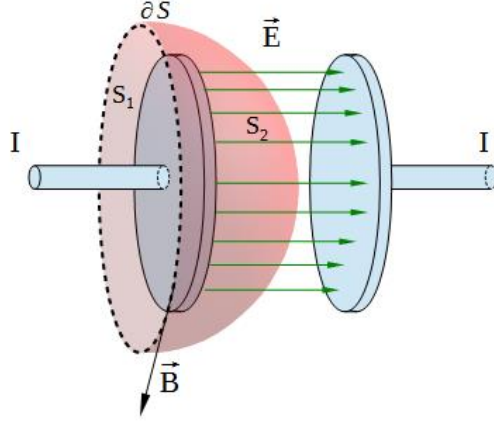


Figura 3.22. Se muestra dos superficies S_1 y S_2 que comparte la delimitación ∂S . Pero, S_1 es atravesado por una corriente de conducción mientras que S_2 es atravesado por una corriente de desplazamiento.

Ahora si de la Ecu. (23) se saca el diferencial de la integral, se obtiene:

$$I_D = \epsilon_0 \frac{d}{dt} \iint \vec{E} \cdot d\vec{s}, \quad (24)$$

donde la integral es el flujo de campo eléctrico,

$$\phi_e = \iint \vec{E} \cdot d\vec{s}. \quad (25)$$

Entonces la corriente de desplazamiento queda como:

$$I_D = \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt}. \quad (26)$$

Al sustituir en la Ecu. (21), obtenemos

$$V_{R2} = \epsilon_0 \frac{d\phi_e}{dt} R2. \quad (27)$$

Entonces podemos afirmar que la tensión medida en el trabajo es proporcional a la variación del flujo de campo eléctrico en el capacitor, consecuencia de la acción del plasma. Siguiendo este razonamiento el campo eléctrico puede representarse como:

$$\vec{E} = \vec{E}_p + \vec{E}_c, \quad (28)$$

donde \vec{E}_p es el campo eléctrico generado por la acción del pulso del láser, que incluye a la propia radiación del láser y al plasma generado, y \vec{E}_c es el campo eléctrico previamente

existente en el capacitor. Si se sustituye este campo en la ecuación (24) y considerando que el campo \vec{E}_c es constante, se puede eliminar la componente correspondiente al campo del capacitor. De esta forma la tensión medida solo va a depender del cambio del flujo eléctrico producido por la acción del pulso láser (Φ_{ep}). De esta manera

$$V_{R2} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_{ep}}{dt} R2 . \quad (29)$$

Continuando con el análisis si se integra en el tiempo esta ecuación (28) se obtiene

$$\Delta\Phi_{ep} = \frac{1}{\epsilon_0 R2} \int_0^{\infty} V_{R2} dt . \quad (30)$$

En la Figura 3.23 se muestra el resultado de la integración de los valores de V_{R2} , obtenidos con las siguientes condiciones: energía del pulso láser: 120 mJ; tensión aplicada al capacitor: 1000 V; y separación de las placas paralelas: 35 mm y en la misma figura se muestra la señal óptica del pulso del láser, donde ambas señales se normalizaron.

Se puede observar una adecuada coincidencia entre ambas señales, lo cual resulta coincidente con la interpretación física que se expresa en la ecuación (28).

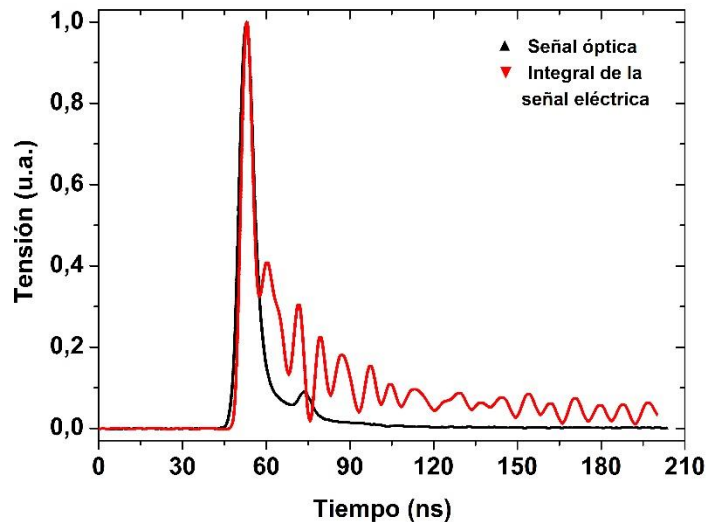


Figura 3.23. Señal óptica con una energía de 120 mJ y longitud de onda de 1064 nm (curva negra) e integral de la señal eléctrica (curva roja). Las señales se encuentran normalizadas. Distancia entre placas: 35 mm y tensión entre placas: 1000 V.

Como conclusión de este apartado se logró obtener una interpretación física de las señales estudiadas, que permite la correspondencia entre teoría y experimento. Como aplicación práctica los resultados muestran la posibilidad de determinar la duración de los pulsos del láser.

4. Conclusiones

A continuación se presentan las conclusiones de este trabajo para el cual fue necesario desarrollar un sistema automatizado que vincula un láser de Nd:YAG, un generador de pulsos, un medidor de energía, una fuente de alto voltaje, mesas de desplazamiento y un osciloscopio a una computadora. Para el control de los equipos y el procesamiento de los resultados se utilizó el lenguaje de programación Matlab, para lo cual se implementaron programas que permitieron analizar las señales *in-situ* y en tiempo real, de manera que era posible monitorear anomalías del experimento.

- Se demuestra que la tensión estudiada en el circuito eléctrico es proporcional a la variación en el tiempo del flujo del campo eléctrico generado por la acción del pulso láser que incide entre las placas del capacitor, de manera que su integral en el tiempo corresponde con la señal óptica del láser. Este resultado permite determinar la duración de los pulsos del láser.
- Se cuenta con una ecuación que relaciona parámetros de la señal de estudio con la tensión aplicada al capacitor y la energía de los pulsos del láser.
- Cuando se fija la tensión entre las placas del capacitor, el área del primer pico de la señal eléctrica presenta un comportamiento lineal con la energía del láser, cuya pendiente se incrementa con el aumento del valor de la tensión. Este resultado permite utilizar este sistema como medidor de energía.
- Cuando se fija la energía del láser y se varía la tensión entre las placas, el área del primer pico de la señal eléctrica tiene un comportamiento creciente y asintótico. El valor de la asíntota se incrementa con la energía del láser.
- El área del primer pico de la señal eléctrica presenta un mínimo en la zona central en el capacitor, con tendencia a incrementar su valor al acercarse a los electrodos hasta alcanzar máximos y luego tener una caída, dando una figura similar a una "M". La caída en la zona cercana a los electrodos se asocia con el contacto del plasma producido por la acción del láser con estos electrodos.

- Cuando la placa conectada a tierra y la posición del plasma quedan fijos y se mueve la placa conectada a la fuente, el área del primer pico decae como una función $d^{-2.49}$ y la amplitud como $d^{-2.4}$, donde d es la distancia entre las placas.
- Cuando se fija la posición del plasma en el centro del capacitor y se varia la distancia entre las placas, d , la amplitud del primer pico varia como una función $d^{-2.77}$, lo cual es coincidente previamente por Bredice et al.³.
- Tal y como se esperaba la transmitancia del pulso del láser disminuye con el aumento de la energía del mismo. Esta transmitancia no es afectada por la tensión de las placas, en el rango estudiado (35 V a 4000 V).

5. Trabajos futuros

El trabajo que se realizó a lo largo de esta tesis sirve de preámbulo de un estudio más profundo. En primera estancia se buscara afinar detalles experimentales como:

- Automatizar por completo el experimento implementado un atenuador motorizado.
- Hacer un estudio minucioso del circuito utilizado, para poder discernir si las oscilaciones observadas en las señales son producto del propio circuito o tienen que ver con los procesos físicos de la interacción del plasma y el campo eléctrico generado por el capacitor.
- Desarrollar un dispositivo que nos permita tener una atmosfera controlada para evitar las variables de temperatura y humedad. Además, de poder agregar una variable adicional, la presión.

Una vez afinado los detalles experimentales, se buscara variar parámetros de la energía, que nos permita extender el estudio. Entonces:

- Se utilizará diferentes longitudes de onda para la generación del plasma: 532 nm y 355 nm.
- Se utilizará diferentes lentes para cambiar la distancia focal, con que se enfoca el láser.
- Se usarán diferentes retrasos del *Q-switch* y se observara si guarda una relación el ancho del pulso del láser y el ancho del primer pico de la señal eléctrica.

Se analizará con más detalle las señales obtenidas en cada uno de los experimentos, es decir, las oscilaciones, tiempo de subida y tiempo de amortiguamiento de las señales y la relación que pudiera tener con la energía de los pulsos laser, tensión aplicada al condensador, la distancia entre placas y área de enfoque.

Finalmente, estos estudios deberán permitir el desarrollo de un dispositivo para medir simultáneamente la energía del láser, el ancho del pulso y la densidad de potencia por unidad de área.

6. Referencias

1. Bebb, H. B. & Gold, A. Multiphoton ionization of hydrogen and rare-gas atoms. *Phys. Rev.* **143**, 1–24 (1966).
2. Young, M., Hercher, M. & Wu, C. Y. Some characteristics of laser-induced air sparks. *J. Appl. Phys.* **37**, 4938–4940 (1966).
3. Bredice, F. O., Orzi, D. J. O., Schinca, D., Sobral, H. & Villagrán-Muniz, M. Characterization of pulsed laser generated plasma through its perturbation in an electric field. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30**, 2139–2143 (2002).
4. Chen, F. F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (2016). doi:10.1007/978-3-319-22309-4_11.
5. Miziolek, A. W., Palleschi, V. & Schechter, I. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) Fundamentals and Applications*. (2006).
6. Damon, E. K. & Tomlinson, R. G. Observation of ionization of gases by a ruby laser. *Appl. Opt.* **2**, 546–547 (1963).
7. Meyerand, R. G. & Haught, A. F. Gas breakdown at optical frequencies. *Phys. Rev. Lett.* **5**, 470–472 (1960).
8. Graham-Rowe, D. Four wheels good? *Nature* **4**, 16–19 (2009).
9. Beduneau, J. L., Kawahara, N., Nakayama, T., Tomita, E. & Ikeda, Y. Laser-induced radical generation and evolution to a self-sustaining flame. *Combust. Flame* **156**, 642–656 (2009).
10. Kiefer, J., Tröger, J. W., Li, Z. S. & Aldén, M. Laser-induced plasma in methane and dimethyl ether for flame ignition and combustion diagnostics. *Appl. Phys. B Lasers Opt.* **103**, 229–236 (2011).
11. Muniz, M. V. *et al.* Diagnostics techniques of plasmas produced by laser ablation. *AIP Conf. Proc.* **759**, 14–27 (2005).
12. Radziemski, L. J. From LASER to LIBS, the path of technology development. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* **57**, 1109–1113 (2002).
13. Paulin Fuentes, J. M. Diagnósticos Eléctricos y Magnéticos de un Plasma Inducido por Láser en Aire. (2014).
14. Ageev, V. P. *et al.* Electric field of a plasma generated by optical breakdown in air. *Zhurnal Eksp. i Teroreticheskoi Fiz.* **76**, 158–163 (1979).
15. Mauricio Paulin Fuentes, J., Sánchez-Aké, C., Bredice, F. O. & Villagrán-Muniz, M. Dipolar distribution generated by laser-induced plasma (LIP) in air in earliest instants. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **46**, (2013).
16. Gutiérrez Hernández, U. J. Plasma inducido por pulsos láser en agua: Generación y caracterización. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2016).
17. Robledo-Martínez, A., Sobral, H. & Villagrán-Muniz, M. Dipolar field and plasma expansion at the onset of laser-induced breakdown in a uniform dc field. *J. Phys. D.*

- Appl. Phys.* **37**, 2819–2826 (2004).
18. Paulin-Fuentes, J. M., Sánchez-Aké, C., Bredice, F. O. & Villagrán-Muniz, M. Quadrupole distribution generated by a laser induced plasma (LIP) in air in earliest instants using pulses of 532 or 355 nm. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **48**, (2015).
 19. Radziemski, L. J., Loree, T. R., Cremers, D. A. & Hoffman, N. M. Time-Resolved Laser- Induced Breakdown Spectrometry of Aerosols. *Anal. Chem.* **55**, 1246–1252 (1983).
 20. Cremers, D. & Radziemski, L. *Handbook of Laser-Induced*. (Wiley, 2013).
 21. Beduneau, J. L. & Ikeda, Y. Spatial characterization of laser-induced sparks in air. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **84**, 123–139 (2004).
 22. Glumac, N. & Elliott, G. The effect of ambient pressure on laser-induced plasmas in air. *Opt. Lasers Eng.* **45**, 27–35 (2007).
 23. Zhang, H., Lu, J. & Ni, X. Optical interferometric analysis of colliding laser produced air plasmas. *J. Appl. Phys.* **106**, 1–6 (2009).
 24. Thiyagarajan, M., Williamson, K. & Kandi, A. R. Experimental investigation of 1064-nm IR laser-induced air plasma using optical laser shadowgraphy diagnostics. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **40**, 2491–2500 (2012).
 25. Zel'dovich, B. Y. & Piliipetskii, N. F. Laser radiation field focused by real systems. **11**, 64–68 (1966).
 26. Morgan, C. G. Laser-induced breakdown of gases. *Reports Prog. Phys.* **38**, 621–665 (1975).
 27. Phuoc, T. X. An experimental and numerical study of laser-induced spark in air. *Opt. Lasers Eng.* **43**, 113–129 (2005).
 28. Askar'yan, G. A., Rabinovich, M. S., Smirnova, A. D. & Studenov, V. B. Polarization of the ionization aureola of a light spark in a constant electric field. *JETP Lett.* **2**, 503–506 (1965).
 29. Zhivopistsev, E. S., Klimov, I. V., Markelov, E. Y., Korobkin, V. V. & Motylev, S. L. Study of the electric field of a laser spark produced in a breakdown of the air. *Bull. Bcademy Sci. Phys. c/c Izv. Akad. Nauk Seriia Fiz.* **56**, 1335–1341 (1992).
 30. Kabashin, A. V. & Nikitin, P. I. Electric fields of a laser spark produced by radiation with various parameters. *Quantum Electron.* **24**, 556 (1997).
 31. Korobkin, V. V. & Serov, R. V. Investigation of the magnetic field of a spark produced by focusing laser radiation. *JETP Lett.* **4**, 70–72 (1966).
 32. Konov, V. I., Nikitin, P. I. & Prokhorov, A. M. Air breakdown near the target under the action of two successive CO₂-laser pulses, and magnetic fields. *Bull. Bcademy Sci. Phys. c/c Izv. Akad. Nauk Seriia Fiz.* **48**, 1208–1213 (1985).
 33. Barbieri, B. & Beverini, N. Optogalvanic spectroscopy. *Rev. Mod. Phys.* **62**, 603–644 (1990).
 34. Sánchez-Aké, C., Bredice, F. & Villagrán-Muniz, M. Electric field-perturbation measurement of the interaction between two laser-induced plasmas. *Rev. Sci. Instrum.* **83**, (2012).
 35. Soubacq, S., Pignolet, P. & Mendonça, S. Effective laser field influence on the transverse triggering of a spark gap in air. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **35**, 1955–1960 (2002).
 36. Robledo-Martinez, A., Sobral, H. & Villagrán-Muniz, M. Measurement of the electrical size of a laser-induced plasma in a uniform field. *Appl. Surf. Sci.* **248**, 32–35 (2005).
 37. Okano, D. Detection of long-lived electrons around CO₂-laser-produced plasma in atmospheric gases using symmetric double-probe system. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **35**, 1143–1148 (2007).
 38. Guenther, A. H. & Bettis, J. R. A Review of Laser-Triggered Switching. *Proc. IEEE*

- 59**, 689–697 (1971).
39. Broks, B. H. P., Hendriks, J., Brok, W. J. M., Brussaard, G. J. H. & van der Mullen, J. J. A. M. Plasma physical model of the photoconductively switched spark gap. *27th Int. Conf. Phenom. Ioniz. Gases (ICPIG 2005)* 17–376 (2005).
 40. Sobral, H., Villagrán-Muniz, M. & Bredice, F. Energy balance in laser ablation of metal targets. *J. Appl. Phys.* **98**, (2005).
 41. Bredice, F. *et al.* Real time measurement of the electron density of a laser generated plasma using a RC circuit. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* **62**, 836–840 (2007).
 42. Pacheco, P. *et al.* Real time determination of the laser ablated mass by means of electric field-perturbation measurement. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* **142**, 50–54 (2018).
 43. Surelite. *Operation and Maintenance Manual for Surelite Lasers.* (2000).
 44. OPHIR Photonics. *Vega laser power/energy meter. User manual.* (2006).
 45. OPHIR Photonics. *User Commands.* (2017).
 46. Photonics OPHIR. *OphirLMMMeasurement COM Object.*
 47. Tektronix. *Online Programmer Guide TDS5000B Series Digital Phosphor Oscilloscopes.* (2004).
 48. Stanford Research Systems. *MODEL DG535 Digital Delay / Pulse Generator.* (2006).
 49. Stanford Research Systems. *Series Ps300. High Voltage, Power Supplies.* (2007).
 50. Miranda, J. Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales. 43 (2000).
 51. University of Pennsylvania Department of Physics & Astronomy. *Averaging , Errors and Uncertainty.* http://virgo-physics.sas.upenn.edu/uglabs/lab_manual/Error_Analysis.pdf (2015).
 52. Rosales Guzmán, C. G. Medida de la energía liberada en un plasma de ablación láser. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2007).
 53. Ramírez, O. *Distribución normal.* (2012).
 54. Fernández Bienes, A. Caracterización del proceso de ablación láser a partir de sus señales fotoacústicas. (Universidad Nacional Autónoma de México, 2017).
 55. Barchukov, A. I., Konov, V. I., Nikitin, P. I. & Prokhorov, A. M. Probe investigations of electric fields produced in air near a laser spark. *Sov. Phys. JETP* **51**, 482–486 (1980).
 56. Proulx, A., Talebpour, A., Petit, S. & Chin, S. L. Fast pulsed electric field created from the self-generated filament of a femtosecond Ti:sapphire laser pulse in air. *Opt. Commun.* **174**, 305–309 (2000).

7. Apéndice

7.1 Variación de la tensión entre las placas

Debido a la saturación de los gráficos en la sección 3.3 se optó por graficar tres energías con respecto al área del primer pico de la señal eléctrica. El siguiente gráfico (Figura 7.1) representa el conjunto completo de los datos obtenidos del experimento de la sección 2.4.

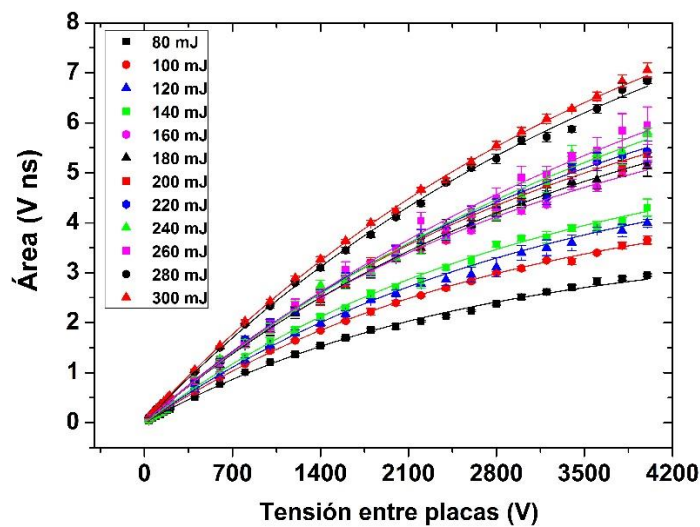


Figura 7.1. Dependencia del área respecto al cambio de tensión entre placas para doce energías, de 80 mJ a 300 mJ con saltos de 20 mJ. Separación de las placas: 35 mm.

Por otra parte, en la Tabla 7-1 se muestra los coeficientes de determinación ajustada y la varianza global para cada uno de las doce energías (80 mJ a 300 mJ). Se observa que R_A^2 tiene el mismo valor para cada energía y que los valores de la varianza global se encuentran por debajo de 1. Esto muestra la buena correspondencia que hay entre los datos experimentales y el modelo.

Energía (mJ)	R_A^2	σ_G^2	Energía (mJ)	R_A^2	σ_G^2
80	0.99	0.71	200	0.99	0.22
100	0.99	0.09	220	0.99	0.14

120	0.99	0.11	240	0.99	0.34
140	0.99	0.13	260	0.99	0.13
160	0.99	0.35	280	0.99	0.40
180	0.99	0.11	300	0.99	0.19

Tabla 7-1. Se muestra los coeficientes de determinación ajustada y la varianza global para cada una de las energías utilizadas para producir los pulsos láser.

En la sección 3.3 se graficó la transmitancia con respecto a la tensión entre placas haciendo uso de tres energías. En la Figura 7.2 se observa el conjunto completo de energías. Se observa que para cada energía, la transmitancia se mantiene constante conforme se varía la tensión entre las placas.

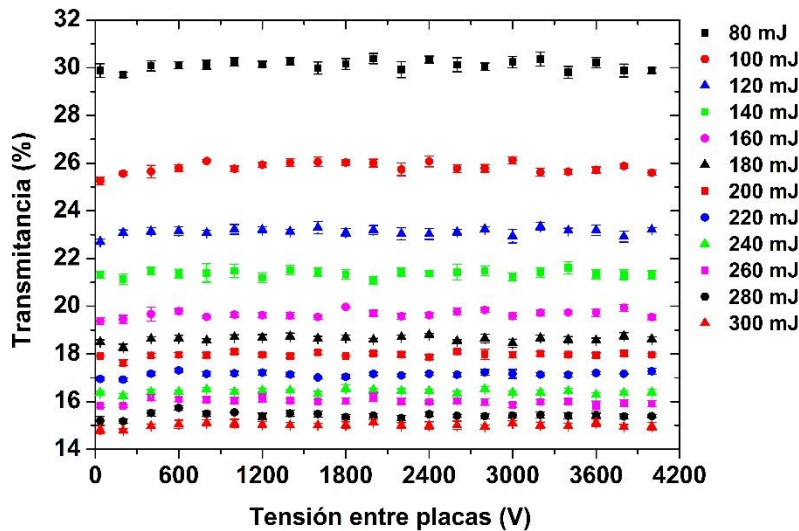


Figura 7.2. Dependencia de la transmitancia con respecto a la tensión aplicada a las placas para doce energías de incidencia, 80 mJ a 300 mJ en saltos de 20 mJ. Separación de las placas: 35 mm.

7.1.1 Análisis de la tensión entre las placas

Se hallaron los tres valores de las constantes asociadas a la ecuación (11) para cada uno de las doce energías. Para hallar cada uno de los valores se usó el método de mínimos cuadrados. En la siguiente tabla se muestra el valor y la incertidumbre para cada uno de los valores, Y_o , A_o y R_o (Tabla 7-2).

Energía (mJ)	Y_o		A_o		R_o	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
80	3.64	0.08	-3.64	0.08	-0.00039	0.00001
100	4.79	0.04	-4.80	0.04	-0.000349	0.000004
120	5.6	0.1	-5.6	0.1	-0.00031	0.00001
140	5.8	0.1	-5.9	0.1	-0.00032	0.00001
160	7.1	0.2	-7.1	0.2	-0.00031	0.00001
180	7.7	0.2	-7.7	0.2	-0.000278	0.000009
200	8.0	0.2	-8.0	0.2	-0.000279	0.000009
220	8.5	0.3	-8.5	0.3	-0.00026	0.00001

240	9.6	0.7	-9.6	0.7	-0.00022	0.00002
260	10.4	0.6	-10.4	0.6	-0.00021	0.00001
280	10.9	0.3	-10.9	0.3	-0.00024	0.00001
300	11.1	0.2	-11.1	0.2	-0.000245	0.000005

Tabla 7-2. Se muestra los valores y sus correspondientes incertidumbres para los valores de los coeficientes Y_0 , A_0 y R_0 .

7.2 Variación de la energía del pulso del láser

En la sección 3.4 se graficó el área del primer pico de la señal eléctrica con respecto a la energía de los pulsos del láser, para tres tensiones, 200 V, 2000 V y 4000 V. En el siguiente gráfico se muestra el conjunto completo de tensiones, partiendo desde 35 V a 4000 V (Figura 7.3).

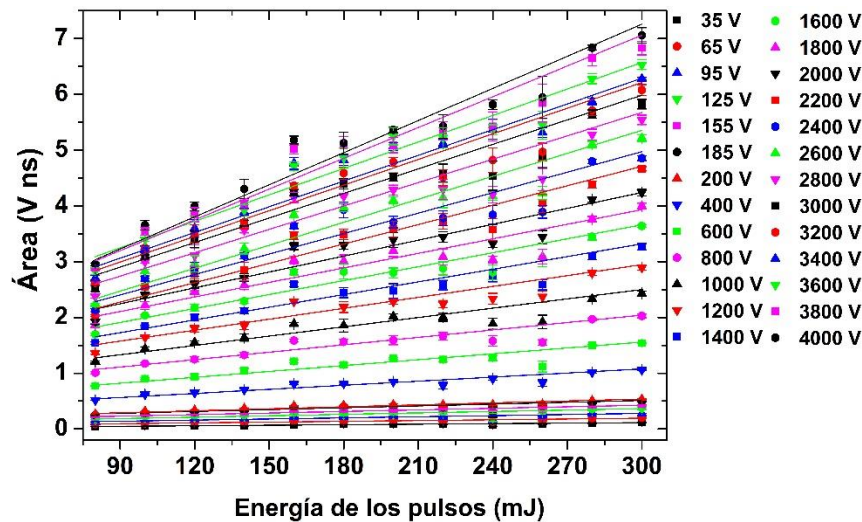


Figura 7.3. Dependencia del área del primer pico de la señal eléctrica con respecto a la energía de los pulsos del láser. Se muestran 26 tensiones, de 35 V a 4000 V.

Los coeficientes de determinación ajustada y los valores de la varianza para las tensiones aplicadas al par de placas paralelas usadas en la sección 2.4 se muestran en la Tabla 7-3. Se observa que los valores de R_A^2 varían en el segundo decimal, fluctuando entre 0.90 y 0.98. Por otro lado, los valores de la varianza global en su mayoría están por arriba de la unidad. Estos dos valores en conjunto nos dicen que la correspondencia entre el modelo y los datos experimentales, no resultó tan buena. Sin embargo, es aceptable.

Tensión (V)	R_A^2	σ_G^2	Tensión (V)	R_A^2	σ_G^2
35	0.95	0.69	1600	0.97	1.81
65	0.97	0.30	1800	0.93	1.99
95	0.98	0.46	2000	0.93	1.85
125	0.91	1.34	2200	0.97	2.35
155	0.97	0.47	2400	0.96	2.65
185	0.90	1.49	2600	0.96	3.35
200	0.94	1.82	2800	0.93	3.10

400	0.97	1.70	3000	0.97	1.17
600	0.99	1.26	3200	0.94	2.74
800	0.93	1.77	3400	0.98	1.83
1000	0.94	1.40	3600	0.98	1.01
1200	0.93	2.17	3800	0.96	1.27
1400	0.92	2.19	4000	0.98	2.01

Tabla 7-3. Se muestra los coeficientes de determinación ajustada y la varianza global para cada una de las tensiones.

De igual manera, en la sección 3.4 el gráfico de la transmitancia con respecto de la energía de los pulsos, se utilizaron tres tensiones, 200 V, 2000 V y 4000 V. En la Figura 7.4 se muestran las veintiséis tensiones, de 35 V a 4000 V.

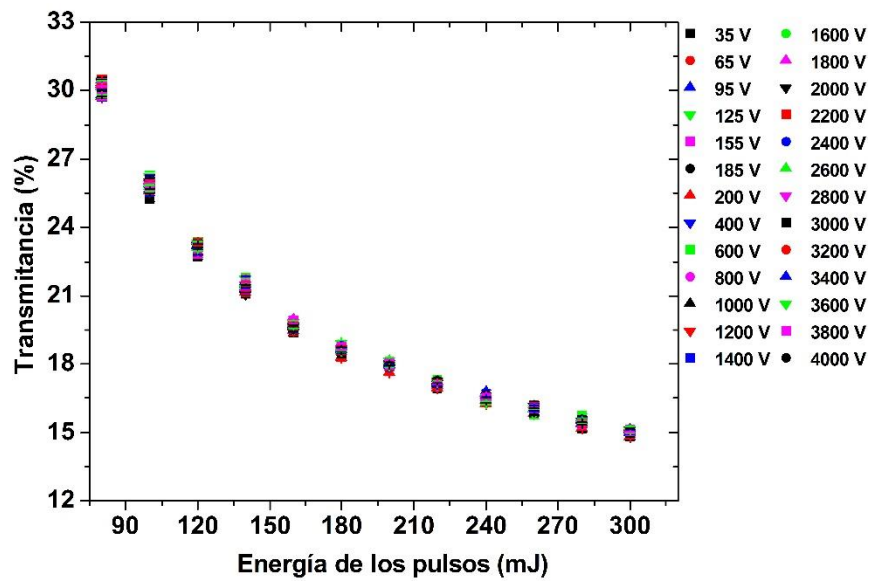


Figura 7.4. Dependencia de la transmitancia con respecto a la energía. Se grafican 26 tensiones: de 35 V a 4000 V.