



DIVISIÓN DE
CIENCIAS BÁSICAS
E INGENIERÍA

Maestría en Ciencias de la Computación

Reconstrucción tridimensional y caracterización de descargas eléctricas en gases

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en Ciencias de la Computación
presenta el:

Ing. Antonio García Amaya

Dirigida por:

Dr. Carlos Avilés Cruz

Dr. José Luis Hernández Ávila

México, D.F., octubre 2008

Índice

Índice	1
Índice de figuras	3
Capítulo 1. Introducción	6
1.1 Organización de la tesis	8
Capítulo 2. Estado del arte	9
Capítulo 3. Fundamentos teóricos	14
3.1 Procesamiento digital de imágenes	14
3.1.1 Pre-procesamiento o acondicionado de la imagen	14
3.1.2 Conversión a grises	15
3.1.3 Operaciones morfológicas sobre imágenes	16
3.1.4 Segmentación	18
3.1.5 Técnicas basadas en umbral	19
3.1.6 Filtro para imágenes en color	19
3.2 Reconstrucción tridimensional	19
3.3 Reconstrucción de superficie por mallas	21
3.4 Mallas simplex	22
3.4.1 Dualidad con las triangulaciones	24
3.4.2 Geometría de las mallas simplex	25
3.5 Estructuras face-vertex	28
3.6 Renderizado	29
3.7 Fractales	30
3.7.1 El concepto de fractal	30
3.7.2 Dimensión fractal	33
3.8 Descargas en gases	34
3.8.1 Regiones de descarga en corriente directa	35
3.8.2 Mecanismo del Streamer	37
3.8.3 Descarga corona	39
Capítulo 4. Implementación	40
4.1 Propuesta solución	40
4.2 Adquisición de imágenes	41
4.3 Sincronización de imágenes	43
4.4 Procesamiento digital de imágenes	45
4.5 Reconstrucción tridimensional	46
4.6 Realce	48
4.7 Optimización para la reconstrucción de superficie por mallas	50
4.8 Mallas Simplex	51
4.9 Interfaz gráfica	56

4.9.1 Manual del usuario	57
4.9.10 Manual del programador	62
<i>Capítulo 5. Resultados</i>	<i>63</i>
5.1 Discusión de resultados	74
<i>Capítulo 6. Observaciones y conclusiones</i>	<i>75</i>
6.1 Observaciones	75
6.2 Conclusiones	77
6.3 Perspectivas	78
<i>Bibliografía</i>	<i>79</i>
<i>Anexo 1</i>	<i>82</i>
<i>Montaje eléctrico</i>	<i>96</i>
<i>Matlab Compiler</i>	<i>99</i>
<i>Graficación 3D</i>	<i>101</i>
<i>Detalles de la implementación</i>	<i>111</i>

Índice de figuras

Figura 1.1	Descarga eléctrica en un medio controlado.	7
Figura 3.1	Un elemento estructural encajando en una posición y no encajando en otra.	16
Figura 3.2	(a) Una imagen sencilla. (b) y (c) Dos elementos estructurales diferentes. (d) y (e) Erosiones respectivas de (a).	17
Figura 3.3	(a) Una imagen sencilla. (b) y (c) dos elementos estructurales diferentes. (d) y (e) Dilataciones respectivas de (a).	17
Figura 3.4	Proyección P_0 de un objeto.	20
Figura 3.5	Ejemplos de p -células $0 \leq p \leq 3$.	23
Figura 3.6	Cuatro mallas 2-simplex genéricas.	24
Figura 3.7	Dualidad entre k -triangulaciones ($k=1,2$) dibujadas con líneas continuas y círculos sólidos, y mallas k -simplex dibujadas con líneas intermitentes y cuadrados como vértices. a) y b) son triangulaciones sin fronteras, c) y d) triangulaciones con fronteras.	25
Figura 3.8	(a) La esfera circunscrita S_2 de radio R_1 y el círculo circunscrito S_1 de radio R_i . b) Proyección de (a) en el plano (O_i, C_i, P_i) . El ángulo simplex puede ser interpretado como un ángulo de geometría planar.	26
Figura 3.9	Ejemplo de una estructura face-vertex.	28
Figura 3.10	Definiendo vértices del polígono para indicar dirección de la normal.	28
Figura 3.11	Efectos de iluminación en una esfera.	29
Figura 3.12	Cobertura con cuadrados de tamaño r para obtener la medición de una curva.	30
Figura 3.13	a) División de una línea en dos, produciendo así dos réplicas topológicas. b) División de los lados de un cuadrado, produciendo así cuatro réplicas topológicas.	31
Figura 3.14	Se muestra la relación lineal de la longitud de diferentes costas.	33
Figura 3.15	Tubo de descarga.	34
Figura 3.16	Curva característica corriente-voltaje ($I-V$) y sus diferentes regiones de descarga.	35
Figura 3.17	Procesos multiplicación electrónica de la región II de descarga en la cercanía del cátodo.	36
Figura 3.18	Distorsión del campo eléctrico debido a la carga de espacio inter-electrodos antes (a y b) y después (c y d) de que la avalancha electrónica alcance el ánodo. Las líneas de campo eléctrico del campo externo E_0 las líneas del campo eléctrico de la carga d espacio E' se muestran separadamente (a) y (a'). El campo eléctrico resultante E esta representado en (b) y (b').	37
Figura 3.19	Streamer dirigido al cátodo: (a) aspecto del streamer en dos momentos consecutivos de tiempo, con avalanchas secundarias moviéndose hacia el cátodo (las flechas onduladas representan los fotones que generan más electrones germinales). (b) Distorsión del campo eléctrico en la cabeza del streamer (c) etapa final de streamer.	38
Figura 3.20	(a) Ejemplo de streamer en un reactor punta plano en Argón y espacio entre electrodos de 30 mm. (b) Ejemplo de streamer en un reactor punta plano en medio gaseoso.	38
Figura 3.21	Aspecto de la descarga corona en configuración punta-plano a presión elevada.	39
Figura 4.1	Diagrama de flujo de etapas de proyecto.	40
Figura 4.2	Adquisición de imágenes con videocámaras analógicas.	41
Figura 4.3	Adquisición de imágenes con videocámaras digitales.	42
Figura 4.4	Circuito sencillo de generación de haz de luz.	43
Figura 4.5	Arreglo experimental para obtención de imágenes ortogonales con una sola cámara	44
Figura 4.6	Proyección lateral y superior de un objeto.	45
Figura 4.7	Encuadre de zona de ocurrencia.	46
Figura 4.8	Acondicionados imágenes lateral y superior, L y S deben ser iguales.	46
Figura 4.9	Reconstrucción tridimensional de imágenes de trabajo. También conocida como imagen volumétrica.	47
Figura 4.10	Reconstrucción tridimensional de imágenes de trabajo, utilizando isosuperficies.	48
Figura 4.11	Reconstrucción tridimensional tratada con realce e isosuperficies.	49

Figura 4.12	Reconstrucción de descarga eléctrica sin optimización.	50
Figura 4.13	Efecto de aplicar algoritmo de optimización a la reconstrucción.	51
Figura 4.14	Obtención de lista de píxeles que forman a un corte transversal.	52
Figura 4.15	Obtención de las cuatro primeras listas para formar polígonos que forman a la malla.	53
Figura 4.16	Colocado de la malla sobre el muestreo del canal.	53
Figura 4.17	Reconstrucción de superficie por malleo simplex.	54
Figura 4.18	Agregando color e iluminación al wireframe.	54
Figura 4.19	Reconstrucción de superficie con mallas simplex sin optimización 7,700 polígonos, 220 cortes y 140 muestras.	55
Figura 4.20	Reconstrucción de superficie con optimización: 875 polígonos con 8 grados de gradiente (220 cortes y 50 muestras por imagen) y 1075 polígonos y 5 grados de gradiente (220 cortes y 50 muestras por imagen).	55
Figura 4.21	Vista principal de software de reconstrucción tridimensional.	57
Figura 4.22	Interfaz gráfica tras haber cargado las imágenes de trabajo.	57
Figura 4.23	Etapas de reconstrucción con la interfaz gráfica:	60
Figura 4.24	Vista de interfaz gráfica al emplear la caracterización de la reconstrucción tridimensional.	61
Figura 4.25	Imagen de luminiscencia en VC++.	61
Figura Re-1	Descarga eléctrica en configuración punta-plano tomada con cámara analógica, utilizando tarjeta de adquisición de video.	63
Figura Re-2	Descarga eléctrica en electrodo punta-plano con una separación de 5 mm, utilizando una cámara digital.	64
Figura Re-3	Reconstrucción de descarga eléctrica en electrodo punta-plano con una separación de 5 mm, utilizando una cámara digital.	64
Figura Re-4	Streamer en electrodo punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámara digital.	65
Figura Re-5	Toma de imágenes con cámara donde no se capta el streamer.	65
	a) luminiscencia en geometría de electrodos punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámara digital.	65
	b) reflejo capturado microsegundos después de la ocurrencia del fenómeno.	65
Figura Re-6	Reconstrucción de un streamer utilizando la misma imagen para la vista.	66
Figura Re-7	a) luminiscencia en geometría de electrodos punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámara digital y arreglo de espejos.	66
	b) streamer capturado en el electrodo y en la reflexión del espejo inferior.	66
Figura Re-8	a) y b) luminiscencia en vistas concurrentes en geometría de electrodos punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámaras analógicas.	67
Figura Re-9	Ecualización de histograma aplicado a la descarga.	67
Figura Re-10.	Reconstrucción de una luminiscencia.	68
Figura Re-11	Descarga eléctrica en vistas concurrentes en geometría de electrodos plano-plano con separación de 5 mm, utilizando cámaras analógicas: a) vista lateral; b) vista superior.	68
Figura Re-12	Reconstrucción tridimensional de canal a partir de las vistas concurrentes.	68
Figura Re-11.	Muestreo m par y cortes k par.	69
Figura Re-12	Muestreo m par y cortes k impar.	70
Figura Re-13	Muestreo m impar y cortes k impar.	70
Figura Re-14	Muestreo m impar y cortes k par.	71
Figura Re-15	Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.	72
Figura Re-16	Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.	73
Figura Anx-1.	Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.	82
Figura Anx-2	Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.	83
Figura Anx-3.	Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.	84
Figura Anx-4.	Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.	85

<i>Figura Anx-6.</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>86</i>
<i>Figura Anx-5</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>87</i>
<i>Figura Anx-6</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>88</i>
<i>Figura Anx-7</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>89</i>
<i>Figura Anx-8</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>90</i>
<i>Figura Anx-9</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>91</i>
<i>Figura Anx-10</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>92</i>
<i>Figura Anx-11</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.</i>	<i>93</i>
<i>Figura Anx-12</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.</i>	<i>94</i>
<i>Figura Anx-13</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.</i>	<i>94</i>
<i>Figura Anx-14</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.</i>	<i>95</i>
<i>Figura Anx-15</i>	<i>Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.</i>	<i>95</i>

1

Introducción

El estudio de las propiedades eléctricas en los gases se originó a comienzos del siglo XIX con más dificultad en comparación a los estudios en sólidos y líquidos, puesto que se tenía que disponer de máquinas eléctricas que suministraran de forma continua una diferencia de potencial, hacer mediciones de corriente y presión en el gas. No obstante, en los gases se encontraron efectos visuales que explican el interés de su estudio.

La condición que implica el paso de una corriente a través de un gas se conoce como fenómeno de *descarga* o *ruptura eléctrica*: básicamente va de un comportamiento no conductor (baja corriente) a conductor.

La complejidad del fenómeno de descarga se debe a muchos factores, puesto que no sólo está implicado el gas, sino también la presión, los electrodos, su geometría y composición, además de las magnitudes eléctricas como son la diferencia de potencial y la corriente. Al día de hoy, no se tiene como tal un modelo teórico exacto que describa la propagación de la descarga. Por ejemplo, en muchos de los trabajos reportados en literatura sobre este tema estudian un tipo de descarga en condiciones muy específicas, después analizan los resultados y proponen un modelo el cual se aproxima al comportamiento de propagación. Hasta la fecha en que se escribe este documento, todos estos estudios parten de técnicas de fotografía clásica y ultrarrápida, video, e incluso deformaciones o daños a materiales. Pero en todos los casos siempre se trabajó con una proyección o dos de la descarga, esto es, usando información bidimensional.

El propósito de la presente tesis es establecer una nueva forma de caracterizar a la descarga eléctrica haciendo uso de las herramientas matemáticas y computacionales necesarias, de tal manera que esta se estudie a en un entorno más real, esto es, tridimensionalmente. Para ello se desarrolló un sistema capaz de reconstruir y analizar tres tipos de descargas eléctricas: la llamada corona, la luminiscente y la de canal.

El trabajo con reconstrucciones tridimensionales nace en el área de la medicina, de la necesidad de obtener mayor información de los órganos y con ello hacer prescripciones

más exactas sobre daños, enfermedades y malformaciones. Antes de esto los diagnósticos médicos se hacían con la información obtenida de las placas de rayos X es decir información bidimensional. A medida que se fueron popularizando las reconstrucciones tridimensionales y se vieron sus alcances potenciales, se empezó a trabajar intensamente en ello, desarrollando algoritmos más eficientes de reconstrucción tridimensional y tomógrafos más avanzados. Ese *bum* trajo como consecuencia que otras ciencias tomaran los principios de reconstrucción y las aplicaran a sus campos de estudio para obtener todos sus beneficios en áreas tan diversas como la biología, geología, astronomía, química, diseño gráfico, etc. No obstante, una ciencia que se ha mantenido distante de hacer estudios a partir de reconstrucciones tridimensionales es la física relacionada con las descargas eléctricas. Esto pudiera ser a causa de que el fenómeno de la descarga por si mismo ya es muy complicado de estudiar debido al carácter no estacionario, aleatorio y tortuoso de la trayectoria de propagación.



Figura 1.1 Descarga eléctrica en un medio controlado.¹

Como se mencionó, el presente proyecto se centra en la caracterización de descargas eléctricas a partir de sus reconstrucciones tridimensionales, esto como consecuencia de la necesidad de trabajar en ambientes más naturales. Para realizarlo se tuvieron que resolver los siguientes aspectos:

- Generar los tipos de descargas a estudiar
- Obtener las reconstrucciones tridimensionales
- Optimizar la reconstrucción 3D
- Caracterizar las reconstrucciones

¹ Ute Ebert, Wim van Saarloos and Christiane Caroli, "Streamer Propagation as a Pattern Formation Problem: Planar Fronts", *Physical Review Letters*, pp. 4178-4181, Vol. 77, No. 20, November 1996.

Por lo que para este trabajo se desarrolló una herramienta de software capaz de cumplir con los siguientes objetivos:

- Reconstruir tridimensionalmente descargas eléctricas
- Optimizar las reconstrucciones de manera que los recursos de procesador y memoria sean usados eficientemente
- Obtener la dimensión fractal de las reconstrucciones 3D
- Obtener estadísticas que describan el comportamiento del radio y centro de masa de la descarga
- Graficar el esqueleto de la descarga en 3D

1.1 Organización de la tesis

La tesis está organizada como sigue: El capítulo 1 proporciona la introducción. El capítulo 2 contiene el estado del arte. El capítulo 3 da los fundamentos teóricos de cada uno de los elementos utilizados para la solución del problema, además de los fundamentos básicos para la generación de la descarga. En el capítulo 4 se muestra la propuesta de solución, la metodología usada, el desarrollo experimental y el software desarrollado. El capítulo 5 incluye los resultados y una discusión de los mismos. El capítulo 6 contiene las perspectivas y conclusiones. El anexo 1 tiene más resultados, y los apéndices proporcionan información extra necesaria para el desarrollo integral del trabajo. Finalmente se anexa el artículo publicado en el congreso internacional “Proc. of the 9th WSEAS Int. Conf. On Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering”, Arcachon-Francia.

2

Estado del arte

Con base en los objetivos planteados para este proyecto, se buscaron referencias que proporcionarían las bases teóricas para el trabajo, además de un panorama general de los distintos estudios realizados a descargas eléctricas, como también trabajos con descargas relacionados con la dimensión fractal, asimismo, se buscaron referencias relacionadas con reconstrucciones tridimensionales, y tomando extractos de dichos trabajos formaron parte de la propuesta solución, para resolver el problema planteado.

Primeramente se revisarán referencias relacionadas con las descargas eléctricas, es de interés conocer el arreglo eléctrico experimental, el tipo de descarga y la caracterización. A continuación se enuncian algunas de las más relevantes.

En [1] Batina estudió una propiedad de las descargas eléctricas llamada “corona” que es característica de la descarga provocada en la geometría de electrodos punta-plano. A una configuración experimental típica la colocó dentro de un reactor cilíndrico llenado con aire ambiente. Mediante una buena fuente de luz y una cámara ccd, lentamente introdujo humo dentro del reactor cilíndrico y dejó que el humo se estabilizara, poco a poco aumentó el voltaje, al comenzar la descarga observó el campo eléctrico alrededor de ésta (gracias al humo) midió los tiempos, propuso un modelo matemático y lo llevó a simulación. El artículo, además de proporcionarnos una propiedad de la descarga (corona) de la cual también se podría obtener su reconstrucción tridimensional, muestra la necesidad de caracterizar las descargas en un espacio más natural. Para poder obtener más información sobre ellos, en este artículo recurrieron al humo para poder tener mejor representación del campo eléctrico.

En [2] Watson es uno de los primeros en analizar imágenes de descargas eléctricas por medio del procesamiento de imágenes. Él utilizó un arreglo experimental en el cual la descarga eléctrica era provocada por impulsos ya sea negativo o positivo usando una geometría de electrodos baston-plano, y como dieléctrico aire. Con el procesamiento digital de imágenes desarrolló un algoritmo para estudiar la longitud y número de segmentos en la

descarga, las imágenes las obtuvo con una cámara de video y de ahí las llevó al sistema de procesamiento de imágenes.

La contribución de este artículo a la investigación es mostrar los pasos para obtener los parámetros de longitud y número de segmentos, los cuales fueron la esqueletización de la imagen en 2D y el método de selección de un umbral de cambio de ángulo entre segmentos.

En [3] Watson tiempo después estudió la descarga eléctrica con geometría de electrodos punta-plano, y como dieléctrico utilizó aire frío y caliente. A la vez introdujo otro parámetro para estudiar, que es el número de divisiones de la descarga e hizo una explicación detallada de por qué estudiar la descarga en aire caliente. Finalmente comparó los parámetros obtenidos de la descarga en aire caliente contra los fríos, todos ellos analizados en distancias de electrodos y voltajes distintos.

En [4] Saitoh hace un estudio de una descarga en una geometría bastón-plano con un dieléctrico N_2/SF_6 que es una mezcla utilizada comúnmente en transformadores, hace un análisis de distancia y volumen a partir de imágenes en 2D. Este artículo aporta a la investigación su propuesta de arreglo experimental, puesto que utiliza un disparador para la cámara (ccd) y un flash, además el experimento está construido dentro de un contenedor para que éste pueda almacenar gas.

En [5] Katsuki estudió canales ionizados paralelamente en geometría de electrodos alambre-plano, estudió las características eléctricas y su desarrollo temporal a lo largo del canal de ionizado. Esto fue gracias a que él usó una cámara de alta velocidad, con esta pudo analizar el comportamiento de la descarga cuando modificaba los voltajes y polaridades. La aportación de este artículo a la investigación, al igual que el anterior, es la propuesta del modelo experimental, puesto que introduce el uso de un disparador de eventos (trigger), un detector de corriente de inicio de rayo para disparar la cámara fotográfica de alta velocidad, además de proveer las características mínimas que debe tener esta cámara.

En [6] Tardiveau estudió otra propiedad de la descarga eléctrica, se preguntó cuál es el efecto de un “streamer” sobre otros “streamers” que se generan en la misma punta. Para provocar ese efecto modificó la forma simple de aterrizar a tierra, colocándolo al electrodo plano siete aterrizajes en distintos lugares. Para estudiar el fenómeno ocupó una cámara normal y una cámara de alta velocidad. La aportación de este artículo es el arreglo experimental de las cámaras fotográficas, la forma de disparar las cámaras no se había visto en ninguno de los artículos revisados. Se generaron en serie dos descargas, donde la primera era de tamaño pequeño y la siguiente era la descarga a estudiar, entonces cuando ocurría la primera descarga con un detector de la misma se mandaba a disparar a las cámaras que fotografiaban a la descarga principal, para ello se utilizaban circuitos de retardo y *triggers*.

En [7] Yañez estudió descargas eléctricas en una configuración punta-plano, con la que obtuvo parámetros de dimensión fractal para variaciones de distancia, voltaje, impulso y polaridad, todo en 2D con una cámara de video cuyas imágenes se procesan en la computadora. Él hace una explicación detallada de aspectos sobre la implementación del arreglo eléctrico, por ejemplo: la fuente de alto voltaje, distancia entre electrodos, material

de electrodos, la geometría de la punta del electrodo, el aterrizaje a tierra y tiempo de generación de la descarga.

La aportación de este trabajo es introducir a la implementación del arreglo eléctrico, los detalles que hay que tener en cuenta, puesto que, se utiliza la misma configuración de electrodos.

Trabajos relacionados con la reconstrucción tridimensional

La reconstrucción tridimensional es el proceso de generar un modelo (normalmente 3D) que representa a un objeto de la vida real, haciendo uso de información obtenida del mismo, generalmente esta información se presenta a través de proyecciones (2D) que se han tomado del objeto, a través de algún medio electrónico y/o mecánico. A continuación enunciamos algunas referencias donde se trabajó con reconstrucciones tridimensionales, estas fundamentan teóricamente y sientan precedentes para el desarrollo de la tesis.

En [8] Fausto muestra un algoritmo que, dado un conjunto de puntos que representan un objeto tridimensional, reconstruye la superficie del objeto usando mallas triangulares, haciendo uso de una esfera que pivotea alrededor de él. Fausto habla del desempeño del algoritmo contra otros propuestos, resultando que el algoritmo es más eficiente y conceptualmente sencillo de entender, pero el algoritmo puede llegar a tener problemas en concavidades. El artículo robustece el conocimiento que se tiene en algoritmos de reconstrucción de superficie 3D, ampliando así el panorama de posibles soluciones.

En [9][10] Delingette desarrolla un algoritmo para hacer reconstrucciones de superficie automáticas, basándose en la teoría de modelos deformables, específicamente en uno que él había desarrollado con anterioridad denominado *reconstrucción general con mallas simplex*, donde a manera contraria de las triangulaciones, su algoritmo está basado en la posición relativa de un vértice con respecto a sus vecinos en términos de un ángulo simple y parámetros métricos. Las mallas simplex son el dual topológico de las triangulaciones y tienen la ventaja de que permiten deformaciones "suaves", de manera simple y eficiente. Este algoritmo permite el manejo de superficies sin ninguna restricción en su forma o topología.

Estas son las características que hicieron interesante al método para su aplicación en este proyecto, puesto que el fenómeno que se reconstruye (el arco eléctrico) es un plasma, en donde no se puede pronosticar las características de su forma ni la textura de su superficie.

En [11] Risto reporta por primera vez en literatura la reconstrucción tridimensional de una descarga eléctrica, él trabajó en una geometría de electrodos plano-plano. La reconstrucción la logra utilizando técnicas de procesamiento de imágenes, y con ello probó que es posible reconstruir este fenómeno autolumínico. Este trabajo es del cual se parte para la realización de esta tesis, de él se retoma el algoritmo para la reconstrucción volumétrica y el arreglo experimental utilizado para un tipo de descarga. Sin embargo, otros métodos utilizados ahí se cambiaron para obtener mejores resultados, sin olvidar que además en este proyecto se puede trabajar con otras configuraciones de electrodos y hacer un análisis de la reconstrucción.

En [12] Wolfgang explica que para hacer una reconstrucción 3D existen arreglos experimentales que utilizan dos o más cámaras usando distribuciones equidistantes (que fue el caso para el proyecto), existen problemas a los que conlleva usar ese tipo de arreglo en objetos de forma arbitraria. Él propone tener puntos de visión del objeto en distintas distancias y grados, con ello no tener esos errores.

Así mismo, propone un algoritmo que permite evitar pérdidas haciendo uso de una mesa giratoria y con ello obtener varios puntos de visión.

Este artículo, ayuda a tener claro cuales son los errores clásicos al hacer una reconstrucción, y explica como es que se resuelven estos problemas habitualmente.

En [13] Shahrokni muestra un algoritmo de esqueletización o adelgazamiento, tarea que se utiliza comúnmente en el área de procesamiento de imágenes por ejemplo en compresión, cuantificación, generación de caminos, navegación de objetos, generación de animación. De un esqueleto se desearía obtener las siguientes características: centro con respecto a los límites del objeto, preservar la estructura del objeto original, conservar conectividad, capacidad de reconstruir el objeto. El artículo muestra un algoritmo eficiente de esqueletización en 3D utilizando una técnica de división en *clusters*. Un algoritmo similar se implementó puesto que entre los objetivos de este proyecto se contempló un análisis del canal de la descarga, esto es, del esqueleto se puede obtener el centro de manera local y con ello obtener el radio del canal.

Trabajos sobre las propiedades fractales en descargas

Una parte importante en este proyecto fue hacer un análisis de las propiedades fractales de la descarga eléctrica, esto no es algo nuevo, desde 1984 se empieza a estudiar la naturaleza fractal de la descarga, pero siempre esos estudios se hacen en base a una imagen en 2D o en 3D haciendo uso de simulaciones, este proyecto hizo el estudio fractal en 3D en base a una reconstrucción tridimensional, por lo que los artículos siguientes sirvieron de base teórica.

En [14] Niemeyer es el primero que habla de la dimensión fractal de la descarga eléctrica. En su trabajo calcula la dimensión fractal usando el número de brincos a una distancia r del centro, propone un modelo estocástico para simular la descarga eléctrica, y propone una fórmula de expansión de la descarga con base al campo eléctrico local.

En [15] Ioana estudia cómo varía la dimensión fractal en 2D en una geometría rectangular-plano y circular-plano. También hace la simulación de la propagación de una descarga en 3D, para simular parte de un modelo matemático conocido, y con la imagen de la simulación obtiene la dimensión fractal.

La contribución de su artículo es tener un antecedente del comportamiento de la dimensión fractal, según la variación de parámetros que modifican el fenómeno. Además muestra antecedentes de que se ha intentado obtener la dimensión fractal en 3D aunque no sea por un medio experimental.

En [16] Ehara obtiene la dimensión fractal de una descarga provocada en una geometría punta-plano y, usando como dieléctrico el polymethylmethacrilato, propone un método experimental parecido al de Watson [3], y ocupa el método de *box-counting* para obtener la

dimensión fractal. Lo interesante es que la descarga la generan con corriente alterna (AC) en 20 fases distintas y muestran que las dimensiones fractales pueden variar dependiendo de la fase. Pueden llegar a ser muy diferentes incluso estando en la misma polaridad.

El artículo proporciona una metodología para obtener las imágenes, incluyendo el tipo de filtro para ocupar en la cámara ccd, y se muestra otra vez la importancia de la dimensión fractal en este estudio 2D.

En [17] Reginald obtuvo la dimensión fractal de manera teórica, para las descargas de tipo filamento que son las usadas en las lámparas neón. Para desarrollarla unió la teoría de procesos de ramificación aleatoria con la teoría de dimensión fractal.

La aportación de su artículo es explicar en que obteniendo esta dimensión se pueden entender mejor el proceso de descarga, la ionización primaria y la ionización secundaria.

En [18] Petit expone otra propiedad de las descargas eléctricas; estudia la descarga en AC en sus dos fases principales, positiva y negativa, con una barrera dieléctrica en una geometría punta-plano. Hace el experimento con una cámara ultrarrápida, aísla imágenes para las fases positiva y negativa y muestra que las imágenes que se pueden percibir en AC son la composición de las que obtuvieron de manera aislada.

Estas referencias dan los antecedentes, bases teóricas y experimentales para el desarrollo de esta tesis, se sabe que esta se centra en la necesidad de mostrar y caracterizar un modelo tridimensional del canal de la descarga eléctrica sin que fuera éste producto de una simulación, esto es, se trabaja con descargas reales, para ello se adoptaron algunos arreglos experimentales, se usaron técnicas de reconstrucción propuestas y en composición se desarrolló una herramienta con la cual no se ha trabajado en la investigación de procesos de descarga eléctrica.

3

Fundamentos teóricos

En este capítulo se darán las bases teóricas de las técnicas empleadas para poder reconstruir y caracterizar a las descargas eléctricas. Además se proporcionan los fundamentos que explican el proceso de generación de la descarga eléctrica en gases y sus distintas regiones de funcionamiento.

Para realizar la reconstrucción 3D, se requiere de un procesamiento de las imágenes capturadas. Este procesamiento tiene como objetivo el eliminar de las imágenes toda información que no pertenezca al objeto que se quiere reconstruir. Posteriormente hablaremos del malleo y la caracterización de la reconstrucción.

Una vez que se tienen imágenes de la descarga se deben implementar los algoritmos necesarios para poder separar de la imagen de trabajo, la zona donde se presenta el fenómeno y así tener la información necesaria y suficiente para poder llevar a cabo la reconstrucción tridimensional. La implementación del procesamiento de imágenes se divide en cuatro etapas: pre-procesamiento, segmentación, realce, y reconstrucción tridimensional.

3.1 Procesamiento digital de imágenes

3.1.1 Pre-procesamiento o acondicionado de la imagen

Muchas veces, durante el proceso de adquisición, las imágenes obtenidas vienen acompañadas de algún tipo de ruido que pudiera ocasionar que el desempeño del sistema se viera afectado. El ruido puede provenir de fuentes tan diversas como:

- a) La óptica y electrónica asociadas al sistema de adquisición

- b) Las condiciones de iluminación
- c) Las sombras creadas entre objetos
- d) Las condiciones atmosféricas

Se vuelve necesario procesar la imagen proveniente del módulo de adquisición, tratando de reducir en lo posible la influencia del ruido utilizando técnicas de filtrado.

El objetivo de dichas técnicas consiste en reducir o eliminar, en el mejor de los casos, el ruido presente en una imagen. Debido a que el proceso de modelado del ruido es muy complicado, el mejor resultado es una reducción del ruido presente en la imagen.

El filtrado de una imagen se puede llevar a cabo tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio espacial. En el primer caso, se calcula la transformada de Fourier de la imagen que será filtrada. El resultado es enseguida multiplicado (en el dominio de la frecuencia) por una función de transferencia de filtrado adecuada. Finalmente, al producto obtenido le es calculada la transformada inversa de Fourier para obtener la imagen mejorada deseada.

En el segundo caso se trabaja en el dominio de los píxeles, se cambia el valor de uno de ellos tomando en cuenta su valor y el de algunos de sus vecinos.

Para mayor información y fundamentos teóricos consulte González [20].

3.1.2 Conversión a grises

La mayoría de los modelos de color utilizados actualmente están orientados, bien hacia el hardware (monitores de color, impresoras), o bien hacia aplicaciones donde el objetivo es una manipulación del color (por ejemplo la creación de gráficos de color para animación). El modelo de color de interés para este proyecto es el RGB, para este la imagen se descompone en tres matrices, cada una de ellas contiene los valores de los componentes en rojo “*R*”, verde “*G*” y azul “*B*” de cada pixel. Con la siguiente ecuación se puede llevar a la imagen en color a tonos de gris.

$$Y = 0.3 R + 0.59 G + 0.11 B \quad (\text{ec. 3.1})$$

Siendo *Y* la matriz que contiene la imagen en tonos de gris $p \in [0 \dots 255]$, $\forall p \in Y$. Donde *p* es el valor del píxel dentro de la matriz.

3.1.3 Operaciones morfológicas sobre imágenes

La morfología matemática es una rama del tratamiento digital no lineal de imágenes que se concentra básicamente en la estructura de las imágenes. Su base matemática viene de la teoría de operaciones entre conjuntos, desarrollada por Minkowski. [21]

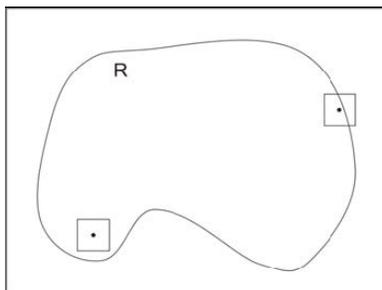


Figura 3.1 Un elemento estructural encajando en una posición y no encajando en otra. ^{II}

La idea básica de la morfología matemática consiste en probar una imagen, por medio de un probador llamado *elemento estructurante* y así calificar la manera en que este elemento encaja o no en dicha imagen. En la figura 3.1 se observa una imagen y un elemento estructurante cuadrado (el probador). El elemento estructurante es posicionado en lugares diferentes, en este caso dos y encaja una posición, en la otra no. Al marcar las posiciones en las cuales el elemento estructurante encaja en la imagen (objeto) uno es capaz de derivar información relacionada con la estructura relativa a la imagen y al objeto. Esta información depende tanto del tamaño del elemento estructurante como de su forma.

Todos los métodos morfológicos dependen del concepto de encajar el elemento estructurante. Existen dos operaciones de base, la erosión y la dilatación. A partir de éstas se derivan las demás operaciones.

Definiciones básicas de morfología matemática

Definición 3.1 Sean A y B dos conjuntos en Z^2 , la **erosión** de A por B denotada como $A \ominus B$, se define como:

$$A \ominus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (\text{ec. 3.2})$$

En otras palabras, la erosión de A por B es el conjunto de todos los puntos x tal que B trasladada por x está contenida en A .

En la figura 3.2(a) se muestra una imagen binaria, en la figura 3.2 (b) y (c) dos elementos estructurales diferentes. En 3.2 (d) y (e) las erosiones respectivas de (a).

^{II} J. Humberto Sossa Azuela, visión por computador, CIC I.P.N.

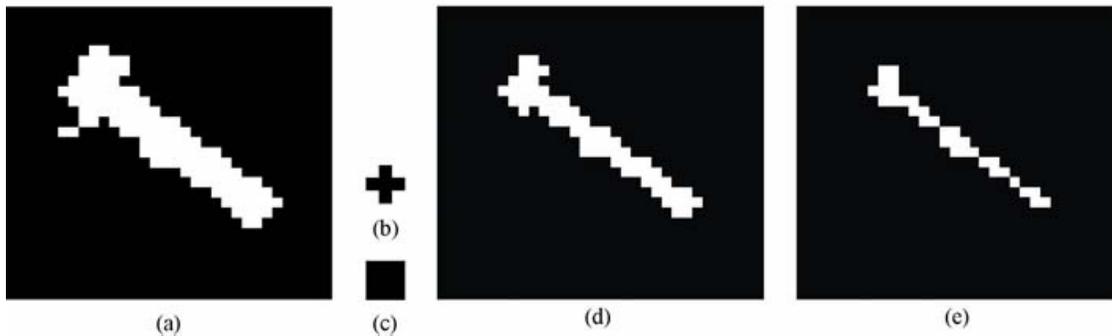


Figura 3.2 (a) Una imagen sencilla. (b) y (c) Dos elementos estructurales diferentes. (d) y (e) Erosiones respectivas de (a).^{III}

Definición 3.2 Sean A y B dos conjuntos en Z^2 , la **dilatación** de A por B , denotada como $A \oplus B$ se define como:

$$A \oplus B = \{x | \hat{B}_x \cap A \neq \emptyset\} \quad (\text{ec. 3.3})$$

En otras palabras, el proceso de dilatación consiste en obtener la reflexión del elemento estructurante B alrededor de su origen y después pasar esta reflexión por x . $A \oplus B$ es entonces el conjunto de todos los desplazamientos en x tales que \hat{B} y A compartan al menos un elemento no igual a cero.

En la figura 3.3 (a) se muestra un conjunto simple, en las figuras 3.3 (b)-(c) dos elementos estructurales diferentes. En las figuras 3.3 (d)-(e) las dilataciones correspondientes.

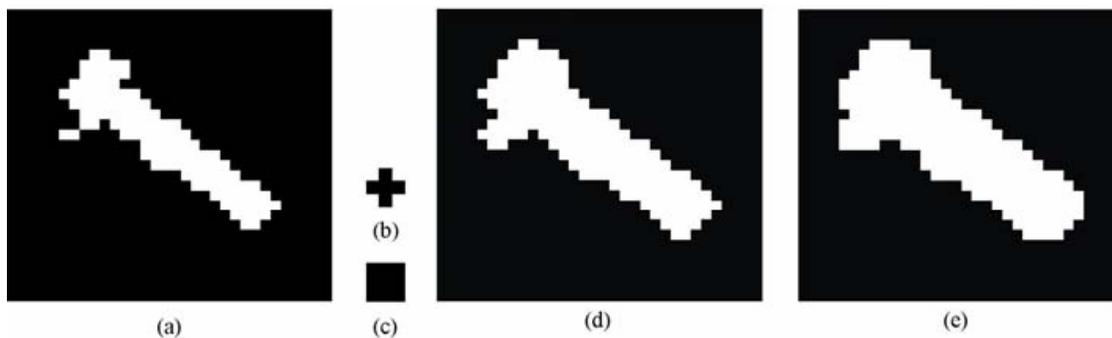


Figura 3.3 (a) Una imagen sencilla. (b) y (c) dos elementos estructurales diferentes. (d) y (e) Dilataciones respectivas de (a).^{IV}

^{III, IV} J. Humberto Sossa Azuela, visión por computador, CIC I.P.N.

Operaciones combinadas: apertura y cerradura

Como ya se dijo anteriormente, una dilatación expande una imagen u objeto y una erosión la reduce. Existen dos operaciones derivadas de la dilatación y la erosión: la apertura y la cerradura.

Apertura: en general alisa (suaviza) el contorno de un objeto, rompe uniones pequeñas entre objetos, eliminando, a la vez, pequeñas protuberancias y pequeñas componentes ruidosas.

Cerradura: también tiende a suavizar porciones del contorno pero a diferencia de la apertura, la cerradura tiende a eliminar pequeños agujeros en el objeto, fusionar pequeños rompimientos y a rellenar pequeñas entradas al objeto.

3.1.4 Segmentación

La segmentación de imágenes puede ser definida como el proceso de subdividir o partir una imagen en sus regiones, componentes, partes u objetos. La idea básica consiste en aislar dentro de la imagen los diferentes objetos que se reconocerán, para este caso aislar la descarga eléctrica.

Una manera formal de definir el proceso de segmentación es la siguiente: la segmentación es el proceso de particionar una imagen $f(x,y)$ en regiones de píxeles, R_1, R_2, \dots, R_n tal que cada una de estas sub-imágenes represente un objeto o una parte del mismo. La segmentación es, pues, el proceso que consiste en agrupar píxeles en regiones, tales que:

$$\bigcup_{i=1}^n R_i \subseteq f(x,y) \quad R_i, i = 1, 2, \dots, n \text{ están conectadas}$$

$$R_i \cap R_j = \emptyset, \forall i, j \mid i \neq j$$

$$P(R_i) = \text{verdadero}, i = 1, 2, \dots, n$$

Cada R_i satisface un predicado o conjunto de propiedades.

$$P(R_i \cup R_j) = \text{Falso para } i \neq j.$$

Esto significa que píxeles que pertenecen a regiones adyacentes al ser tomadas como una sola no satisfacen el predicado. Si no es el caso, entonces, deberán ser consideradas como una sola región.

La segmentación automática de imágenes es, en general, una de las tareas más difíciles de realizar en análisis de imágenes, sobre todo en entornos abiertos, en este caso el espacio

donde ocurre la descarga esta bajo condiciones controladas; es decir, se puede controlar la iluminación, el fondo y la posición de las cámaras.

3.1.5 Técnicas basadas en umbral

Históricamente estas técnicas fueron las primeras usadas en análisis de imágenes para segmentar una imagen. La idea básica consiste en convertir una imagen en niveles de gris $f(x,y)$ en una imagen binaria $b(x,y)$ buscando que los objetos de interés de la imagen queden separados del fondo.

Para que estos métodos sean efectivos se requiere que los objetos de interés presenten suficiente contraste con respecto al fondo y que se conozca el rango de intensidad ya sea de los objetos o el fondo. Si se supone que el objeto que se segmentará es más claro que el fondo, entonces:

$$b(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{si } f(x,y) \geq \text{umbral} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (\text{ec. 3.4})$$

3.1.6 Filtro para imágenes en color

Los filtros basados en umbral pueden ser usados también en imágenes en color persiguiendo la misma finalidad de aislar la región de interés en base a tonalidades de color. Específicamente para el sistema RGB el filtro $fc(I)$ se define como:

$$fc(I) = \{p \in I \text{ SI } \partial_{R-} \leq R(p) \leq \partial_{R+} \text{ y} \\ \partial_{G-} \leq G(p) \leq \partial_{G+} \text{ y} \\ \partial_{B-} \leq B(p) \leq \partial_{B+}\} \quad (\text{ec. 3.5})$$

donde $R(p), G(p), B(p)$ son los valores de las componentes de color rojo, verde y azul, respectivamente, del píxel p . $R(p), G(p), B(p) \in [0,255]$ p cualquier píxel de la imagen y $\partial_{R-}, \partial_{R+}, \partial_{G-}, \partial_{G+}, \partial_{B-}, \partial_{B+}$ umbrales mínimos y máximos para cada banda de color, los cuales permitirían delimitar específicamente la descarga eléctrica, se cumple que $\partial_{R-} \leq \partial_{R+}, \partial_{G-} \leq \partial_{G+}, \partial_{B-} \leq \partial_{B+}$.

Para mayor fundamento teórico sobre pre-procesamiento de imágenes y segmentación consulte Sossa [21].

3.2 Reconstrucción tridimensional

Para explicar este principio, se tiene que un cuerpo convexo k , que tiene una masa de densidad variable, dada por una función $f(x,y,z)$. Pensemos ahora, que k es atravesado por una radiación cualquiera (rayos X, láser, luz), cuya trayectoria sea una recta S , y de la cual se pueda medir su intensidad de entrada y de salida. La diferencia entre estas

intensidades será la absorción del rayo por la materia en el interior de k y dependerá de la recta S por donde el rayo transita. Es posible medir experimentalmente esta función de S que llamaremos $F(S)$. El matemático alemán J. Radon encontró una manera de calcular $f(x,y,z)$ a partir de $F(G)$, conocida como la "transformada de Radon".

Cormack y Hounsfield (1972) tuvieron que resolver algunos problemas a partir de los resultados teóricos de Radon. Por ejemplo: Radon afirma que se puede conocer $f(x,y,z)$ si se conoce $F(S)$ para "todas" las rectas S . En la práctica solamente se puede tener en cuenta un número finito de rectas (que puede ser cuantioso). Esto lleva a analizar lo que ocurre cuando solamente se conoce $F(S)$ para ese número finito de rectas y la mejor manera de escoger las mismas. Teóricamente se demuestra que con un número finito de rectas nunca se podrá reconstruir "exactamente" el interior del cuerpo, pero tomando un conjunto adecuado y suficiente de rectas se logra reconstruir una aproximación de la imagen que es bastante confiable.

El procedimiento práctico consiste en dividir k en secciones planas y resolver el problema sección por sección, para después integrarlas a todo el cuerpo k (vease figura 3.4).

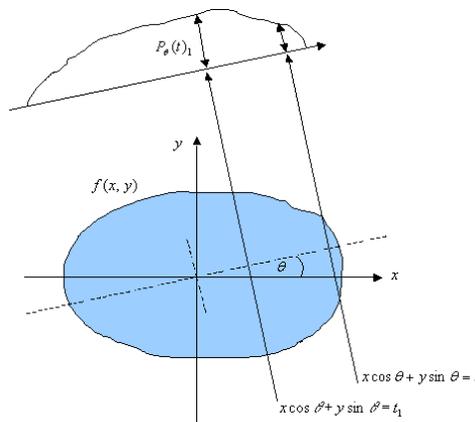


Figura 3.4 Proyección P_θ de un objeto.^V

La proyección está relacionada con la distribución local de la atenuación $f(x,y)$ de acuerdo con la siguiente ecuación

$$g(s, \theta) = R(f(x, y)) \quad (\text{ec. 3.6})$$

Donde R se denomina la transformada de Radon y representa la integral de $f(x,y)$, a lo largo de un rayo S que atraviesa al objeto en la dirección θ .

^V S. Hasino, "Three-Dimensional Reconstruction of Fire from Images", Master Thesis, University of Toronto.

Para resolver el problema de hallar $f(x,y)$ a partir de $g(s,\theta)$ existen diferentes métodos que permiten encontrar la imagen original para resolver la ecuación, estos se pueden clasificar en:

- Métodos iterativos, en los que se estima un valor y por iteraciones sucesivas se va aproximando al objeto a reconstruir.
- Métodos analíticos, por ejemplo el *backprojection*, en este caso la imagen se obtiene como la suma de todas las contribuciones para cada ángulo de corte. Para eliminar los ruidos introducidos por el aparato, se filtra la imagen en forma digital.

Más información y fundamento teórico sobre la reconstrucción tomográfica, lo encontramos en [19].

3.3 Reconstrucción de superficie por mallas

Como se planteó anteriormente, después de hacer la reconstrucción tridimensional necesariamente requerimos hacer una reconstrucción de la superficie del objeto, entre los métodos más utilizados para hacer la reconstrucción de imágenes volumétricas está el uso de mallas, no obstante, existen otros sistemas de reconstrucción de superficie basados en representaciones paramétricas, aunque presentan algunos problemas para reconstruir figuras complejas, puesto que parametrizar una figura es equivalente a proveer una función continua entre un espacio de parámetros Ω incrustado en el plano euclidiano \mathfrak{R}^2 y una superficie tridimensional.

Por el momento se entrará en más detalle con los sistemas basados en mallas, porque este proyecto trabaja con ellas. En general, de un sistema de reconstrucción basado en mallas se requieren los siguientes puntos:

- 1) Extrapolación de datos perdidos: En muchos casos, los conjuntos 3D no describen en su totalidad un objeto dado. Por lo tanto, es necesario manejar esos datos de información perdida, extrapolando la superficie.
- 2) Control de densidad de mallas: Cuando un conjunto de datos densos son provistos, normalmente se requiere, en especial para propósitos de visualización, reducir enormemente la cantidad de información almacenada en el modelo geométrico. Por el contrario, cuando se provee información muy dispersa, es necesario incrementar la densidad de la malla, refinando el modelo geométrico. Recordemos que aquí se está hablando de los aspectos de visualización de las mallas en general, y no de optimizar la cantidad de información con que se describe un modelo, y que es precisamente uno de los objetivos de las mallas simplex.
- 3) Control de calidad de mallas: muchos algoritmos de computación científica (mecánicos, análisis de flujo) requieren de la definición de elementos de alta calidad geométrica

definidos en las mallas. La calidad de la malla puede ser definida de varias formas. Por ejemplo, en modelos triangulados, la calidad geométrica puede ser medida usando el mínimo, la mediana y el promedio de los ángulos de los triángulos.

Son pocos los algoritmos existentes que buscan resolver el problema de "reconstrucción general" [9]. Por ejemplo, la reconstrucción por isosuperficies es una técnica usada comúnmente para reconstruir superficies a partir de imágenes volumétricas. Como sea, al no manejar datos perdidos o con ruido, no puede ser considerado como una técnica de reconstrucción general. Similarmente, la triangulación DeLaunay es usada ampliamente para la reconstrucción serial, o reconstrucción a partir de puntos desorganizados, pero no puede extrapolar puntos perdidos.

El modelado deformable se ajusta bien para la reconstrucción de objetos en general puesto que asume poco acerca de la silueta a recuperar y puede trabajar con datos perdidos o ruidosos. Existen varios marcos para modelos deformables, pero un acercamiento común consiste en la formalización de la deformación como un problema variacional que involucra una energía interna asegurando la continuidad geométrica del modelo y una energía externa que controla la precisión del acople. Muchos investigadores han propuesto sistemas de reconstrucción basados en modelos deformables. Como sea, son pocos los sistemas que enfocan el problema de reconstrucción general, incluyendo las cinco tareas antes mencionadas.

Un tópico clave para un sistema de reconstrucción en general es la selección de una representación "buena" de superficies. Más precisamente, tales representaciones deben ajustarse de manera adecuada para todas las superficies, independientemente de su geometría y topología.

Las mallas simplex se proponen como una representación de superficies usadas en un sistema de reconstrucción [10]. Las mallas simplex pueden representar superficies de todas las topologías, al igual que las mallas de triangulación. Aun más, la geometría de mallas simplex permite definir en cada vértice, cantidades geométricas discretas tales como el promedio de curvatura o vectores normales. Se han definido fuerzas de regularización en las mallas simplex permitiendo una continuidad geométrica de alto orden, de manera simple y eficiente. Además, operadores de topologías locales y globales se definen para refinar una malla simplex o cambiar su orden, de manera sencilla. Ya que las mallas simplex no son modelos paramétricos, no es necesario actualizar una matriz de rigidez o el mapeo de parametrización cuando se realizan transformaciones de topología.

3.4 Mallas simplex

A continuación se revisan las definiciones y propiedades de las mallas simplex. En caso de requerirse información más profunda de este tema, se invita que el lector revise la bibliografía relacionada [9][10].

Las definiciones de las mallas simplex y las mallas triangulares o "triangulaciones" están muy relacionadas. Más precisamente, sus grafos subyacentes son duales entre sí. Otra

importante propiedad de las mallas simplex es su conectividad de vértices constante. En esta sección sólo se introducen las propiedades topológicas de las mallas simplex. Primero, se da una definición general de las mallas k-simplex, inmersas en un espacio euclidiano \mathcal{R}^d de dimensión d . Luego, se consideran las mallas 1 y 2-simplex para \mathcal{R}^3 como representaciones de contornos y superficies.

Definiciones de células y mallas simplex

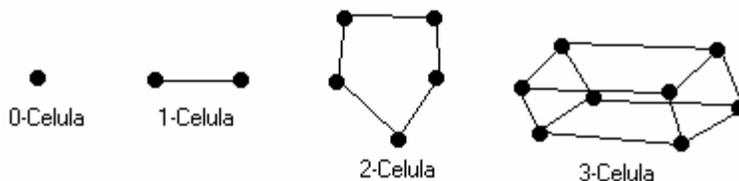


Figura 3.5 Ejemplos de p-células $0 \leq p \leq 3$.^{VI}

Definimos una malla k-simplex como una unión de p-células, $0 \leq p \leq k$. Debido a que estas células son mallas p-simplex, la definición de una célula es recurrente:

Definición 3.3 Definimos una 0-célula de \mathcal{R}^d como un punto P de \mathcal{R}^d y una 1-célula como un segmento de \mathcal{R}^d , por ejemplo, un par no ordenado de distintos vértices (P,M). Recursivamente definimos una p-célula C ($p \geq 2$) de \mathcal{R}^d como una unión de (p-1)-células tal que:

Cada vértice perteneciente a C pertenece a 'p' distintas (p-1)-células.

La intersección de dos (p-1)-células es vacío o es una (p-2)-células.

Una 2-célula, es por lo tanto, un conjunto de segmentos que tienen uno y solamente un vértice en común. Por lo tanto, es una línea poligonal cerrada en \mathcal{R}^d . Ejemplos de p-células se muestran en la figura 3.5. 0-células se llaman *vértices*, 1-células *segmentos* y 2-células *caras*.

Una malla simplex está definida simplemente como:

Definición 3.4 Una malla k-simplex M de \mathcal{R}^d es una (k+1)-célula de \mathcal{R}^d .

Una malla k-simplex es por lo tanto una unión de k-células que siguen las propiedades de la definición 3.3. Ejemplos de mallas 2-simplex se muestran en la figura 3.6.

^{VI} Hervé Delingette, "Simplex Meshes: a General Representation for 3D Shape Reconstruction", Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94).

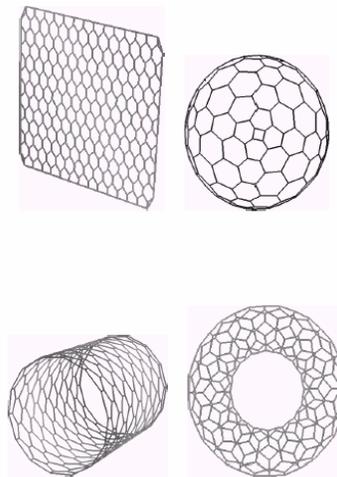


Figura 3.6 Cuatro mallas 2-simplex genéricas.^{VII}

Proposición 1. Una malla k-simplex es una malla (k+1)-conexa: cada vértice tiene (k+1) vértices vecinos.

La conectividad constante entre vértices implica una relación simplex entre el número de vértices y el número de segmentos. La tabla 3-1 resume la conectividad entre vértices, segmentos y caras, con las células de una malla k-simplex. Si una malla k-simplex es (k+1)-conexa, todas las mallas (k+1)-conexa no necesariamente son mallas simplex. Por ejemplo, una malla 3-conexa que tiene dos caras intersectadas por un segmento no puede ser una malla 2-simplex.

	Segmentos/Vértices	Caras/Vértices	Caras/Segmento
K=1	2	-	-
K=2	3	3	2

Tabla 3-1 Las relaciones de conectividad en una malla k-simplex

Escribimos el conjunto de n vértices de M como $V(M)$ y su función de conectividad como $N(M)$. Si P_i es un vértice de una malla k-simplex M entonces $(P_{N_0(i)}, P_{N_1(i)}, \dots, P_{N_k(i)})$ son sus (k+1) vecinos.

3.4.1 Dualidad con las triangulaciones

Es importante mencionar la naturaleza dual entre las mallas k-simplex y las k-triangulaciones. Se puede definir una transformación topológica que asocia una malla k-simplex a una k-triangulación. Esta transformación es mostrada en la figura 3.7 y considera de forma diferente los vértices y los segmentos localizados en el borde de la triangulación

^{VII} Hervé Delingette, "Simplex Meshes: a General Representation for 3D Shape Reconstruction", Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94).

de aquellos localizados “adentro”. Básicamente, esta transformación dual asocia una p-cara de una k-triangulación con una (k-p)-célula de una malla k-simplex.

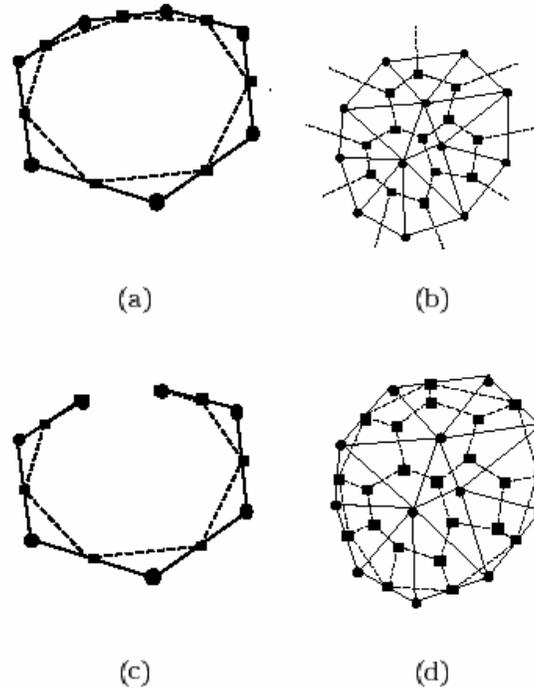


Figura 3.7 Dualidad entre k-triangulaciones ($k=1,2$) dibujadas con líneas continuas y círculos sólidos, y mallas k-simplex dibujadas con líneas intermitentes y cuadrados como vértices. a) y b) son triangulaciones sin fronteras, c) y d) triangulaciones con fronteras.^{VIII}

3.4.2 Geometría de las mallas simplex

En esta sección se presenta las principales relaciones geométricas que existen en una malla 2-simplex de \mathcal{R}^3 . Existen resultados similares para mallas 1-simplex de \mathcal{R}^3 (por ejemplo contornos tridimensionales). El principal resultado consiste en una ecuación simplex que da la posición de un vértice en relación a sus vecinos y algunas cantidades geométricas: el ángulo simplex y los parámetros métricos.

En una malla 2-simplex tridimensional $M \in \mathcal{R}^3$ como un vértice P_i está rodeado por sus tres vértices $(P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)})$. Estos tres puntos definen el plano tangencial a P_i cuyo vector normal n_i es:

^{VIII} Hervé Delingette, “General Object Reconstruction based on Simplex Meshes”, International Journal of Computer Vision, 32, 111-142 (1999) Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in The Netherlands.

$$n_i = \frac{P_{N1(i)} \wedge P_{N2(i)} + P_{N2(i)} \wedge P_{N3(i)} + P_{N3(i)} \wedge P_{N1(i)}}{\|P_{N1(i)} \wedge P_{N2(i)} + P_{N2(i)} \wedge P_{N3(i)} + P_{N3(i)} \wedge P_{N1(i)}\|} \quad (\text{ec. 3.7})$$

Siendo $P_{Nm(i)} \wedge P_{Nn(i)}$ el producto vectorial entre $P_{Nm(i)}$ y $P_{Nn(i)}$ con $n \neq m$, y $n, m \in \{1,2,3\}$

Introducimos el círculo S_1 de centro C_i y radio R_i circunscrito al triángulo $P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)}$. Introducimos también la esfera S_2 de centro O_i y radio R_i , circunscrita a los cuatro vértices $P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)}$.

El ángulo simplex $\alpha = \angle(P_i, P_{N1(i)}, P_{N2(i)})$ (un tipo de “ángulo promediado”) en p_i está definido por dos ecuaciones:

$$\alpha_i \in [-\Pi, \Pi]$$

$$\text{seno}(\alpha_i) = \frac{r_i}{R_i} \text{sign}((P_{N1(i)} - P_i) \cdot n_i) \quad (\text{ec. 3.8})$$

$$\text{coseno}(\alpha_i) = \frac{C_i - O_i}{R_i} \text{sign}((C_i - O_i) \cdot n_i) \quad (\text{ec. 3.9})$$

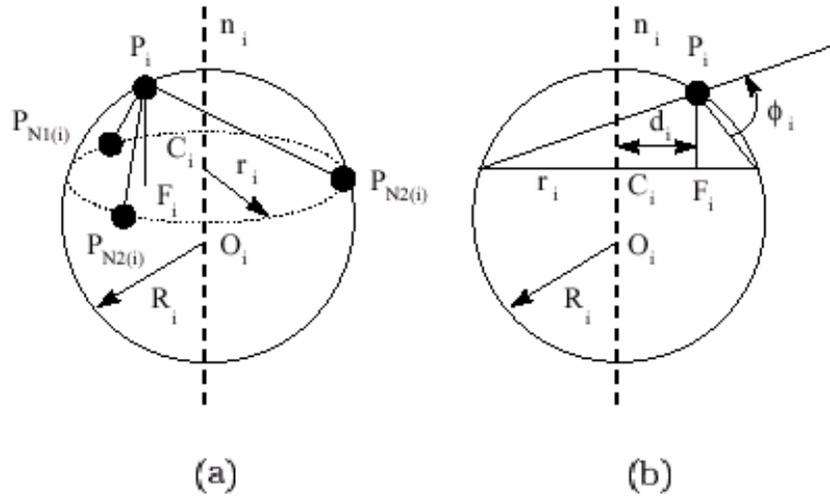


Figura 3.8 (a) La esfera circunscrita S_2 de radio R_i y el círculo circunscrito S_1 de radio R_i . b) Proyección de (a) en el plano (O_i, C_i, P_i) . El ángulo simplex puede ser interpretado como un ángulo de geometría planar.^{IX}

^{IX} Hervé Delingette, “General Object Reconstruction based on Simplex Meshes”, International Journal of Computer Vision, 32, 111-142 (1999) Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in The Netherlands.

El ángulo simplex tiene varias propiedades, en particular, hay una relación simple entre el ángulo simplex α_i y la curvatura $H_i = \frac{1}{R_i}$, también llamada la curvatura media en el vértice P_i :

$$H_i = \frac{\text{seno}(\alpha_i)}{r_i} \quad (\text{ec. 3.10})$$

De un vértice P_i , introducimos la proyección ortogonal F_i de P_i en el triángulo $P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)}$. Los parámetros métricos en el vértice P_i son las coordenadas baricéntricas de F_i con respecto al triángulo $P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)}$:

$$\begin{aligned} F_i &= \varepsilon_{1i} P_{N1(i)} + \varepsilon_{2i} P_{N2(i)} + \varepsilon_{3i} P_{N3(i)} \\ \varepsilon_{1i} + \varepsilon_{2i} + \varepsilon_{3i} &= 1 \end{aligned} \quad (\text{ec. 3.11})$$

El ángulo simplex con dos parámetros métricos ε (que se definen más adelante) representa la posición de P_i con respecto a sus tres vecinos:

$$P_i = \varepsilon_{1i} P_{N1(i)} + \varepsilon_{2i} P_{N2(i)} + \varepsilon_{3i} P_{N3(i)} + L(r_i, d_i, \alpha_i) n_i \quad (\text{ec. 3.12})$$

Donde:

r_i : es el radio del círculo circunscrito en el triángulo $(P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)})$.

d_i : es la distancia entre F y el centro C_i del círculo circunscrito

$L(r_i, d_i, \alpha_i)$: está definido como:

$$L(r_i, d_i, \alpha_i) = \frac{(r_i^2 - d_i^2) \tan(\alpha_i)}{\varepsilon \sqrt{r_i^2 + (r_i^2 - d_i^2) \tan^2(\alpha_i)} + r_i} \quad (\text{ec. 3.13})$$

con:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 & \text{si} & \quad |\alpha_i| < \frac{\Pi}{2} \\ \varepsilon &= -1 & \text{si} & \quad |\alpha_i| > \frac{\Pi}{2} \end{aligned}$$

El ángulo simplex y los parámetros métricos definen la silueta local alrededor de un vértice dado. El ángulo simplex controla la curvatura media local, i.e., la elevación con respecto al plano tangente. Los parámetros métricos controlan la posición del vértice en el plano tangente con respecto a sus tres vecinos. En otras palabras, los parámetros métricos cambian la “parametrización” local donde el ángulo simplex cambia la curvatura extrínseca de la superficie.

3.5 Estructuras face-vertex

OpenGL y la mayoría de los actuales API's para hacer gráficos 3D están basados en dibujar una secuencia de caras, usualmente triángulos.

Una malla poligonal es una lista de caras que juntas forman la piel de un objeto, ésta es una manera estándar de representar una amplia clase de formas en gráficos.

En el ejemplo mostrado en la figura 3.9 se tiene una estructura faces-vertex, cada fila de la matriz de caras indica las conexiones del polígono, note como algunas caras comparten vértices entre ellas, por ejemplo el vértice 5, con este tipo de estructura se hace más eficiente el manejo de memoria.

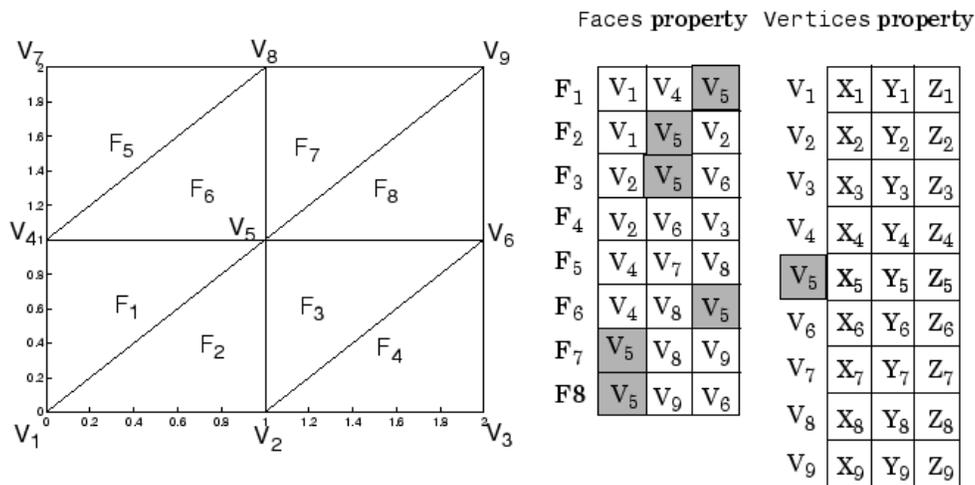


Figura 3.9 Ejemplo de una estructura face-vertex.^x

Se deben definir cada uno de los vértices que forman al polígono en sentido contrario a las manecillas del reloj, así, de manera implícita indicamos cual es la dirección de la normal.

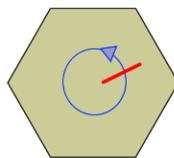


Figura 3.10 Definiendo vértices del polígono para indicar dirección de la normal.

Teniendo controladas las direcciones de las normales se puede agregar efectos de luz y sombreado a este objeto 3D.

^x Edward Angel, "Interactive Computer Graphics: A top-down approach", Addison Wesley, 3rd Edition, 2003.

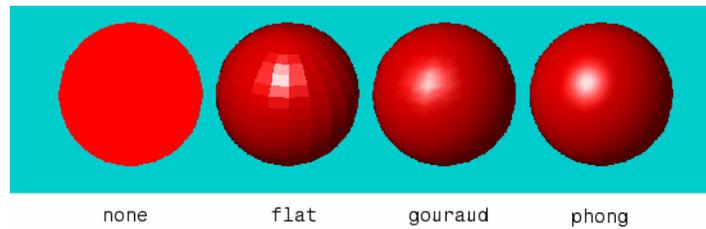


Figura 3.11 Efectos de iluminación en una esfera.^{XI}

3.6 Renderizado

Se puede considerar este proceso como una caja negra cuyos parámetros de entrada son los objetos que definimos en este programa –objetos geométricos, atributos, transformaciones - y cuya salida es un arreglo de píxeles coloreados.

Dentro de la caja negra se deben hacer muchas tareas, entre ellas transformaciones, recortados, sombreado, eliminación de superficies ocultas y rasterización de primitivas que aparecerán en pantalla.

Existen cuatro tareas principales dentro de un renderizador

- Modelado: el resultado usual de un proceso de modelado es un conjunto de vértices que especifican un grupo de entidades geométricas que son soportadas por el resto del sistema.
- Procesado geométrico: Determina qué objetos geométricos aparecerán en pantalla, les asignará sombras y colores. Los procesos requeridos son: normalización, recortado, eliminación de superficie oculta y sombreado. Una vez realizados los procesos, la proyección de tercera a segunda dimensión se lleva a cabo.
- Rasterización: una vez que se hizo la proyección se puede trabajar con objetos dos dimensionales, para desplegar el objeto se deben usar esos vértices para generar un conjunto de píxeles, este proceso es llamado también escaneo de conversión.
- Desplegado: en la mayoría de los monitores el proceso de tomar la imagen del buffer marco es automática. Sin embargo, hay numerosos problemas con la calidad de pantalla, como la dentadura asociada, *aliasing* o reproducción de colores.

^{XI} Edward Angel, “Interactive Computer Graphics: A top-down approach”, Addison Wesley, 3rd Edition, 2003.

3.7 Fractales

Las formas encontradas en la naturaleza como montañas, franjas costeras, sistemas hidrográficos, nubes, hojas, árboles, vegetales, copos de nieve y un sinnúmero de otros objetos no son fácilmente descritos por la geometría tradicional. La geometría fractal provee una descripción y una forma de modelo matemático para las aparentemente complicadas formas de la naturaleza. Éstas a veces poseen una remarcable invarianza a la simplificación bajo los cambios de la magnificación, propiedad que caracteriza a los fractales.

Los objetivos comunes del análisis fractal incluyen:

- Determinar si el objeto bajo prueba es autosimilar o autoafín
- Determinar fenómenos sobre la formación o degradación
- Descubrir procesos múltiples y determinar las escalas sobre los cuales son dominantes
- Interpolar y extrapolar escalas diferentes
- Desarrollar una ecuación empírica para estimar algún parámetro de difícil medición

3.7.1 El concepto de fractal

La idea del fractal fue concebida aproximadamente en 1890 por el francés Henri Poincaré. Pero las dimensiones fraccionales fueron discutidas hasta 1919, cuando el matemático alemán Felix Hausdorff establece una manera de medir el tamaño de un objeto al dividir el espacio en pequeños conjuntos (círculos, cuadrados u otros) de tamaño r (diámetro, arista y demás) y contar el número $N(r)$ necesitado para realizar la cobertura del objeto (ver figura 3.12)

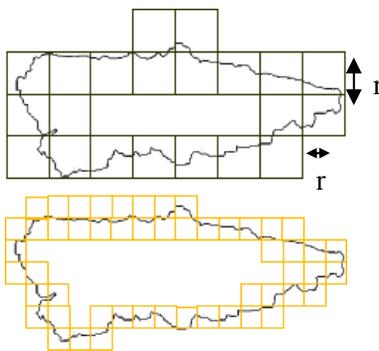


Figura 3.12 Cobertura con cuadrados de tamaño r para obtener la medición de una curva.^{XII}

Se puede establecer una función que relaciona la dimensionalidad (longitud, área, volumen) con un exponente d a través de la medida Hausdorff:

^{XII} Mandelbrot, Benoit "Los Objetos Fractales" - 2ª Ed. Tusquets Editores

$$M(d) = \inf \sum r^d = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r^d = \gamma_0 \quad (\text{ec. 3.14})$$

Donde γ_0 es la medición debida al menor tamaño posible de r (ínfimo). Los resultados para la curva y la superficie se muestran en la tabla 2-2.

Medida de hausdorff	Para la curva de longitud L_0	Para la superficie con área A_0
Longitud	$M(1) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r = \lim_{r \rightarrow 0} L_0 \cdot r^0 = L_0$	$M(1) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r = \lim_{r \rightarrow 0} A_0 \cdot r^{-1} = \infty$
Área	$M(2) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r^2 = \lim_{r \rightarrow 0} L_0 \cdot r^1 = 0$	$M(2) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r^2 = \lim_{r \rightarrow 0} A_0 \cdot r^0 = A_0$
Volumen	$M(3) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r^3 = \lim_{r \rightarrow 0} L_0 \cdot r^2 = 0$	$M(3) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r) \cdot r^3 = \lim_{r \rightarrow 0} A_0 \cdot r^1 = 0$

Tabla 3-2 Medida que relaciona la dimensionalidad con un exponente d.

Se nota que para un determinado objeto sólo existe una medida γ_0 que es útil para describir su tamaño, al exponente de r que define dicha medida se le conoce como dimensión de Hausdorff (D_H) y se define cuando $M(d)$ pasa de cero a infinito.

Más tarde el matemático ruso A. Besicovitch simplifica el trabajo de Hausdorff al considerar que si un objeto euclidiano reduce su tamaño en $1/r$ en cada dirección espacial, se obtendrán $N(r)$ réplicas que conservan la misma topología que la original, es decir: Si se toma una línea y se divide en dos partes, es decir $1/r = 1/2$ se tendrán dos segmentos topológicamente iguales al original. (ver figura 3.13 a)



Figura 3.13 a) División de una línea en dos, produciendo así dos réplicas topológicas.
b) División de los lados de un cuadrado, produciendo así cuatro réplicas topológicas.^{XIII}

Asimismo, si se divide en dos cada lado del cuadrado, se tendrán topológicamente hablando cuatro cuadrados iguales al original. (ver figura 3.13 b)

Y ahora, si se toma un cubo y se divide en dos todos sus lados, se tendrán ahora ocho cubos iguales al original.

^{XIII} David Yáñez Mendoza. Dimensión Fractal de Trayectorias de Descargas Eléctricas en Aire. En Tesis MC. - Instituto Politécnico Nacional.

En resumen se puede observar:

Figura	Dimensión topológica	Número de copias
Línea	1	$2 = 2^1$
Cuadrado	2	$4 = 2^2$
Cubo	3	$8 = 2^3$
	d	$N = r^d$

Tabla 3-3 Relación entre la dimensión topológica y d .

Se nota que al dividir en dos cada lado de una figura regular euclidiana, el número de replicas similares a la original es $N(2) = 2^d$, en donde d es la dimensión topológica de la figura. Además, esa relación no se altera si en lugar de dividir una figura se duplica su dimensión, por lo tanto el número de figuras similares al original se puede representar con la relación $N(r) = r^d$

Resolviendo la ecuación para d

$$\log[N(r)] = \log(r^d) \quad (\text{ec. 3.15})$$

Por leyes de los logaritmos

$$d = \frac{\log[N(r)]}{\log(r)} \quad (\text{ec. 3.16})$$

Se observa que para un objeto irregular que altere la proporción $N(r) \leftrightarrow r$, el valor d no necesariamente será un valor entero como sucedería en una figura regular euclidiana. Por lo que se hablaría de una geometría fraccional y esa es la principal característica para llamarlos fractales.

A este tratamiento se conoce como dimensión de Hausdorff-Besicovitch, sin embargo, durante mucho tiempo se consideró al estudio de tales formas como “patologías” sin ninguna importancia. Hasta que en 1967 Mandelbrot [14], basándose en los trabajos de Hausdorff y Besicovitch publica el artículo “How long is the coast of Britain?”. Donde analizó los datos recogidos por Richardson para algunas costas y fronteras. La costa de Bretaña tiene $d=1.3$ y la circunferencia $d=1$, como se esperaba.

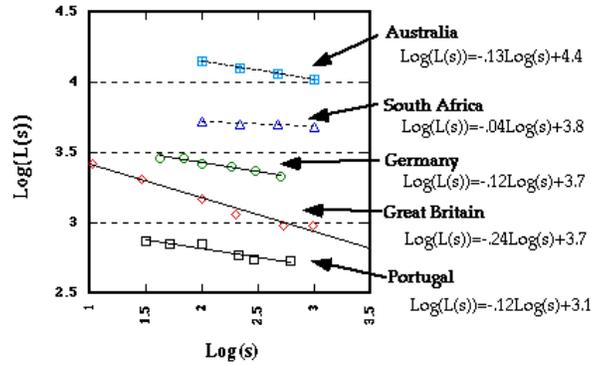


Figura 3.14 Se muestra la relación lineal de la longitud de diferentes costas.^{XIV}

De este modo, de la aproximación lineal $\log[L(r)] = m \cdot \log(r) + b$ para cada costa mostrada en la figura 2.20 se puede obtener la relación (por leyes de logaritmos):

$$L(r) = 10^b \cdot r^m \quad (\text{ec. 3.17})$$

Mandelbrot encontró que la pendiente m del ajuste lineal de los puntos de la gráfica es igual a $1-D$, en donde D representa la dimensión de Hausdorff.

$$L(r) = 10^b \cdot r^m = 10^b \cdot r^{1-D} \quad (\text{ec. 3.18})$$

En general, mientras “más tortuosa” sea la línea, la pendiente será más pronunciada y la dimensión Hausdorff de mayor valor. Es importante reconocer que los fractales verdaderos son una idealización. Ninguna curva en el mundo real es un fractal verdadero, los objetos reales son producidos por procesos que actúan sólo sobre un intervalo de escalas finitas. En otras palabras, los objetos reales no tienen la infinita cantidad de detalles que los fractales. Los fractales, por lo tanto, surgen de las características mencionadas anteriormente y son una nueva herramienta para caracterizar, explicar y modelar objetos de forma compleja a través de la relación existente entre la morfología y el escalamiento geométrico.

3.7.2 Dimensión fractal

El término dimensión fractal se usa indiscriminadamente en la literatura estudiada para definir una variedad de dimensiones específicas. Cada una de estas se usa para caracterizar aspectos diferentes de la naturaleza fractal de un objeto. A menudo, esas dimensiones son una aproximación a la dimensión de Hausdorff-Besicovitch y se les denomina en función del cálculo utilizado. Existen dos métodos principales para ello que son el análisis de la longitud del perímetro y el análisis de la masa.

^{XIV} Mandelbrot, Benoit Los Objetos Fractales - 2ª Ed. Tusquets Editores

La dimensión de Hausdorff-Besicovitch calculada a través de un graficado log-log provee una manera de medir qué tan tortuosa es una curva. Normalmente consideramos que los puntos tienen dimensión 0, las líneas 1, las superficies 2, y los volúmenes 3. A esta dimensión se le llama dimensión “topológica”. Sin embargo, una curva que recorre una superficie puede ser tan tortuosa que casi llene la superficie en la que se encuentra. Se puede pensar entonces la tortuosidad como un incremento en la dimensión, así una línea tortuosa tendrá una dimensión fraccional mayor a la dimensión topológica 1, menor a la dimensión topológica 2.

3.8 Descargas en gases

Consideremos un par de electrodos planos y paralelos inmersos en un medio gaseoso y separados por una distancia d . Todo el sistema es contenido por un tubo de descarga como se muestra en la figura 3.15. Los electrodos son energizados por una fuente de corriente directa a un potencial V entre los dos electrodos.

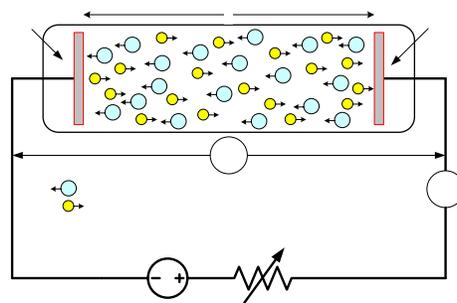


Figura 3.15 Tubo de descarga.^{xv}

En este sistema se crean diversos y diferentes tipos de descarga en función de dos parámetros fundamentales que son: voltaje y corriente. Además el tubo puede ser evacuado y llenado a diferentes presiones.

^{xv} José Luis Hernández Ávila, “Apuntes maquinas eléctricas III”. U.A.M. Azcapotzalco.

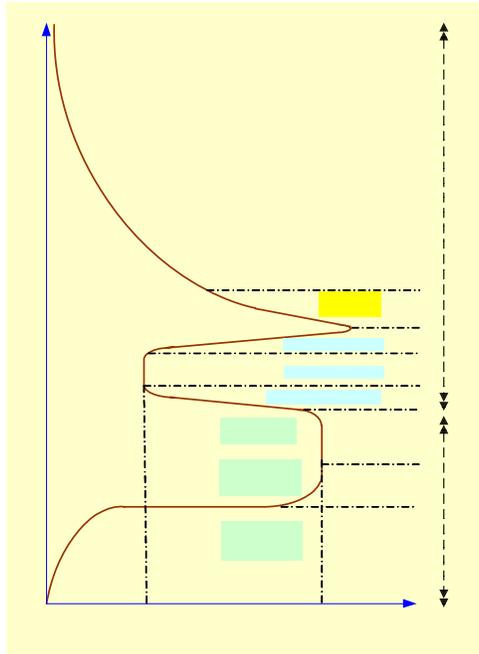


Figura 3.16 Curva característica corriente–voltaje (I-V) y sus diferentes regiones de descarga.^{XVI}

Las corrientes involucradas en el proceso de conducción del gas van desde 10^{-18} A hasta varios cientos amperes. De estos cambios de descarga da cuenta la curva corriente-voltaje o I(V) de la figura 3.16. En esta curva se muestran ocho regiones de funcionamiento de la descarga, que pueden ser agrupadas de manera general por dos tipos de descarga: descargas no sostenidas (no autónomas), descargas auto-sostenidas (autónomas).

3.8.1 Regiones de descarga en corriente directa

Para iniciar la descripción de las diferentes regiones de descarga volvamos a la imagen que muestra la curva característica corriente–voltaje (I-V) y sus diferentes regiones de descarga (figura 3.16).

Región I. Descarga no autónoma sin multiplicación electrónica

En esta región las corrientes y tensiones son débiles (menor a $11 \mu\text{A}$ y algunos volts $\approx 10\text{V}$). La descarga no existirá más que en presencia de un agente de ionización externo al tubo de descarga.

Región II. Descarga no autónoma con multiplicación electrónica

Si aumentamos la tensión V después de haber alcanzado la zona de saturación I_0 , la corriente vuelve a crecer, lo cual es una característica de una ampliación de la ionización en el gas debido a la fuente exterior, este efecto es conocido como multiplicación electrónica o régimen de avalancha electrónica.

^{XVI} José Luis Hernández Ávila, “Apuntes maquinas eléctricas III”. U.A.M. Azcapotzalco.

Se produce bajo la acción del campo eléctrico aplicado \vec{E} , algunos electrones adquieren energía suficiente para ionizar algunas partículas neutras; en su recorrido hacia el ánodo, estos electrones crean a su vez nuevos electrones susceptibles a su turno de ionizar el gas (figura 3.17).

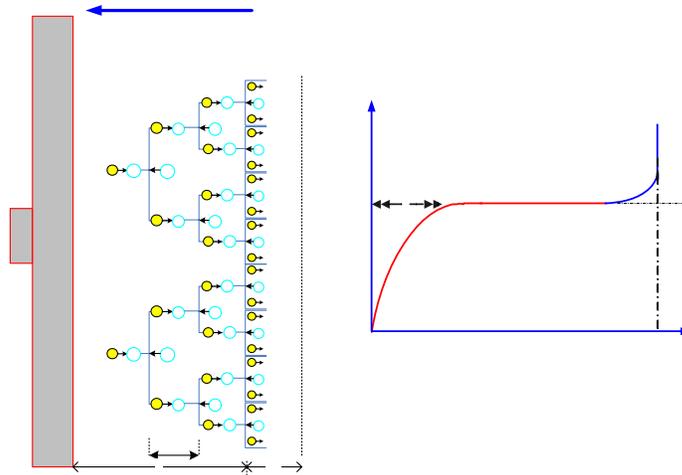


Figura 3.17 Procesos multiplicación electrónica de la región II de descarga en la cercanía del cátodo.^{XVII}

Región III. Descarga de Townsend

Es un proceso de ionización de gases donde una cantidad muy pequeña de electrones al inicio, acelerados por un campo eléctrico lo suficientemente fuerte, eleva la conducción eléctrica a través del gas por medio de la avalancha de multiplicación, cuando el número de cargas libres cae o el campo eléctrico se debilita, el fenómeno cesa. Este es un proceso caracterizado por muy bajas densidades de corriente: los tubos comúnmente están llenados de gas, con magnitudes típicas de corrientes fluyendo de alrededor 10^{-18} a 10^{-5} A, mientras los voltajes aplicados son casi constantes.

cátodo

Regiones IV, V y VI. Descarga luminiscente

Es un tipo de plasma formado por pasar una corriente de entre 100 v y varios kv a través de un gas usualmente argón o algún otro gas noble. Esto es encontrado en productos tales como luces fluorescentes y televisiones de pantalla de plasma, y es usada en física de plasmas y química analítica.

Región VII y VIII. Descarga de arco

Es el rompimiento de dieléctrico de un gas produciendo una descarga de plasma, similar a la chispa, el arco ocurre en un espacio llenado de gas entre dos electrodos a

^{XVII} José Luis Hernández Ávila, Apuntes maquinas eléctricas III. U.A.M. Azcapotzalco.

menudo contruidos de carbón, el resultado de esto es una temperatura muy alta capaz de fundir o vaporizar virtualmente cualquier cosa.

3.8.2 Mecanismo del Streamer

Los primeros estudios empleando cámaras de Wilson, confirmados posteriormente por técnicas de fotografía ultra rápida, condujeron a la definición de un nuevo mecanismo de ruptura ligado a la existencia de dardos o filamentos luminosos, también conocidos como streamers.

El origen de estos fenómenos es un campo de carga espacial inducido por la avalancha que regresa sobre si misma. La avalancha inicial (figura 3.18-a) crea una nube de pares electrón-ión de crecimiento exponencial en densidad; mientras los electrones se esparcen, los iones permanecen inmóviles y forman una carga de espacio positiva (figura 3.18-a-b), tanto mayor si estos se encuentran en las cercanías del ánodo.

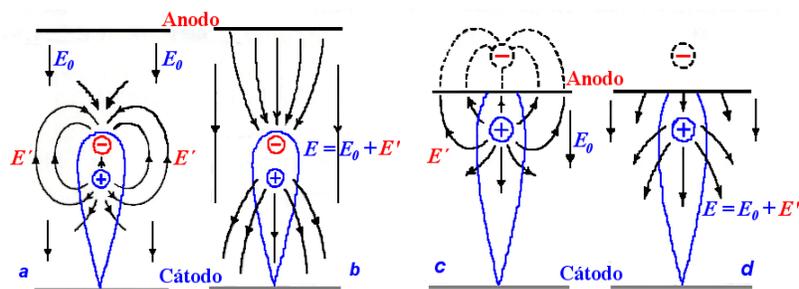


Figura 3.18 Distorsión del campo eléctrico debido a la carga de espacio inter-electrodos antes (a y b) y después (c y d) de que la avalancha electrónica alcance el ánodo. Las líneas de campo eléctrico del campo externo E_0 las líneas del campo eléctrico de la carga d espacio E' se muestran separadamente (a) y (a'). El campo eléctrico resultante E esta representado en (b) y (b').^{XVIII}

El campo eléctrico correspondiente puede alcanzar un valor crítico ($E' = E_c$) por cual, debido a un proceso secundario, atribuido a la fotoionización por su rapidez, se formarán electrones germinales que producirán a su vez nuevas avalanchas (Figura 3.19-a).

^{XVIII, XIX} José Luis Hernández Ávila, Apuntes maquinas eléctricas III. U.A.M. Azcapotzalco.

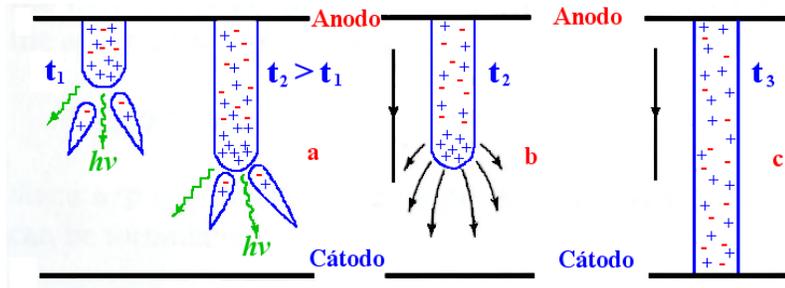


Figura 3.19 Streamer dirigido al cátodo: (a) aspecto del streamer en dos momentos consecutivos de tiempo, con avalanchas secundarias moviéndose hacia el cátodo (las flechas onduladas representan los fotones que generan más electrones germinales). (b) Distorsión del campo eléctrico en la cabeza del streamer (c) etapa final de streamer.^{XIX}

Estas nuevas avalanchas se dirigen hacia la nube positiva dejada por la avalancha inicial y se asocian con esta última, formando pequeños filamentos luminosos (figura 3.19-b) que, por una sucesión de fenómenos análogos, rápidamente se propagan hacia los electrodos, conduciendo a la formación de un filamento continuo de plasma o canal de descarga (3.19-c).

En las figuras siguientes se presentan imágenes descriptivas sobre los “streamer” en medios gaseosos y líquidos.

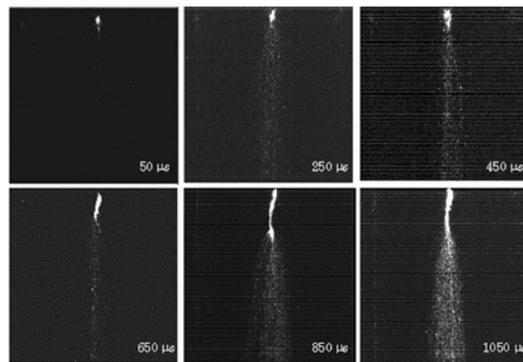
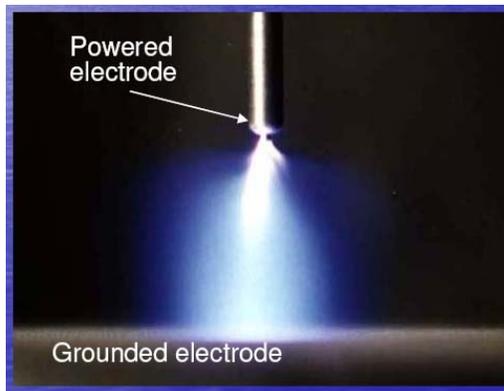


Fig. 3. ICCD Images of the streamer corona after laser incidence.

Figura 3.20 (a) Ejemplo de streamer en un reactor punta plano en Argón y espacio entre electrodos de 30 mm. (b) Ejemplo de streamer en un reactor punta plano en medio gaseoso.^{XX}

^{XX} Youl-Moon Sung, Masahisa Otsubo, and Chikahisa Honda, “ICCD Images of Laser Induced Streamer”, IEEE transactions on plasma science, vol. 33, no. 2, 2005.

3.8.3 Descarga corona

El término designa a conjunto de fenómenos que se producen en un gas en la vecindad de un conductor de pequeño radio de curvatura, sometido a una tensión elevada (campo eléctrico elevado).

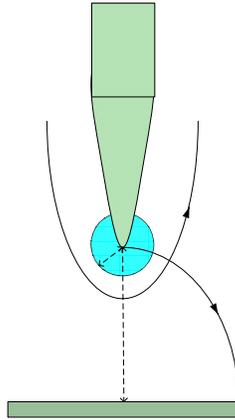


Figura 3.21 Aspecto de la descarga corona en configuración punta-plano a presión elevada.^{XXI}

Este tipo de descargas tiene una importancia práctica muy importante tanto por los inconvenientes que ella tiene (pérdida y ruido en las líneas de transmisión de alta tensión) como por sus aplicaciones (precipitadores, pintura electrostática, generador de ozono, etc.).

^{XXI} José Luis Hernández Ávila, Apuntes maquinas eléctricas III. U.A.M. Azcapotzalco.

4

Implementación

En ésta sección se mostrará cada uno de los pasos seguidos para el desarrollo del proyecto. Estos van desde la adquisición de las imágenes hasta la caracterización de las reconstrucciones tridimensionales. En cada uno de los tópicos manejados en ésta sección se mostrarán los algoritmos que se desarrollaron y resultados parciales al irlos aplicando.

4.1 Propuesta solución

En el capítulo uno se introdujo a la objetivos de la tesis, de manera más específica a continuación se muestra la propuesta solución como diagrama de flujo y posteriormente hay una breve descripción para cada una de las etapas y las técnicas empleadas en ellas.

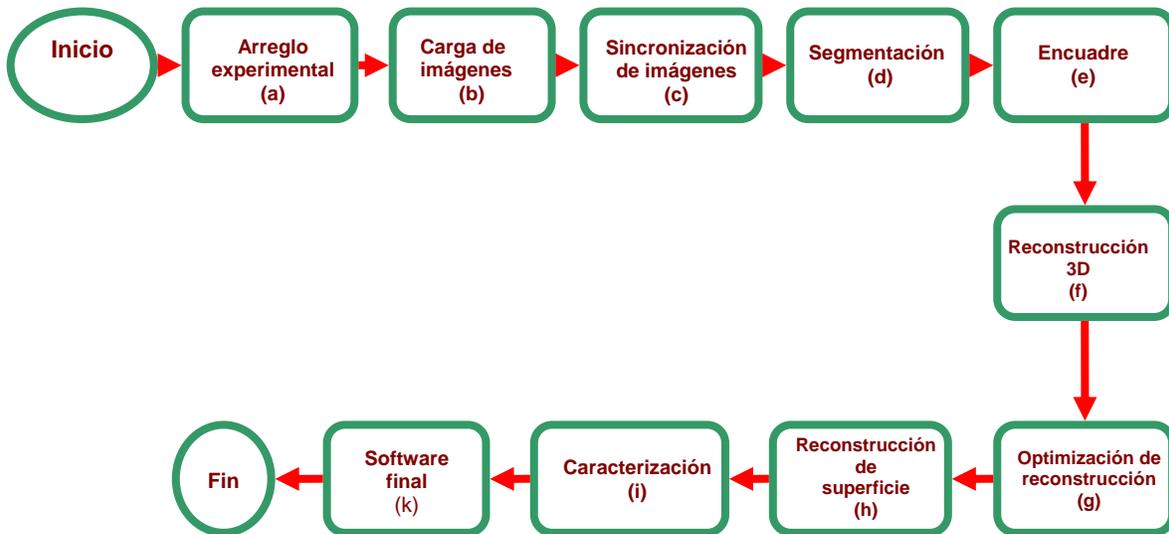


Figura 4.1 Diagrama de flujo de etapas de proyecto.

A continuación se dará una descripción breve de cada una de las etapas del proyecto, cada una de ellas será explicada en mayor detalle a lo largo del trabajo.

- a) *Arreglo experimental*: Se montan los distintos arreglos eléctricos y se hacen pruebas con distintos voltajes, distancias de electrodos y gases, con ello se obtienen las descargas eléctricas deseadas.
- b) *Carga de imágenes*: Se hace el montaje del arreglo de videocámaras para que con ellas se obtengan las imágenes de descargas eléctricas.
- c) *Sincronización de imágenes*: Se implementan los dispositivos necesarios para aislar de los videos, imágenes de la descarga al mismo instante.
- d) *Segmentación*: De las imágenes obtenidas se aísla la región en donde ocurre la descarga.
- e) *Encuadre*: Se hace un ajuste en las imágenes de manera que puedan ser llevadas al algoritmo de reconstrucción.
- f) *Reconstrucción tridimensional*: Se aplica el algoritmo de reconstrucción para obtener el modelo 3D.
- g) *Optimización de la reconstrucción*: En esta etapa se aplica un algoritmo de optimización, con el cual se hará una reducción en la densidad de malleo.
- h) *Reconstrucción de superficie*: Se aplica el algoritmo de reconstrucción de superficies por mallas simplex.
- i) *Caracterización*: Se obtienen parámetros eléctricos, estadísticos y fractales de la descarga.
- j) *Software final*: Se realiza una interfaz gráfica en donde se puedan reconstruir y caracterizar las descargas eléctricas, además de interactuar con los modelos 3D.

4.2 Adquisición de imágenes

Existen varias maneras de hacer la adquisición de imágenes del fenómeno: con un espejo y una cámara conectada directamente a la PC; con dos cámaras conectadas directamente a la PC, o dos cámaras con grabación independiente y usando una tarjeta de adquisición de video. Está reportado en bibliografía [11] que utilizando dos cámaras con grabación independiente e implementando un sistema de sincronización, ha sido un montaje que ha mostrado buenos resultados. Entonces de los videos se puede realizar la edición de los mismos y extraer las imágenes deseadas. Todo ello con el fin de evitar pérdidas de información durante la captura de los mismos (ver figura 4.2).

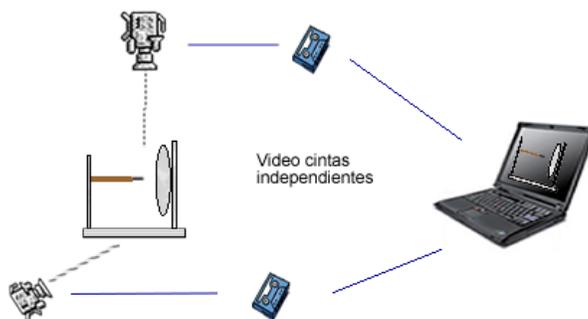


Figura 4.2 Adquisición de imágenes con videocámaras analógicas.

Para el presente proyecto primeramente se montó el arreglo con cámaras analógicas mostrado en la figura 4.2 puesto que había sido reportada su funcionalidad para obtener imágenes de la descarga en geometría de electrodos plano-plano, sin embargo, entre las descargas a estudiar se encuentra la provocada en geometría de electrodos punta-plano y esta es más “temperamental” esto trae como consecuencia que el arreglo reportado no sirva del todo, por lo que se han propuesto otros arreglos para atacar a los distintos problemas que se encontraron, y a continuación listamos:

- Imágenes de baja calidad
- Imágenes muy pequeñas
- Respuesta lenta de los ccd's
- Interferencia en cinta del campo eléctrico
- Streamer demasiado rápido
- Pérdida de información al digitalizar

Por lo que, para contrarrestar cada uno de los tópicos enlistados se fueron tomando diversas consideraciones. Para evitar los efectos indeseados de interferencia en la cinta provocados por el campo eléctrico fue necesario colocar las videocámaras al menos a una distancia de 50 cm. Cuando se trabajó con el arreglo punta-plano e intentando disminuir las perdidas por digitalización, se probó migrando a un arreglo donde se utilizaron videocámaras digitales, como se aprecia en la figura 4.3.

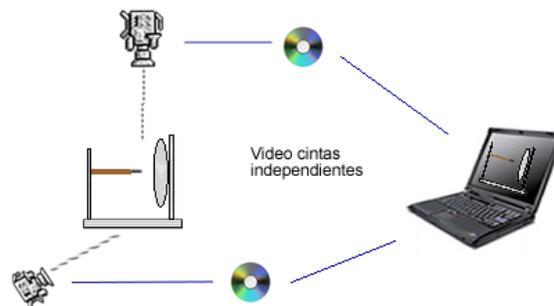


Figura 4.3 Adquisición de imágenes con videocámaras digitales.

Con esta implementación mejoraron mucho las imágenes, sin embargo, inicialmente la descarga con la que se trabajó era autosostenida en geometría de electrodos punta-plano, para generar este tipo de descarga la separación entre electrodos debe ser muy pequeña lo cual conlleva a otro problema. Al hacer su reconstrucción, se pierde mucha calidad en la malla, por lo que se optó por generar descargas de mayor tamaño.

A continuación se listan los recursos utilizados para generar la descarga eléctrica y hacer la captura de imágenes

- Tarjeta de adquisición de imágenes
- Electrómetro de alta impedancia de la marca Keithley, modelo 6517.
- Fuente controlada de alta tensión en corriente directa y polaridad positiva (Spellman, modelo SL600, 0-20 kV) .
- Resistencia limitadora de 57 M Ω .
- El divisor de tensión resistivo de 40 kV (Punta atenuadora BK-PR28A 1:1000 V).
- Multímetro Fluke
- Generador Marx con 2.7 de ganancia
- Cámara de video analógica 1:
 - o Sony HandyCam Vision 220X, video Hi8 XR
- Cámara de video analógica 2:
 - o Sony HandyCam Vision 360X, video Hi8 XR
- Dos video cámaras digitales
 - o Sony Handycam DCR-HC40 120X

4.3 Sincronización de imágenes

Al conocer la estrategia de adquisición de imágenes se debe preguntar: ¿Cómo se sabe que la descarga que se está viendo en un video es la misma que la del otro video? Y peor aún ¿cómo se sabe que es el mismo instante? Intuitivamente se pensaría en implementar un disparador de eventos el cual mandaría una señal para lanzar la descarga; al analizar los videos con la pura presencia del fenómeno ya se tendrían sincronizadas las imágenes. El detalle está en que la fuente de alto voltaje con la que contamos para este experimento no tiene la capacidad de ser disparada de esta forma, se trabaja de manera manual, uno va incrementando el voltaje hasta llegar al punto de ruptura. Por lo tanto, hay que cambiar un poco ese primer intento intuitivo de sincronizar haciendo uso de otros dispositivos.

Dado que se realiza una captura independiente de imágenes, encontramos la necesidad de poder sincronizar las imágenes en el video, para lo cual, implementamos un circuito sencillo que genera una señal luminosa, esa señal será buscada dentro de los videos, y con ello se garantiza que se obtengan dos cuadros concurrentes del fenómeno. La señal luminosa se generó a través de un sencillo circuito electrónico, mostrado en la figura 4.4.

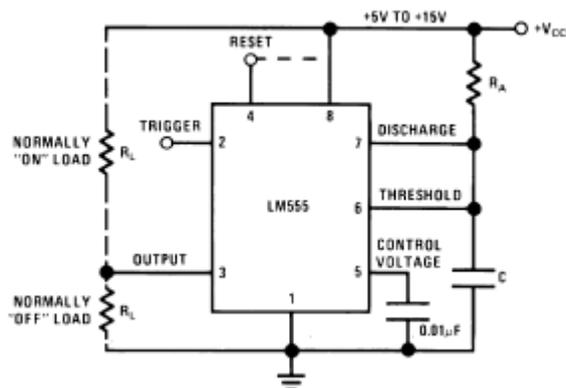


Figura 4.4 Circuito sencillo de generación de haz de luz.

Para el diseño del circuito se ocupó el timer LM555 que es un dispositivo altamente estable para generar tiempos de retardo u oscilación exactos. Éste se utilizó para generar el tiempo de encendido de la luz láser de 1/30 de segundo, este tiempo se puede controlar gracias a un resistor y capacitor externo, el circuito es disparado en flanco de bajada. Con ello se logró la sincronización, puesto que, editando el video se localiza el cuadro donde se produjo la señal luminosa.

Bien, ese circuito fue suficiente para la obtención de imágenes sincronizadas para descargas en geometría de electrodos plano-plano.

Como ya se había mencionado, se trabajó también en la geometría de electrodos punta-plano. En un primer intento se provocó una descarga autosostenida, la cual no era muy favorable para la obtención de imágenes y su reconstrucción. Pero, se aumentó la distancia entre electrodos para tener descargas de mayor tamaño; así que para poder romper el dieléctrico del gas a una distancia mayor se necesita aplicar un mayor voltaje, la fuente de alta tensión utilizada sólo suministraba 20 kV, por lo que fue necesario integrar una etapa de amplificación con un generador Marx. Este nuevo arreglo lo que provocó fue un chispazo que ocurre a gran velocidad (microsegundos), lo cual trae un nuevo problema, la velocidad de barrido de los ccd's es demasiado lenta en comparación a la velocidad del fenómeno. De vez en cuando las cámaras logran captar la chispa, por lo que es casi imposible obtener vistas de la descarga concurrentes.

Para resolver ese problema se intentó usar sólo una cámara y un arreglo de espejos colocados ortogonalmente, para que en un mismo cuadro se obtuvieran las vistas sincronizadas. El esquema del arreglo fue el siguiente:

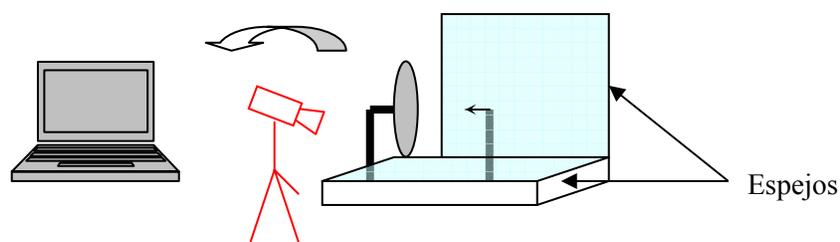


Figura 4.5 Arreglo experimental para obtención de imágenes ortogonales con una sola cámara

A pesar de esto, las imágenes obtenidas no fueron tan nítidas como se esperaba, pues aún se dificulta obtener streamers en las dos vistas.

4.4 Procesamiento digital de imágenes

En esta sección se dará a conocer cada uno de los algoritmos que se utilizaron para este proyecto, de los cuales ya se ha dado una introducción teórica. De manera didáctica trabajaremos con un ejemplo no necesariamente una descarga, donde se verán los efectos causados por cada uno de los algoritmos.

Las imágenes de trabajo son las siguientes:



Figura 4.6 Proyección lateral y superior de un objeto.

Segmentación

Para hacer la segmentación de las descargas se utilizaron en la mayoría filtros de color, ya sea para quedarse con las tonalidades de interés o para eliminar algunos colores no deseados en las imágenes, también se usaron herramientas de aclarado o de ecualización de histograma. Cuando ya se manipularon las imágenes y claramente se pudo discernir cual es la zona del fenómeno, se aplicó una conversión a escala de grises, tras ello, se pudo hacer después una binarización en donde el '1' correspondería a la zona de ocurrencia del fenómeno y '0' al fondo. El umbral de nivel de gris utilizado puede ser seleccionado de manera manual o automática; en este caso se ha utilizado un método que hace una selección de umbral automática usando el histograma de la imagen, llamado Otsu. [21]

Encuadre

Una vez que se obtuvieron las imágenes en blanco y negro se deben asegurar que son aptas para hacer una reconstrucción con ellas. Primeramente se deben recortar la zona donde ocurre la descarga. El algoritmo que ayuda hacer eso es el siguiente:

$a = \text{número de columnas en la imagen}$
 $b = 0$
 $c = \text{número de filas en la imagen}$
 $d = 0$
 $\forall (x,y) \in \text{Imagen}$
 si $\text{Imagen}(x, y) = 1$
 $a \leftarrow \text{si la fila está más a la izquierda de } a$
 $b \leftarrow \text{si la fila está más a la derecha de } b$
 $c \leftarrow \text{si la columna es menor que } c$
 $d \leftarrow \text{si la columna es mayor que } d$

recorta imagen delimitada por el rectángulo delimitado por las coordenadas (a, b) y (c, d)

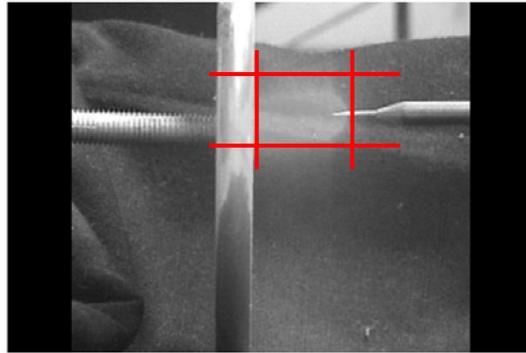


Figura 4.7 Encuadre de zona de ocurrencia.

Cuando las dos imágenes logran binarizarse se aplicó un tratamiento extra, casi imperceptible, asegurándose que el número de columnas en las dos imágenes fuera la misma.



Figura 4.8 Acondicionamiento de imágenes lateral y superior, L y S deben ser iguales.

El algoritmo para desarrollar este acondicionamiento sería el siguiente:

$L =$ número de columnas de imagen lateral
 $S =$ número de columnas de imagen superior

si $L < S$

Recorta imagen superior al tamaño de L eliminando las primeras columnas de tamaño $S-L$

sino

Recorta imagen lateral al tamaño de S eliminando las primeras columnas de tamaño $L-S$

4.5 Reconstrucción tridimensional

El algoritmo que se utilizó para hacer la reconstrucción tridimensional no fue uno de los métodos clásicos para hacer reconstrucciones tomográficas; aprovechando el hecho de que sólo se estaban utilizando dos proyecciones, se propuso un método alternativo que es más

eficiente puesto que no tiene que hacer el cálculo de la transformada. El algoritmo es el siguiente:

Dadas dos proyecciones P_0 cuyos ángulos θ son ortogonales, una reconstrucción $R \in \mathfrak{R}^3$ esta dada por:

ProyecciónSuperior \leftarrow imagen de $M \times N$ de la vista superior
ProyecciónLateral \leftarrow imagen de $L \times M$ de la vista lateral
 $I \leftarrow$ arreglo de $M \times N \times L$

Para cada $(i, j, k) \in I$
 Si la *ProyecciónSuperior*(i, j) y *ProyecciónLateral*(k, i) = 1
 $R(i, j, k) \leftarrow 1$

Si reconstruimos las imágenes de trabajo con el algoritmo propuesto el resultado lo observamos en la siguiente figura.

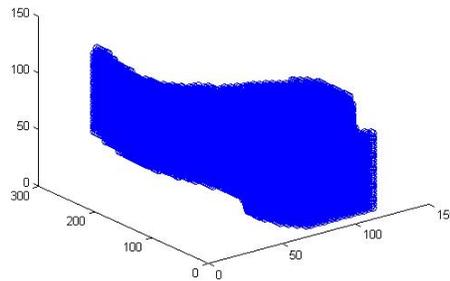


Figura 4.9 Reconstrucción tridimensional de imágenes de trabajo. También conocida como imagen volumétrica.

La imagen que podemos apreciar en la figura 4.9 es conocida como imagen volumétrica. La cantidad de información que se tiene en este tipo de imagen es excesiva, puesto que se están graficando vértices dentro del objeto y mostrarlos en pantalla sería totalmente innecesario, por lo que se tiene que implementar un algoritmo que ayude a ver sólo el exterior, a este tipo de algoritmos se les conoce como de reconstrucción de superficie, y con ellos sólo se usa la cantidad de información necesaria para representar al objeto. A continuación vemos la reconstrucción aplicando el algoritmo de reconstrucción de superficie conocido como isosuperficies.

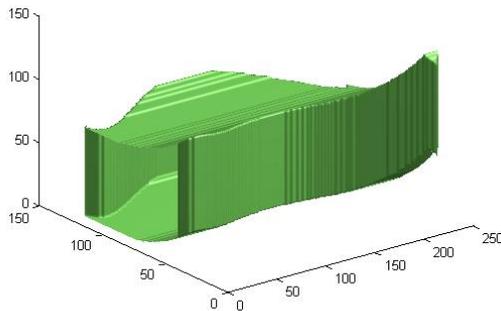


Figura 4.10 Reconstrucción tridimensional de imágenes de trabajo, utilizando isosuperficies.

Como se puede apreciar en la figura 4.10, la reconstrucción tiene un aspecto ligeramente cuadrado, esto es efecto de utilizar sólo dos proyecciones, en otras palabras si se hace un corte transversal para este objeto, como una rebanada, se puede observar que ella será una superficie rectangular. Esto es un problema, puesto que, se sabe de antemano que el canal de la descarga es tubular.

Para solucionar este problema se ha implementado un algoritmo al que le se ha llamado *realce* que se verá a continuación.

4.6 Realce

Como se planteó anteriormente, a la primera reconstrucción se le debe aplicar un algoritmo con el cual se permita llevar los cortes transversales de este objeto, que son superficies cuadradas a superficies que contenga una elipse inscrita al rectángulo.

Para realizar esto se hizo uso un algoritmo el cual usa las ecuaciones paramétricas de la elipse, sólo por recordar, las ecuaciones paramétricas son ligeramente parecidas a las funciones, ellas permiten usar valores arbitrarios llamados parámetros, en lugar de las variables independientes en ecuaciones. Mismas que en cambio proveen valores para variables dependientes.

La elipse es el lugar geométrico de un punto que se mueve en un plano de tal manera que la suma de sus distancias a dos puntos fijos de dicho plano es siempre igual a una constante mayor que la distancia entre los dos puntos fijos. Estos puntos fijos se denominan *focos*. Las ecuaciones paramétricas de la elipse son:

$$\begin{aligned} x &= a \cos \beta \\ y &= b \sin \beta \end{aligned} \quad -\frac{\pi}{2} \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \quad (\text{ec. 4.1})$$

Con el algoritmo siguiente se puede hacer el realce de la reconstrucción

Para cada corte transversal $c_i \in R$

$l_1, l_2 \leftarrow$ Encuentra longitud de la superficie rectangular contenida en c_i

centro \leftarrow Encuentra centro de masa

$r_1, r_2 \leftarrow$ Radios que forman elipse $\frac{l_1}{2}, \frac{l_2}{2}$

$c_i \leftarrow$ Traza el elipse con base a sus ecuaciones

$$\begin{aligned}x_i &= r_1 \cdot \cos(\alpha) & -\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \\y_i &= r_2 \cdot \sin(\alpha)\end{aligned}$$

En la figura 4.11 se puede ver el resultado de aplicar el algoritmo propuesto. Claramente se puede ver que hubo una reducción en la cantidad de vértices que forman al objeto, puesto que, se ha dejado solamente al cascarón, además, se obtiene el efecto deseado, se dio forma elíptica a cada uno de los cortes transversales.

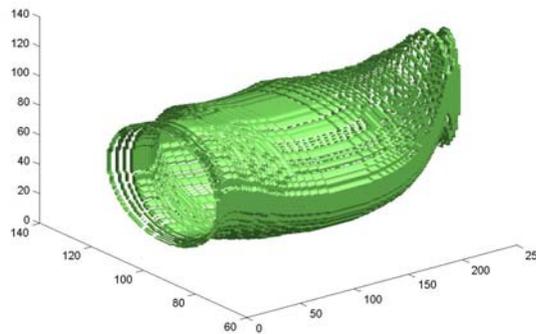


Figura 4.11 Reconstrucción tridimensional tratada con realce e isosuperficies.

Cómo se planteó en la propuesta solución de este trabajo, no se contempló como algoritmo de reconstrucción de superficie a las isosuperficies, sino a las mallas simplex, sin embargo ha sido bastante práctico mostrar los resultados intermedios por medio de esta técnica.

4.7 Optimización para la reconstrucción de superficie por mallas

Como se planteó en la propuesta solución de la presente tesis, del trabajo realizado por Rangel [11] se observó que en secciones relativamente grandes del canal no existen grandes variaciones a lo largo de la reconstrucción (véase figura 4.12).

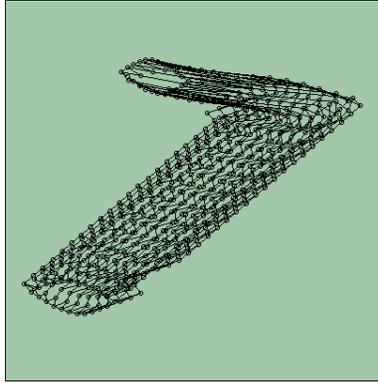


Figura 4.12 Reconstrucción de descarga eléctrica sin optimización.^{XXII}

Por tal motivo se añadió una mejoría haciendo una optimización de la malla, de tal manera, que cuando haya secciones sin variaciones bruscas se eliminase la información redundante, el algoritmo está basado en el cálculo del gradiente.

$$|\nabla R| = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial z}\right)^2} \quad \begin{array}{c} x \\ \swarrow \\ z \\ \searrow \\ y \end{array} \quad (\text{ec. 4.2})$$

El objetivo del algoritmo es modificar la reconstrucción R a una reconstrucción optimizada R_o , donde se busca sólo existan elipses en los cortes transversales del canal si existe un cambio grande en el gradiente.

El algoritmo propuesto es el siguiente:

$C_i \leftarrow \text{encuentra el primer elipse}(R)$
 $a_x, a_y \leftarrow \text{da el punto más alto de la elipse}(c_i)$
 $\text{umbral de gradiente} \leftarrow \text{valor}$
 $x \leftarrow 1$
 $\text{gradiente} \leftarrow 0$
 $\text{gradAnt} \leftarrow 0$

^{XXII} R. Rangel-Kuoppa, C. Avilés-Cruz, J.L. Hernández-Ávila, and R. Escarela-Pérez, "3d Reconstruction of a Spark Discharge" 37th International Universities Power Engineering Conference, Stafford, U.K., 9-11 September 2002, Conference Proceedings, pp. 483-487, Vol. 2.

Mientras haya elipse c_i en los cortes transversales de R

$x \leftarrow x + 1$
 $b_x, b_y \leftarrow$ da el punto más alto de la elipse(c_{i+1})

$gradiente \leftarrow$ Calcula $gradiente(a_x, a_y, b_x, b_y, x)$

si $abs(gradiente - gradAnt) > umbral$
 $gradAnt \leftarrow gradiente$
 $a_x, a_y \leftarrow b_x, b_y$
 $x \leftarrow 0$

sino
 Elimina $elipse(c_i)$

Veamos cual es el efecto de aplicar este algoritmo en la reconstrucción que se ha venido trabajando

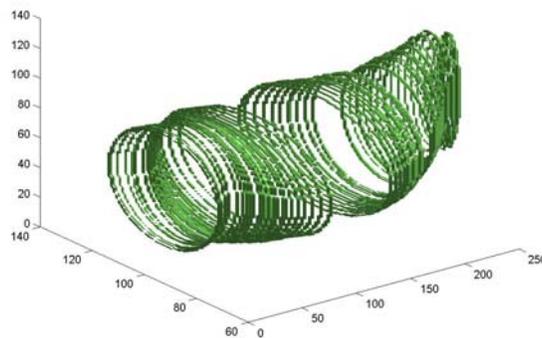


Figura 4.13 Efecto de aplicar algoritmo de optimización a la reconstrucción.

En la figura 4.13, claramente vemos que en las zonas donde no existen variaciones significativas en la forma del objeto fue eliminada la información, puesto que ella no es útil para el método de reconstrucción que se utilizó, debido a que se coloca una malla sobre la superficie del objeto, en los espacios donde no hay nada quedarán cubiertos por un conjunto de polígonos que se entretrejen de una manera especial.

4.8 Mallas Simplex

Se ha llegado a la etapa donde se hace la reconstrucción de la superficie con mallas simplex, al aplicarla a la reconstrucción tendremos una reducción de la cantidad de

polígonos que representan a la descarga, gracias al algoritmo de optimización presentado anteriormente.

El algoritmo propuesto para reconstruir la superficie por mallas está basado en el conocimiento *a priori* de la descarga, ya que se sabe que el canal de la descarga será un objeto de forma tubular. También, para construir el algoritmo se deben tener en cuenta las bibliotecas de graficación 3D, ellas ayudarán a hacer más eficiente el renderizado en pantalla, algunas de sus funciones piden ciertos requerimientos, como el hecho de que, si requiere mostrar un objeto construido con mallas, las funciones piden como argumento estructuras de tipo faces-vertex, las cuales hacen un manejo eficiente de la memoria. El resultado para este algoritmo será una malla representada por una estructura faces-vertex, con ello al momento de renderizar las reconstrucciones por API, no existan problemas de compatibilidad.

El algoritmo hace uso de una función que permite tener una lista ligada en la que se contiene el muestreo de cada uno de los píxeles que forman la elipse; con ello se puede hacer después una decimación, esto es un submuestreo, y entonces se podrá tener una reducción de la densidad de la malla.

En la siguiente figura se muestra como es hecho el muestreo de un corte transversal para un número de muestras par.

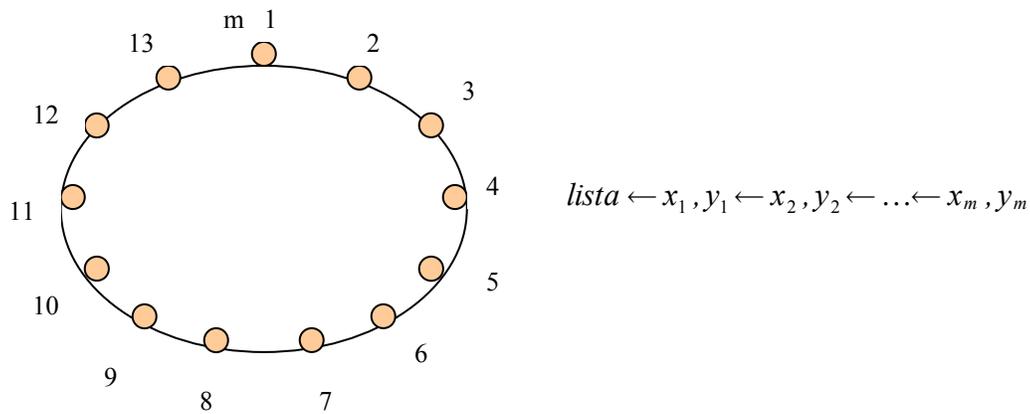


Figura 4.14 Obtención de lista de píxeles que forman a un corte transversal.

Lo importante a notar es que la primera muestra es la misma que la última muestra m .

La idea general para hacer el malleo simplex está basada en hacer una partición del canal, de manera que en cada rebanada queden contenidos cuatro cortes transversales (elipses), recordemos que esos elipses solo existirán en donde hay información representativa del canal. Con esas cuatro listas de manera automática se generarán una lista de polígonos (caras).

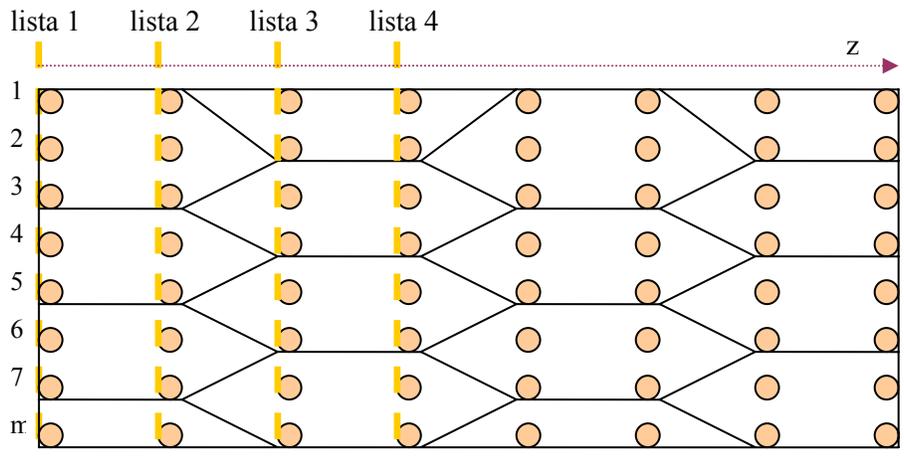


Figura 4.15 Obtención de las cuatro primeras listas para formar polígonos que forman a la malla.

El algoritmo *grosso modo* es el siguiente:

Seccionar el canal

Para cada sección del canal

Obtenga las cuatro listas de la sección

Agregue a una lista cada uno de los vértices que forman a los polígonos

Agregue a una lista cada una de las caras apuntando a la lista de vértices

En la figura 4.16 se puede ver de manera más gráfica cómo es que se va formando el malleo simplex sobre el canal utilizando la malla propuesta en la figura 4.15 para el muestreo hecho al canal.

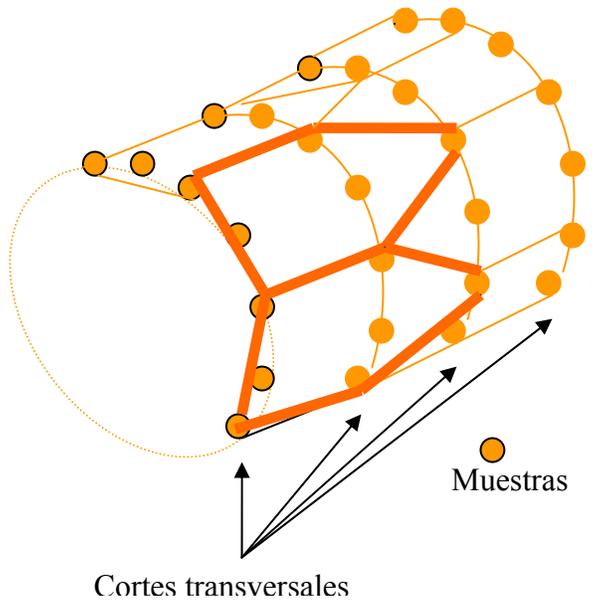


Figura 4.16 Colocado de la malla sobre el muestreo del canal.

Para una revisión exhaustiva de cómo fue implementado el algoritmo será necesario checar los listados de programas. Sin embargo, mencionaremos que el algoritmo entra en cuatro casos distintos y deben ser contemplados.

En la gráfica 4.17 se puede apreciar el efecto de aplicar el algoritmo de malleo simple a la reconstrucción con la que se ha venido trabajando.

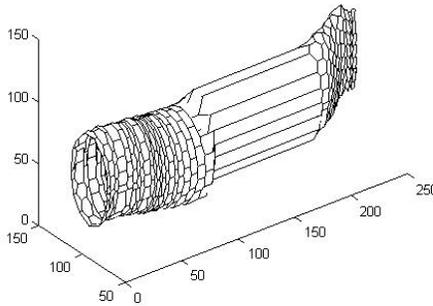


Figura 4.17 Reconstrucción de superficie por malleo simplex.

Una reconstrucción hecha a base de polígonos como la de la figura 4.17 es también llamada wireframe, en el contexto de los diseñadores gráficos significa la estructura base, con la cual pueden empezar a trabajar con colores, texturas, posiciones, efectos de iluminación y sombreado. Dentro de este contexto técnico son transformaciones rígidas, afines y mundo, algoritmos de recorte de profundidad, efectos de normales, rendering.

En la siguiente gráfica se verá como se comporta la reconstrucción agregando efectos de color y luz.

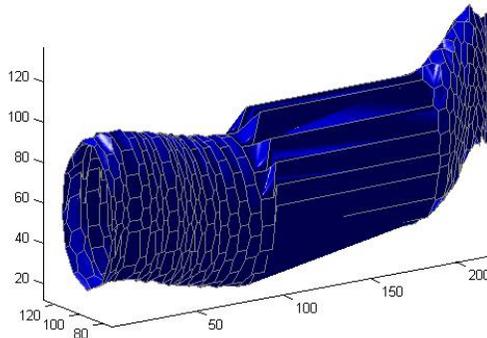


Figura 4.18 Agregando color e iluminación al wireframe.

A propósito se ha coloreado cada uno de los contornos del polígono de un tono gris, con el fin de mostrar que, efectivamente se está trabajando con las mallas simplex.

Como parte de los resultados parciales, a continuación se muestra el cómo se comporta el algoritmo de optimización en la reconstrucción tridimensional que se ha venido trabajando.

En la figura 4.19 se observa la reconstrucción de la superficie sin hacer ninguna optimización.

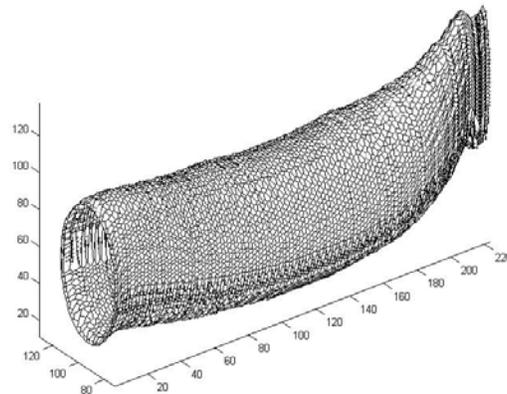


Figura 4.19 Reconstrucción de superficie con mallas simplex sin optimización 7,700 polígonos, 220 cortes y 140 muestras.

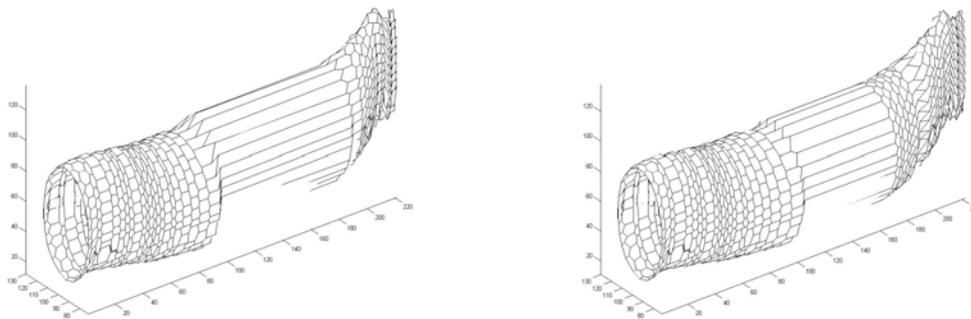


Figura 4.20 Reconstrucción de superficie con optimización: 875 polígonos con 8 grados de gradiente (220 cortes y 50 muestras por imagen) y 1075 polígonos y 5 grados de gradiente (220 cortes y 50 muestras por imagen).

En la figura 4.20 se muestran dos de una serie de pruebas en donde se varió el umbral de gradiente para hacer la reconstrucción. En la tabla 4-1 y 4-2 se hace un resumen de cómo es la variación del número de polígonos que forman a la malla respecto a la variación del gradiente.

Umbral de gradiente	Número de polígonos
$\pm 1^\circ - 0.0175 \text{ rad.}$	720
$\pm 2^\circ - 0.0349 \text{ rad.}$	705
$\pm 3^\circ - 0.0524 \text{ rad.}$	690
$\pm 4^\circ - 0.0698 \text{ rad.}$	660
$\pm 5^\circ - 0.0893 \text{ rad.}$	645
$\pm 6^\circ - 0.1047 \text{ rad.}$	615
$\pm 7^\circ - 0.1222 \text{ rad.}$	585
$\pm 8^\circ - 0.1396 \text{ rad.}$	525

Tabla 4-1: Optimización de la malla como función como función de gradiente (220 cortes y 30 muestras por corte).

Umbral de gradiente	Número de polígonos
$\pm 1^\circ - 0.0175 \text{ rad.}$	1200
$\pm 2^\circ - 0.0349 \text{ rad.}$	1175
$\pm 3^\circ - 0.0524 \text{ rad.}$	1150
$\pm 4^\circ - 0.0698 \text{ rad.}$	1100
$\pm 5^\circ - 0.0893 \text{ rad.}$	1075
$\pm 6^\circ - 0.1047 \text{ rad.}$	1025
$\pm 7^\circ - 0.1222 \text{ rad.}$	975
$\pm 8^\circ - 0.1396 \text{ rad.}$	875

Tabla 4-2: Optimización de la malla como función del umbral de gradiente (220 cortes y 50 muestras por corte).

4.9 Interfaz gráfica

Se desarrolló una serie de herramientas capaces de reconstruir y estudiar tridimensionalmente a una descarga eléctrica. Considerando que el software será utilizado en su mayoría por investigadores del área de física de descargas. Se ha desarrollado una GUI lo suficientemente intuitiva, de manera tal, que cualquiera pueda hacer una reconstrucción, sin que tenga conocimientos de procesamiento de imágenes. Teniendo así una interfaz que con el puro uso del *mouse* se obtengan excelentes reconstrucciones.

Está herramienta fue desarrollada en Matlab debido a la potencialidad del toolbox de imágenes. Gracias a esta, se colocaron una amplia serie de herramientas dentro de la GUI para con ellas manipular a las descargas y obtener mejores segmentaciones. Matlab tiene la capacidad de renderizar con OpenGL, no obstante, los resultados a la vista se quedan cortos en comparación a que si se renderizara directamente con el API en C o C++. Por lo que se realizó un programa en Visual C++ en donde se importan las estructuras Face-vertex obtenidas de la reconstrucción por medio de bibliotecas compartidas, de ahí son convertidas al formato especificado por OpenGL, y con ello se puede ver la malla simplex con toda la potencialidad del renderizado (colores, iluminación, materiales, sombras) y se hace una animación con ella.

4.9.1 Manual del usuario

En la figura 4.21 se aprecia la vista principal de la herramienta de reconstrucción tridimensional, es en esta vista donde se sitúa el usuario a la hora de iniciar la ejecución del programa.

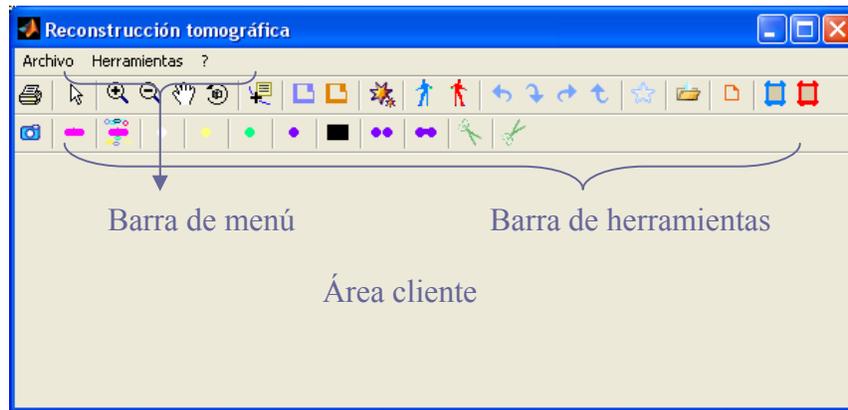


Figura 4.21 Vista principal de software de reconstrucción tridimensional.

El esquema que se siguió en el diseño de esta aplicación es el siguiente: a través del menú y la barra de herramientas se invocan los comandos necesarios para la reconstrucción tridimensional.

El área de cliente, está dividida en dos secciones en su fase inicial, ahí se presentan las imágenes que se encuentran en tratamiento, en la segunda fase se muestra la evolución de la reconstrucción hasta llegar a la optimización del malleo de la superficie.

En la figura 4.22 se muestra la carga de un par de imágenes a tratar (vista frontal y superior del fenómeno).

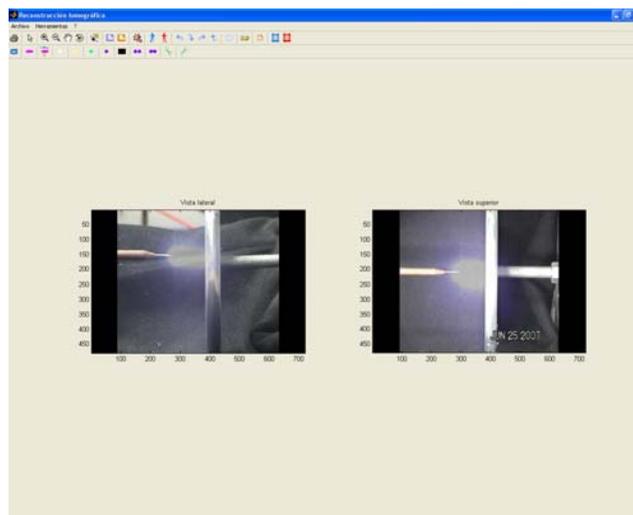


Figura 4.22 Interfaz gráfica tras haber cargado las imágenes de trabajo.

Los menús y botones de comando permiten realizar la ejecución de los algoritmos para alcanzar la reconstrucción tridimensional paso a paso. Para cada etapa se requiere de una validación mínima de datos obtenidos de las etapas anteriores, para su correcto funcionamiento.

A continuación se muestra en la tabla 4-1 la funcionalidad de los distintos botones de la barra de herramientas, esta misma funcionalidad puede ser ejecutada por los menús correspondientes.

	Imprimir la imagen actual
	Poner el foco en esa imagen
	Hacer un aumento de zoom
	Hacer disminución de zoom
	Mover gráficas de posición
	Rotar imágenes 3D
	Ver un píxel en específico en la imagen
	Cargar imagen de vista lateral
	Cargar imagen de vista superior
	Ajustar imágenes
	Segmentar imagen lateral
	Segmentar imagen superior
	Reconstruir
	Realzar reconstrucción
	Optimizar la malla
	Hacer el malleo simplex
	Caracterizar la descarga
	Guarda imagen
	Limpia pantalla y variables
	Espejo de imagen lateral
	Espejo de imagen superior

Tabla 4-1 Botones de barra de herramientas de comandos dedicados a la reconstrucción tridimensional.

El software está calibrado para trabajar con las luminiscencias, sin embargo, se desarrolló también una serie de botones con las que se puede trabajar con otro tipo de descargas, o las mismas, pero en otras condiciones de luz, tonalidad del fenómeno, distancia, fondo, etc.

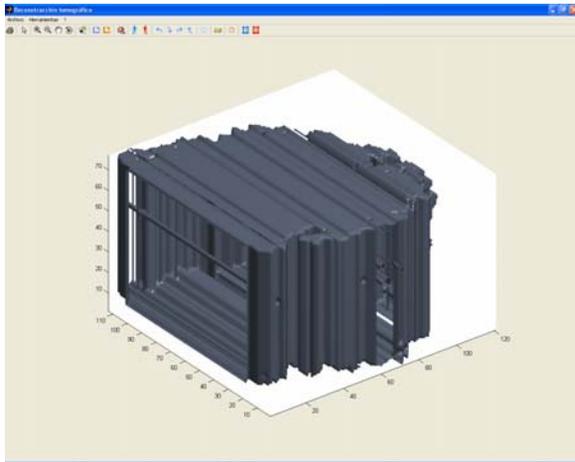
	Trabajar con imagen superior o lateral
---	--

	Filtrar colores
	Eliminar colores
	Corrección gamma
	Filtro logarítmico
	Filtro de mediana
	Ecuilización de histograma
	Binarizar
	Apertura
	Cerradura
	Encuadre
	Recortar zona en la imagen

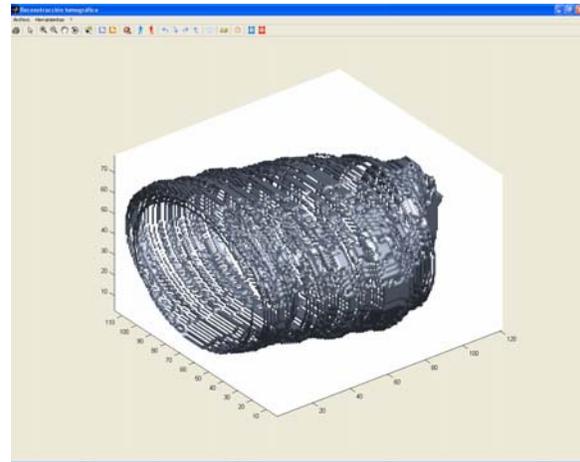
Tabla 4-2 Botones de barra de herramientas de comandos especializados en recortes y filtros.

Pasos para obtener una reconstrucción con la interfaz gráfica:

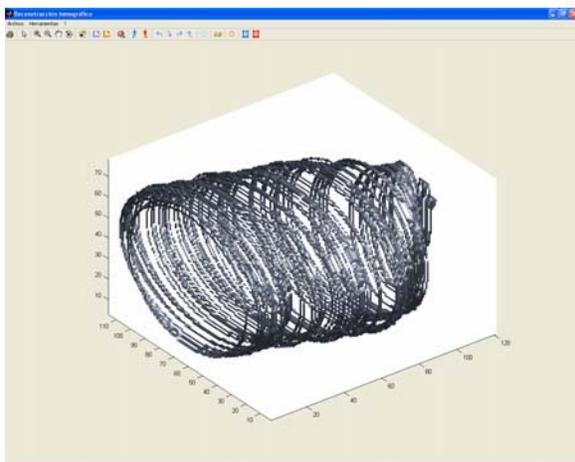
- Cargar la vista lateral de la descarga:
 - Selecciona el archivo que contenga la imagen deseada
- Cargar la vista superior de la descarga
 - Selecciona el archivo que contenga la imagen deseada
- Ajusta las imágenes en caso de que sus tamaños difieran
 - Selecciona con el mouse un recuadro en donde se encierre la punta del electrodo en la vista lateral
 - Selecciona con el mouse un recuadro en donde se encierre la punta del electrodo en la vista superior
- Segmenta la vista lateral
 - Selecciona un recuadro que contenga el fenómeno
- Segmenta la vista superior
 - Selecciona un recuadro que contenga el fenómeno
- Aplica reconstrucción tridimensional (figura 4.23-a)
- Emplea proceso de realce (figura 4.23-b)
- Optimiza la reconstrucción (figura 4.23-c)
- Haz el malleo (figura 4.23-d)
- Caracteriza la reconstrucción (figura 4.24)



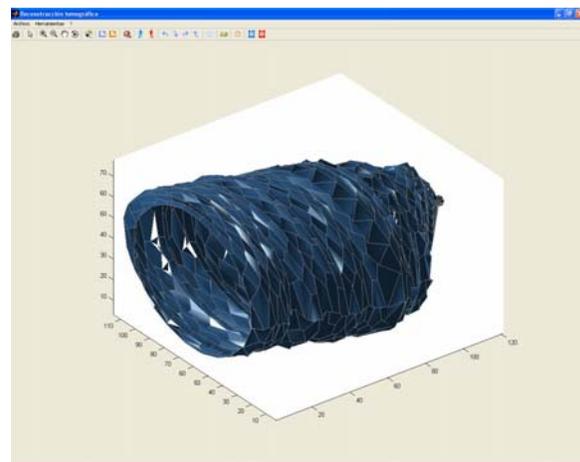
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.23 Etapas de reconstrucción con la interfaz gráfica:

- a) Reconstrucción tridimensional a partir de las dos proyecciones
- b) Reconstrucción aplicando algoritmo de realce
- c) Reconstrucción aplicando algoritmo de optimización
- d) Reconstrucción de superficie por malleo simplex

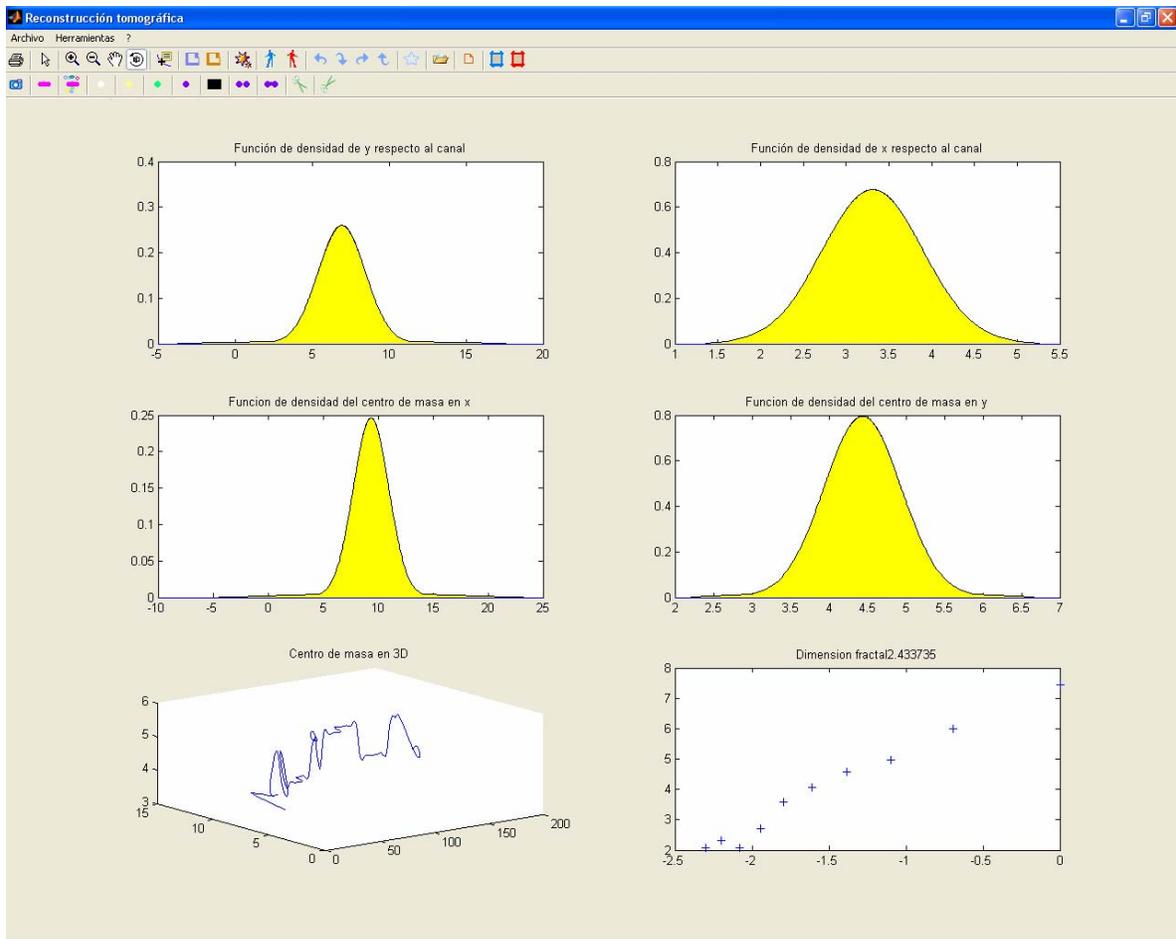


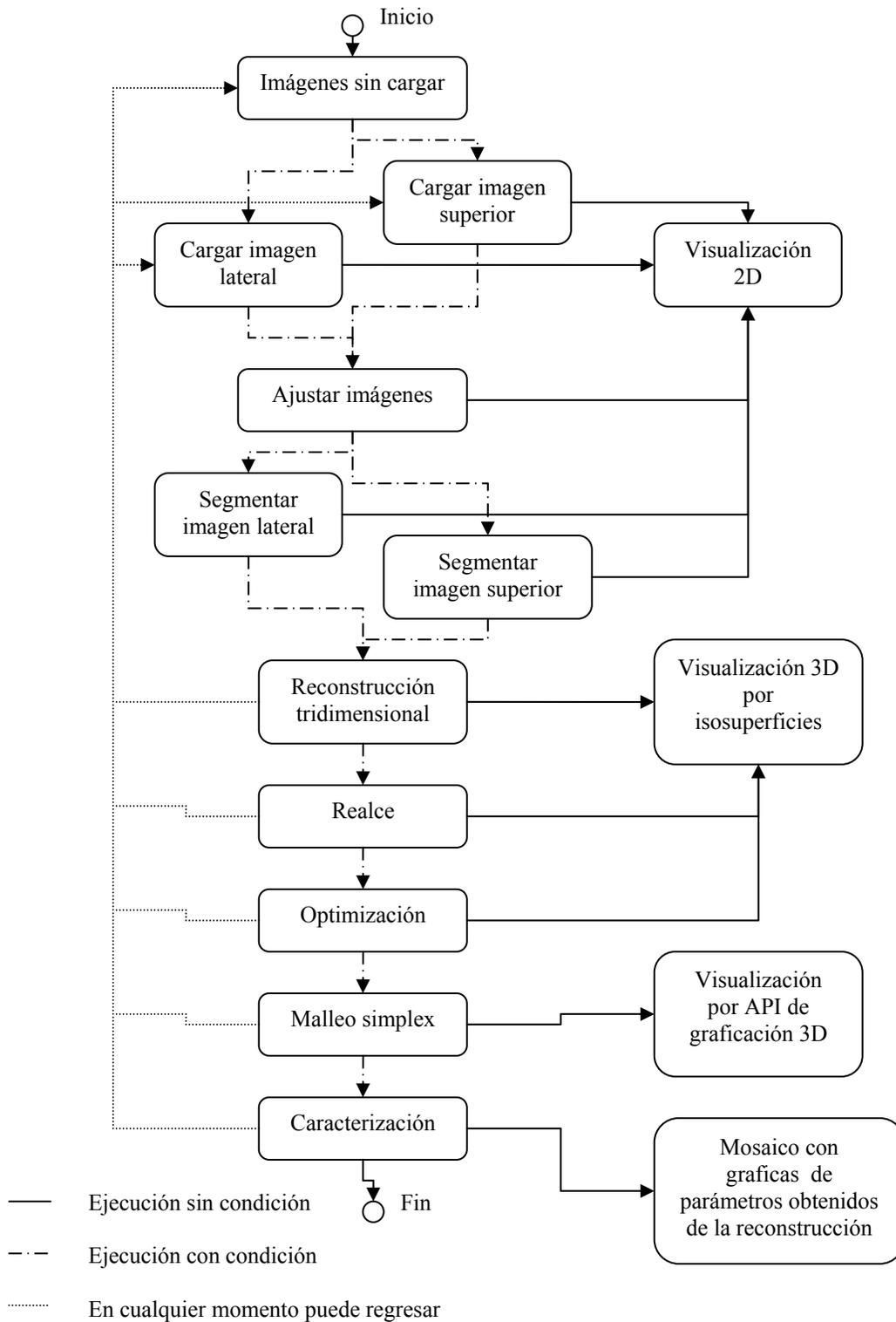
Figura 4.24 Vista de interfaz gráfica al emplear la caracterización de la reconstrucción tridimensional.

Para usar la animación hecha en Visual C++ basta con ejecutar en el menú el comando animar.



Figura 4.25 Imagen de luminiscencia en VC++.

4.9.10 Manual del programador



5

Resultados

Como se mencionó en el capítulo anterior la obtención de buenas imágenes es crucial para una buena reconstrucción, se probaron distintos arreglos experimentales con el propósito de obtener imágenes de la descarga que fueran de cuadros concurrentes, que no contuviesen ruido, que fueran fácilmente segmentadas, que la resolución de la imagen fuera lo máxima posible y se tuviera el máximo acercamiento a la descarga. A continuación se mostrará las imágenes obtenidas con cada uno de los arreglos y se justificará el porque se desechó o usó dicho arreglo.

El primer esquema trabajado fue usando dos cámaras de video analógicas en una configuración de electrodos punta-plano, utilizando una tarjeta de adquisición de video para trabajar con las imágenes en la computadora (figura Re-1).



Figura Re-1 Descarga eléctrica en configuración punta-plano tomada con cámara analógica, utilizando tarjeta de adquisición de video.

Como se puede apreciar en la imagen, ésta contiene mucho ruido por lo cual de inicio se tienen imágenes que podrían estar dando imágenes erróneas por lo que se propuso trabajar con videocámaras digitales para que no existiera el problema de la digitalización. En la figura Re-2 se puede ver una muestra de ello.

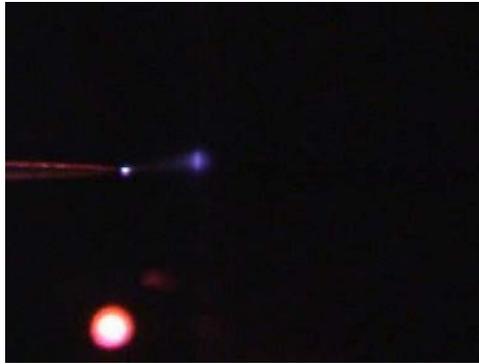


Figura Re-2 Descarga eléctrica en electrodo punta-plano con una separación de 5 mm, utilizando una cámara digital.

Como se puede apreciar la imagen es mucho más nítida, sin embargo, como la separación entre electrodos es muy pequeña, las imágenes no son tan ricas, es decir, en información tiene muy pocos píxeles para hacer la reconstrucción, por ello, se tienen una reconstrucción pequeña (figura Re-3).

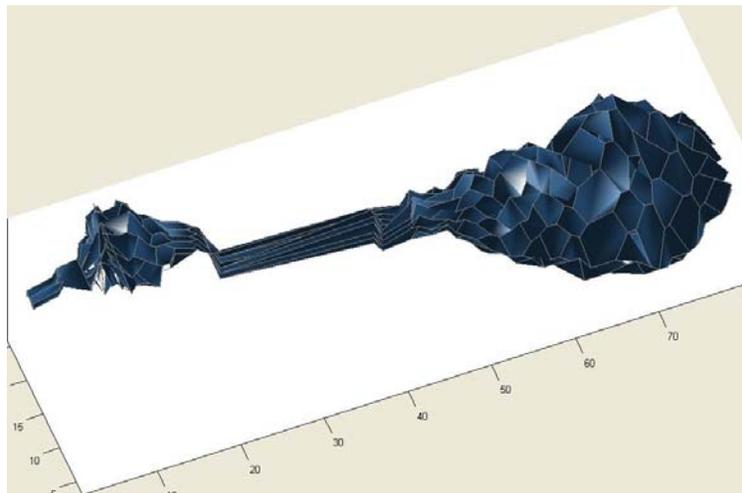


Figura Re-3 Reconstrucción de descarga eléctrica en electrodo punta-plano con una separación de 5 mm, utilizando una cámara digital.

En ésta reconstrucción aunque es buena limita un poco para mostrar las ventajas de la optimización de la malla que es parte importante del trabajo, por lo que intentamos hacer una reconstrucción de un canal más grande, utilizando una separación entre electrodos mayor. Para poder generar una descarga de tamaño mayor agregamos al arreglo eléctrico un generador Marx y aumentamos la distancia entre electrodos. Lo que se tiene ahora es un evento sumamente violento, que acarrea un nuevo problema: capturar el evento en la cámara. Primeramente lo intentamos con las cámaras digitales, el resultado fue un tanto desalentador, puesto que captar el streamer con una cámara ccd normal es muy difícil.

En la figura Re-4 se puede apreciar un streamer captado con las cámaras digitales

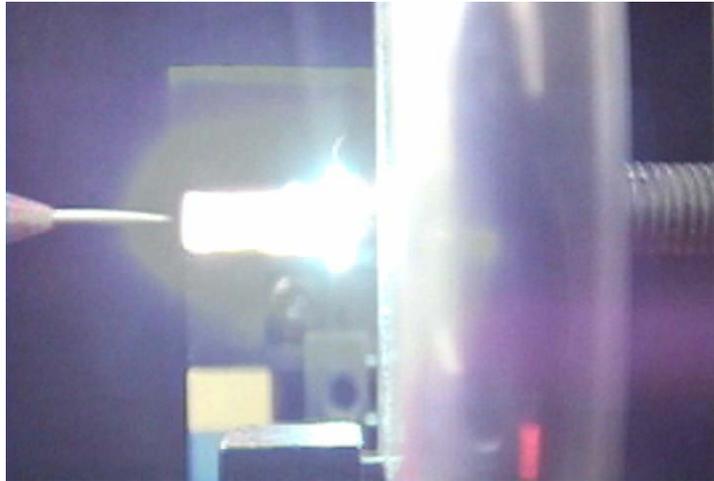


Figura Re-4 Streamer en electrodo punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámara digital.

Esta imagen es perfecta para reconstruir si tuviéramos dos como ella en sus correspondientes proyecciones de manera concurrente, no obstante, como es muy difícil de captar el streamer, sólo para dar una idea, en una de treinta descargas sólo logramos ver un streamer, las demás luces que alcanzamos a percibir, son el fenómeno conocido como luminiscencia o en muchas otras sólo son reflejos (figura Re-5).

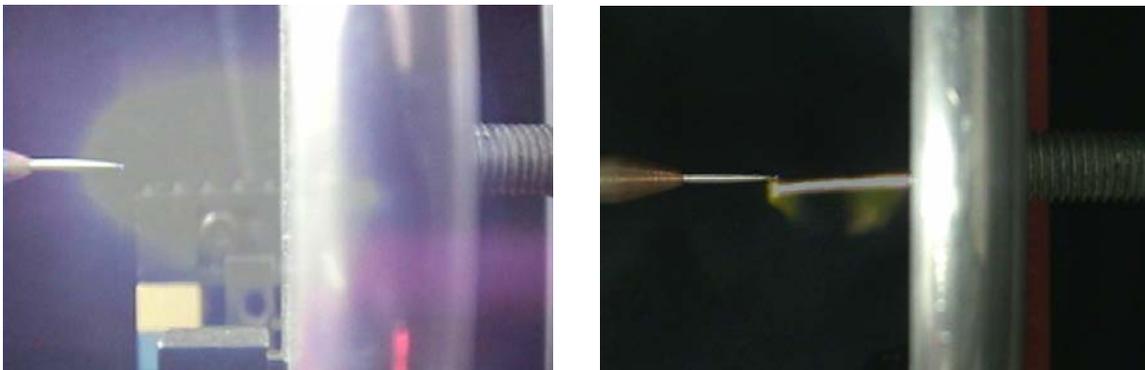


Figura Re-5 Toma de imágenes con cámara donde no se capta el streamer.
a) Luminiscencia en geometría de electrodos punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámara digital.
b) Reflejo capturado microsegundos después de la ocurrencia del fenómeno.

Al obtener estos resultados se preguntó que pasaría si la imagen que contiene el streamer (figura Re-4) se replicara y las dos se colocaran a las entradas del algoritmo de reconstrucción, el resultado fue la imagen de la figura Re-6:

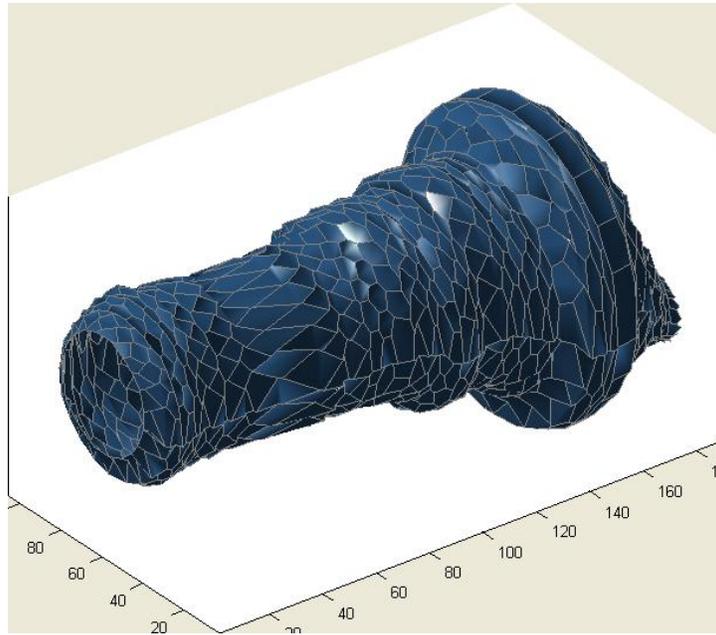


Figura Re-6 Reconstrucción de un streamer utilizando la misma imagen para la vista.

Para resolver el problema de captar el streamer con las cámaras de manera concurrente, se pensó en una solución alterna utilizando espejos, para que así en la única ocasión en la que alcanzamos a capturar el streamer, en los espejos se tuviera el streamer en las dos vistas que necesitamos, el intento fue bueno, en las siguientes imágenes veamos que paso.



Figura Re-7 a) luminiscencia en geometría de electrodos punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámara digital y arreglo de espejos.
b) streamer capturado en el electrodo y en la reflexión del espejo inferior.

Como se pudo ver no se logro obtener la reflexión en el espejo que se encuentra en el fondo seguramente es debido a la velocidad de barrido del ccd, por lo que se decidió intentar alguna otra cosa.

Dado que en trabajos anteriores han reportado streamers concurrentes usando cámaras analógicas, se regresó a usar este tipo de cámaras con la diferencia de las que se habían usado antes, de que estas fueron más modernas. Eso permitió tener un flujo digital directo a la PC por puertos firewire, esto es, ya sin pasar por la tarjeta de adquisición, eso permitió tener imágenes con una óptima resolución.

Los resultados fueron similares a lo obtenidos con las cámaras digitales, se vieron luminiscencias y reflejos, raras veces streamers, por lo que tampoco se pudo obtener un cuadro concurrente, no obstante si se pueden obtener luminiscencias concurrentes, veamos las imágenes siguientes (figura Re-8):

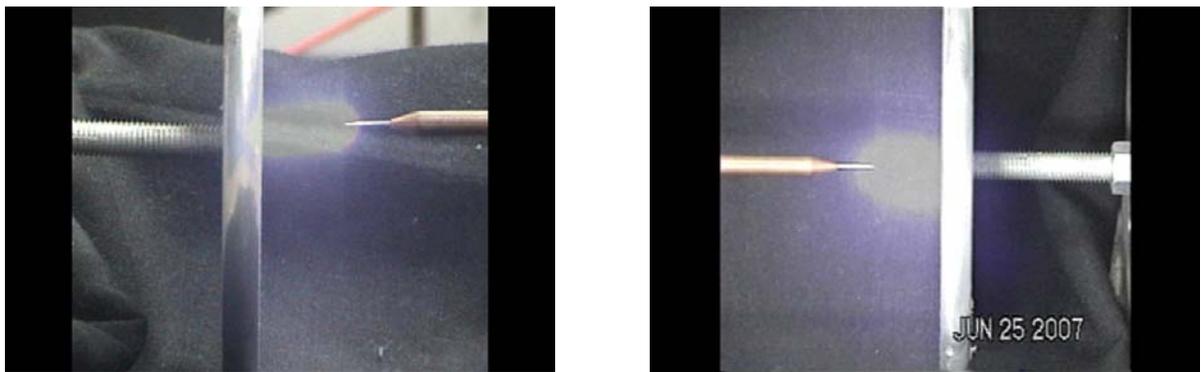


Figura Re-8 a) y b) Luminiscencia en vistas concurrentes en geometría de electrodos punta-plano con una separación de 20 mm, utilizando cámaras analógicas.

Para el proceso de segmentación de las imágenes se utilizó un proceso extra a los filtros de color, debido a que hay una parte donde termina la luminiscencia y lo demás es una emisión de luz en un tono parecido. El proceso al cual referimos es la ecualización de histograma, veamos como queda la imagen después de la ecualización.

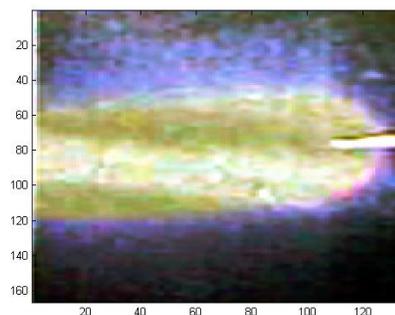


Figura Re-9 Ecualización de histograma aplicado a la descarga.

Claramente la imagen puede ser segmentada sin mucha dificultad para después aplicar los algoritmos de reconstrucción, veamos como queda la reconstrucción de una luminiscencia.

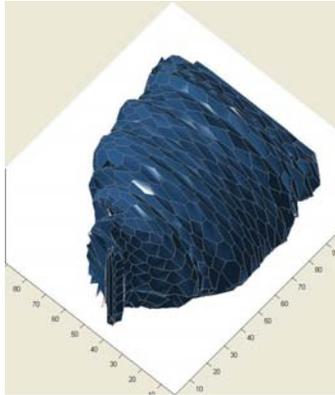


Figura Re-10. Reconstrucción de una luminiscencia.

En el anexo número uno se muestran otras luminiscencias reconstruidas, donde unas fueron obtenidas a partir de imágenes de cámaras digitales y otras de análogas.

La herramienta de software que se ha desarrollado es capaz de reconstruir descargas que no están necesariamente en geometría de electrodos punta-plano, por lo que se ha hecho también reconstrucciones en la geometría de electrodos plano-plano, en donde es más fácil visualizar un canal con el uso de un dispositivo sincronizador.

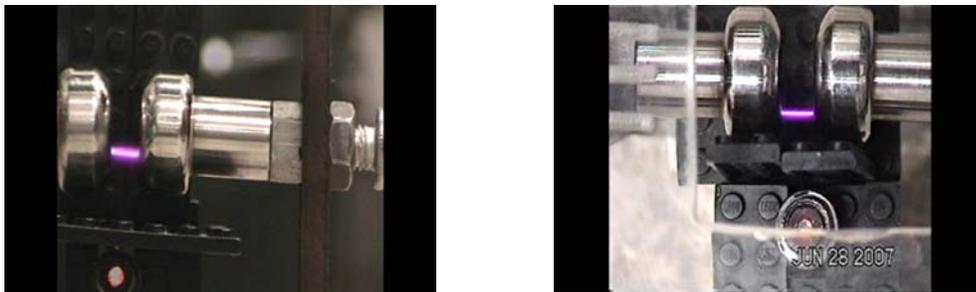


Figura Re-11 Descarga eléctrica en vistas concurrentes en geometría de electrodos plano-plano con separación de 5 mm, utilizando cámaras analógicas: a) vista lateral; b) vista superior.

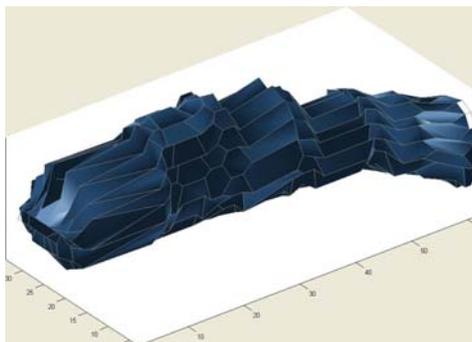


Figura Re-12 Reconstrucción tridimensional de canal a partir de las vistas concurrentes.

Al igual que las luminiscencias, se ha agregado en el anexo otros resultados de reconstrucción de canales de descarga en geometría de electrodos plano-plano.

Otro resultado obtenido tiene que ver con la obtención del número de polígonos que contiene la malla de manera teórica. Para el algoritmo propuesto para la reconstrucción de la superficie existen cuatro casos que el algoritmo tiene contemplado, estos tienen que ver con el número de cortes transversales del canal y el número de muestras que se están tomando de cada corte.

A continuación se muestra gráficamente cada uno de los casos y sus respectivas formulas.

El número de polígonos η en la malla para un número de muestras m y k secciones transversales es:

Caso 1: Si $m \geq 4, k \geq 4$ y son pares

$$\eta = \frac{m \cdot k}{4} \quad (\text{ec. Re.1})$$

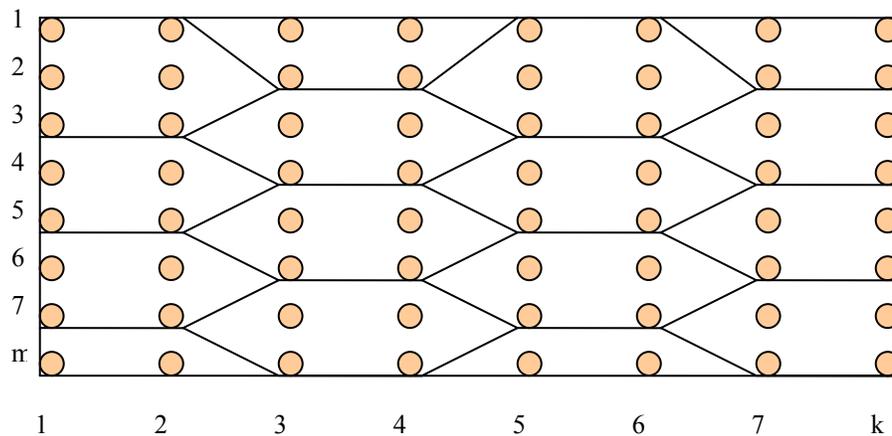


Figura Re-11. Muestreo m par y cortes k par.

Caso 2: Si $m \geq 4, k \geq 3, m$ par, k impar

$$\eta = \frac{m \cdot (k - 1)}{4} \quad (\text{ec. Re.2})$$

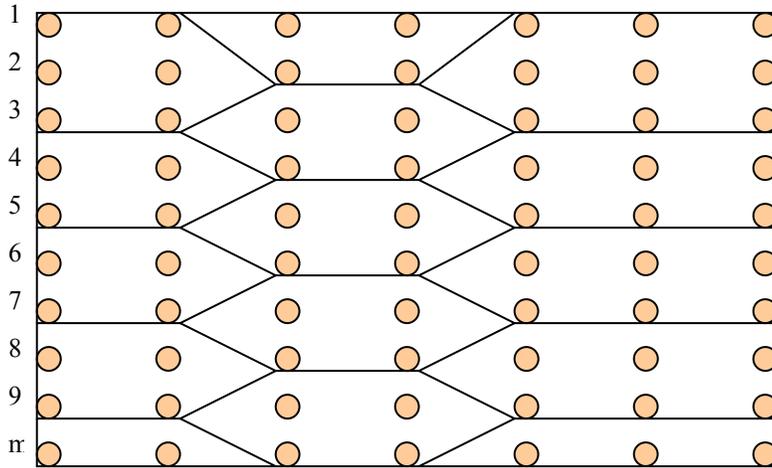


Figura Re-12 Muestreo m par y cortes k impar.

Caso 3: Si $m \geq 3, k \geq 5$, son impares

$$\eta = \begin{cases} 4 \mid k-1 & \eta = \frac{m \cdot (k-1)}{4} \\ 4 \mid k+1 & \eta = \frac{m \cdot (k-1) - 2}{4} \end{cases} \quad (\text{ec. Re.3})$$

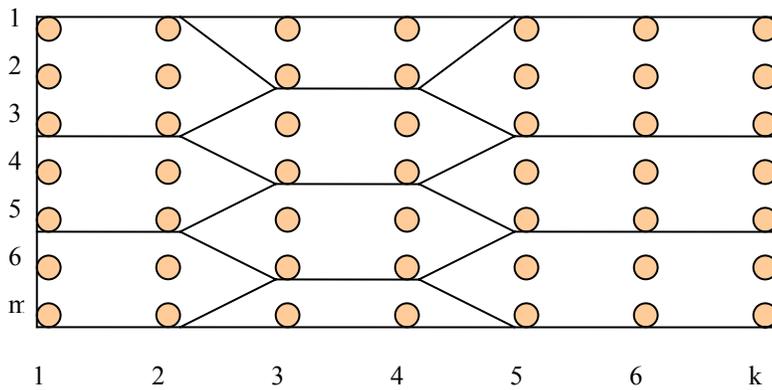


Figura Re-13 Muestreo m impar y cortes k impar.

Caso 4: Si $m \geq 3, k \geq 4, m$ impar y k par

$$\eta = \begin{cases} 4 \mid k & \eta = \frac{m \cdot k}{4} \\ 4 \mid k-2 & \eta = \frac{k \cdot m - 2}{4} \end{cases} \quad (\text{ec. Re.4})$$

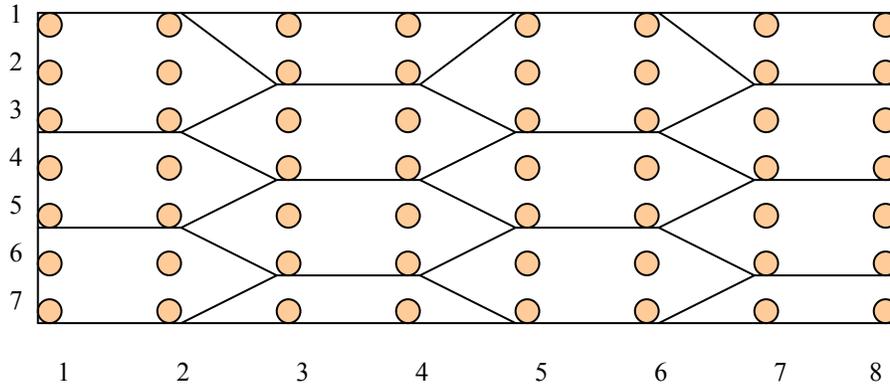


Figura Re-14 Muestreo m impar y cortes k par.

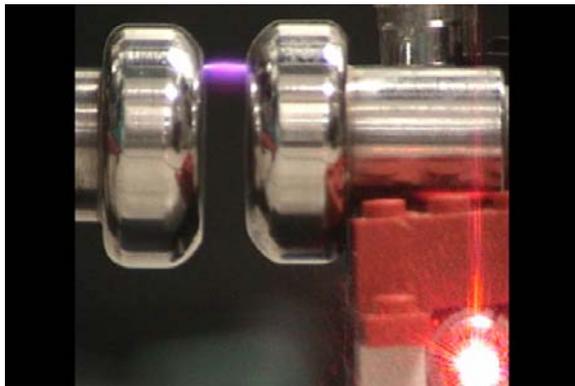
A continuación se muestran dos ejemplos de reconstrucciones reales, en el anexo 1 se podrán encontrar todas las demás pruebas realizadas.

En el primer ejemplo se tiene una descarga eléctrica en geometría de electrodos plano-plano con separación de electrodos de 5 mm (vease figura Re-15) con un voltaje aplicado de 6.27 kV, las características del ambiente fueron: 54 de humedad relativa, 24 °C, 58 torr.

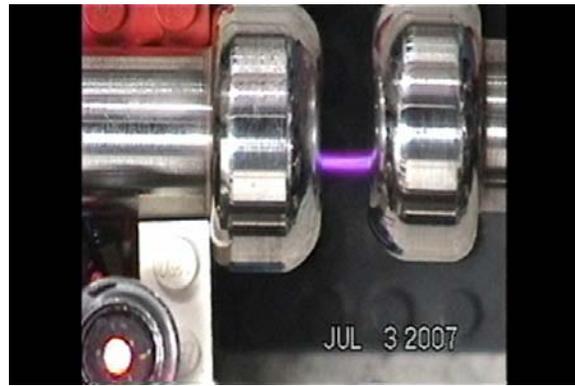
La figura Re-15(a) y Re-15(b) se tienen las imágenes originales, la vista lateral y superior correspondiente, en la parte inferior de la imagen se puede ver el sistema de iluminación para la sincronización. Esas dos imágenes pasan por una segmentación cuidadosa y se pueden apreciar en Re-15(c) y Re-15(d). En Re-15(e) se puede ver la reconstrucción de la descarga. Re-15(f) se puede ver el comportamiento del canal por secciones de 20 pixeles. La dimensión fractal para este ejemplo fue: 2.3227.

En el segundo ejemplo se tiene una descarga eléctrica en geometría de electrodos punta-plano con separación de electrodos de 20 mm (vease figura Re-16) con un voltaje aplicado de 30 kV, las características del ambiente fueron: 53 de humedad relativa, 23.5 °C, 58 torr.

En las figuras Re-16(a) y Re-16(b) se tienen las imágenes originales, la vista lateral y superior correspondiente, se debe recordar que en esta geometría de electrodos solo se pudo obtener luminiscencias concurrentes. Para obtener estas imágenes no se necesita el sistema de iluminación para sincronizar puesto que sólo es un chispazo. Dichas imágenes pasan por una segmentación cuidadosa la cual es reconstruida y se puede apreciar en Re-16(c). La dimensión fractal para este ejemplo fue: 2.6856.



(a)



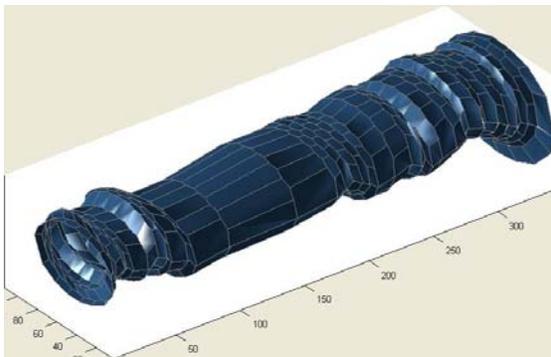
(b)



(c)



(d)

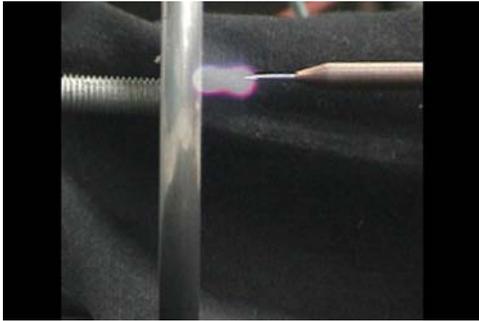


(e)

Pixeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	35.5714	23.4762	49.4762	48.4762
21-40	36.0000	17.0000	45.0000	59.0000
41-60	38.6667	21.4762	44.3333	59.6667
61-80	42.0000	23.1429	41.4762	59.0000
81-100	42.0000	22.0000	35.0000	59.0000
101-120	40.0000	22.0000	35.0000	61.0000
121-140	39.7143	22.0000	35.0000	62.7143
141-160	40.5714	22.2857	35.2857	63.5714
161-180	42.0000	25.0000	38.0000	65.0000
181-200	42.0000	22.5238	40.0000	65.0000
201-220	42.0000	17.7143	44.2857	65.0000
221-240	42.0000	25.4762	39.1429	65.0000
241-260	43.2857	25.0952	44.1429	63.7143
261-280	45.8571	23.3810	43.9524	62.8571
281-300	43.4286	21.1429	51.4286	63.5714
301-320	41.8571	22.4286	53.5714	60.5714
321-340	45.5714	28.9524	50.4762	58.0476

(f)

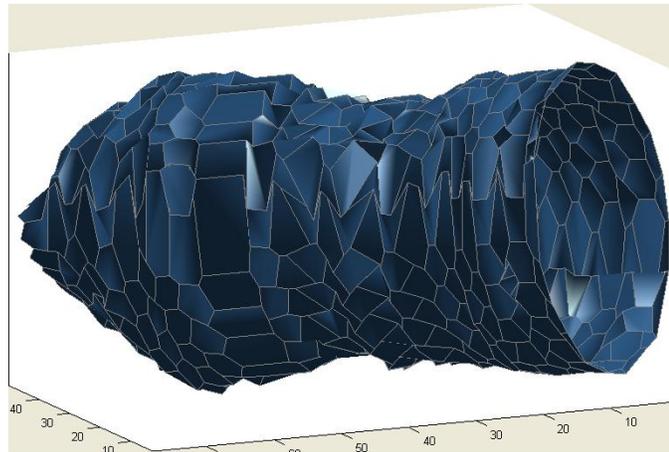
Figura Re-15 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) Vista 2D frontal y superior. c) y d) Segmentación de las descargas. e) Reconstrucción 3D del canal. f) Tabla de análisis.



(a)



(b)



(c)

Figura Re-16 Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) Vista 2D frontal y superior y c) Reconstrucción 3D de la luminiscencia.

5.1 Discusión de resultados

En los distintos trabajos revisados de descargas eléctricas en donde analizan la dimensión fractal. Reportan los siguientes valores:

En [14] reportan la dimensión fractal en una geometría de electrodos punta-plano los valores que obtienen son de alrededor de 1.75. Este valor es así porque parten de información bidimensional, entonces la dimensión fractal se esperaría entre 1 y 2. El que este valor sea cercano a dos habla de que la descarga es bastante tortuosa.

En [15] reportan la dimensión fractal en una geometría de electrodos rectangular-plano los valores que obtienen están alrededor de 1.4, esto muestra que es un tipo de descarga menos tortuosa o con menos ramificaciones que en geometría punta-plano. También obtuvieron la dimensión fractal de una simulación 3D de una geometría de electrodos circular-plano, el valor se encuentra alrededor de 2.66, este valor es así porque parten de información tridimensional, entonces la dimensión fractal se esperaría entre 2 y 3. Además el valor indica que la descarga tiene bastantes ramificaciones o la propagación es tortuosa

En [16] reportan la dimensión fractal en una geometría de electrodos punta-plano con dielectrico. Básicamente obtienen dos dimensiones fractales una alrededor de 1.40 y otra en 1.50 dependiendo de las fases y la polaridad.

Para el presente trabajo se obtuvieron las siguientes dimensiones fractales en la geometría de electrodos plano-plano. Primeramente los valores están dentro del rango esperado de 2 a 3 porque se esta trabajando en 3D. Los valores al encontrarse cercanos a 2 indican que la descarga es poco ramificada o poco tortuosa, y esto es cierto lo podemos comprobar viendo cada una de las imágenes.

2.3227	2.2250	2.2107	2.2017
2.2682	2.1407	2.1844	
2.2111	2.1587	2.2265	
2.2700	2.1944	2.1973	

También se obtuvieron dimensiones fractales para luminiscencias generadas en una geometría de electrodos punta-plano. La dimensión fractal para las luminiscencias se encontró alrededor de 2.6. Lo que indicaría que es tortuoso o ramificado, según los trabajos consultados. Pero como es una descarga diferente, aquí lo que parece estar indicando es el grosor de la luz.

Con estos resultados, es tentativo proponer un modelo de propagación en donde se incluya el parámetro de la dimensión fractal. De manera personal, creo que podría delimitar perfectamente el ángulo con el que se propaga la descarga. Y en el caso de las luminiscencias establecer una relación directamente proporcional con el volumen de la descarga.

6

Observaciones y conclusiones

En este capítulo se revisan las vicisitudes encontradas al desarrollar esta tesis, también se dan las conclusiones tras la revisión y discusión de los resultados, posteriormente se comentan los alcances del proyecto y posibles trabajos futuros.

6.1 Observaciones

Primeramente, hablando del desarrollo experimental, se observó que el área de la física se deben tener algunas precauciones que aparentemente son imperceptibles pero que sin ellas, tal vez los resultados serían erróneos, por ejemplo, el material para generar las descargas eléctricas: electrodos, soportes de los electrodos, la cámara de gas, cables para hacer conexiones de alta tensión hay que fabricarlos porque no se consiguen fácilmente; luego en la etapa de obtención de imágenes, se debe de encontrar el lugar idóneo para colocar el experimento para que tenga la iluminación correcta, además de contar con un lugar nivelado; al querer obtener imágenes ortogonales se colocaron las videocámaras así y equidistantes, una vez puestas las cámaras el electrodo plano debe quedar en paralelo a las líneas de vista, es decir que sólo se vea su grosor, porque si llegan a estar un poco inclinados se estaría haciendo una reconstrucción incorrecta, puesto que sería una proyección a cierto ángulo. Dependiendo del tipo de cámara y de descarga es necesario también agregar filtros polarizadores para evitar efectos de reflejos, además según la cámara se puede llegar a captar fenómenos diferentes tales como streamers o luminiscencias; y para acabar esta acotación física, el investigador se debe acoplar a sus recursos puesto que en este proyecto hubiese sido ideal trabajar usando cámaras ultrarrápidas.

Pasando a la parte computacional, como se sabe se trabajó con distintos tipos de descargas por lo cual se generó un software de reconstrucción bastante robusto, puesto que este debe ser capaz de trabajar con tres tipos de descarga sin ningún problema, el mayor obstáculo a

vencer fue la segmentación, el reto era hacer fácil la segmentación de la descarga para personas ajenas al procesamiento de imágenes, por lo que se implemento en la interfaz gráfica un sistema de segmentación pseudo automática en donde el usuario selecciona el color de la descarga manualmente con el botón derecho del mouse y automáticamente se segmenta, la desventaja de este método es que se pueden llegar a colar algunos reflejos. Por ello se implementó una serie de botones que tienen funciones de distintos filtros, herramientas para recortar y binarizar, para que de esta manera se haga la segmentación manual pero más precisa.

Antes de hacer la reconstrucción se debe tomar en cuenta que las imágenes de la descarga se deben normalizar, es posible que las cámaras hayan sido del mismo tipo, se hayan colocado casi equidistantes y sin ningún *zoom*, pero llega a haber ligeras diferencias por lo que es necesario normalizar.

Pasando la primera reconstrucción y después al realce, el resultado es trascendente por la calidad de la reconstrucción tridimensional. Una vez hecho el realce se tiene la opción de hacer un submuestreo o decimación para reducir la densidad de malla, hay un número por default en la interfaz que es suficiente para una buena presentación en pantalla, sin embargo, el usuario lo puede modificar al gusto. Modificar este parámetro no afecta a los cálculos de la caracterización de la descarga, puesto que para caracterizar se trabaja con la imagen volumétrica.

Las mallas simplex funcionaron bien para hacer la reconstrucción de superficie, no obstante, el coste de tiempo invertido para implementarlas fue alto, en lo personal me hubiera inclinado por mallas rectangulares puesto que creo la reconstrucción hubiera sido de la misma calidad, además con ellas sólo hubiese habido una sola formula que describiera el número de polígonos.

La obtención de la dimensión fractal y parámetros estadísticos se obtuvieron a partir de la imagen volumétrica, esto es, con el canal de la descarga lleno (puesto que pasa un flujo de electrones) no como se aprecia en pantalla que pareciera que está hueco.

Una observación de carácter general, resulta similar a la de los proyectos de reconstrucción tomográfica, y que es la necesidad de una mayor cantidad de fuentes de información, para poder generar un modelo lo más fiel al objeto real, pero en particular, cuando se está hablando del fenómeno de las descargas eléctricas, encontramos que una de sus características, a saber; la autoluminiscencia, pone en la precaria situación de no poder conocer la estructura interna o presencia de particularidades morfológicas (en particular concavidades) que no se podrían detectar por efectos de sombra, que es una de las técnicas con las que normalmente se trabaja para estos casos.

6.2 Conclusiones

De los objetivos planteados, se cumplió con la reconstrucción tridimensional de las descargas eléctricas, una representación tridimensional optimizada y su caracterización.

En congruencia con los objetivos, se comprobó el buen funcionamiento de la metodología usada para la optimización de la malla simplex.

Una aportación importante de este proyecto es la obtención de la dimensión fractal de la reconstrucción de descargas reales, que es un parámetro que no se había reportado en literatura. Existen proyectos donde trabajaron con la dimensión fractal para imágenes (2D) explicando que en futuros trabajos intentarían hacerlo en 3D, en otro obtienen la dimensión fractal 3D pero a partir de una simulación.

No se puede comparar los valores de la dimensión fractal 3D que obtuvieron de las simulaciones contra los de este trabajo, puesto que su simulación fue hecha para otro tipo de descarga. No obstante, de los valores de la dimensión fractal obtenidos (alrededor de 2.2 para configuración de electrodos plano-plano) se observa que el valor es mayor a dos y menor que tres, esto indica que es un objeto que vive en \mathfrak{R}^3 y que el decimal se encuentre alrededor de .2 habla de que es un objeto poco caótico, como claramente se ve en las reconstrucciones. Por lo que es muy probable, para un trabajo futuro pueda ser desarrollado un modelo de propagación de está descarga eléctrica donde este incluido este parámetro. ¿Qué pasaría si la dimensión fractal se obtuviera del esqueleto de la reconstrucción? Se hizo la prueba y la dimensión estuvo debajo de dos, debido a trabajar con una parte ínfima de la descarga.

El trabajo se ha concluido teniendo implementadas las herramientas que permiten presentar y caracterizar la reconstrucción 3D. Las tareas de lectura de imagen, filtrado, reconstrucción, realce, optimización, malleo y caracterización. Adicionalmente, esta herramienta se ha enriquecido con la funcionalidad de generar archivos con información del modelo 3D, que puede ser leída con una herramienta que se desarrolló como un *plus*, donde se puede hacer una animación de la descarga y jugar un poco con las iluminaciones y colores.

Las limitantes de este proyecto se centran en tres:

Información de dos planos: La información que se usa para la reconstrucción tridimensional, se basa en la obtenida de sólo dos planos, que se pueden considerar como la vista frontal y superior del fenómeno. Esto provoca que se realice una suposición sobre el contorno de las proyecciones.

Sección tubular del prisma: Al no tener información de una vista “lateral” del fenómeno, la suposición sobre el contorno de las proyecciones establece una aproximación elipsoidal del contorno.

Algoritmos enfocados para las descargas eléctricas: Los algoritmos se diseñaron para adecuarse a la información relacionada con las descargas eléctricas en donde sólo hay un canal. El tener una descarga ramificada implicaría el uso obligatorio de una cámara más además de la modificación del algoritmo de realce.

6.3 Perspectivas

Como se mostró a lo largo de la tesis, el software desarrollado es capaz de reconstruir y analizar distintos tipos de descargas, bien lo que ahora sigue es trabajar mucho con este software para que todo lo que se había estudiado en 2D ahora se trabaje en 3D y se aporten todos esos nuevos resultados; sólo por mencionar algunos tipos de investigación: descargas en CD en las dos polaridades, descargas en CA, en distintas fases de CA, en diferentes regiones de la descarga, en geometría de electrodos y dieléctrico distintos, etc.

A partir de esa serie de estudios se podrían proponer modelos de propagación de la descarga que extendieran los modelos ya conocidos obtenidos de estudios 2D, y así robustecer los modelos.

Teniendo esos nuevos modelos de propagación se podrían hacer simulaciones como comúnmente se hace, viendo cómo se comporta la trayectoria de la descarga en forma de esqueleto, pero también se podría hacer una simulación que genere modelos de descargas tridimensionales como las que en este proyecto se reconstruyeron.

Un estudio interesante que se pudiera hacer también con el mismo software es analizar el comportamiento del canal en 3D de manera temporal (fracciones de segundo) con cámaras ultrarrápidas, ese tipo de estudios son muy comunes en 2D.

Por último se pueden desarrollar nuevas versiones del software donde se agreguen nuevas herramientas para el análisis de las reconstrucciones tridimensionales según las necesidades de los investigadores.

Bibliografía

- [1] J. Batina, F. Noel, S. Lachaud, R. Peyrous and J. F. Loiseau, “Hydrodynamical simulation of the electric wind in a cylindrical vessel with positive point-to-plane device”, *Journal Of Physics D: Applied Physics*, pp. 1510-1524, Vol. 34, 2001.
- [2] D. B. Watson, S. K. Kho and K. A. Samuels, “Impulse Flashover of Air in Divergent Fields”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* pp. 1777-1779, Vol. 25, 1992.
- [3] D. B. Watson, S K Kho, K. A. Samuels and S. Chee, “Electrical flashover through heated air”, *J. Phys. D Appl. Phys.* pp. 1067-1072 Vol. 26, 1993.
- [4] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa, H. Okubo, “Impulse Partial Discharge and Breakdown Characteristics of Rod-Plane Gaps in N_2/SF_6 , Gas Mixtures”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 544-550, Vol. 9, No. 4; August 2002.
- [5] Sunao Katsuki, Hidenori Akiyama, Amr Abou-Ghazala and Karl H. Schoenbach “Parallel Streamer Discharges Between Wire and Plane Electrodes in Water”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 498-506, Vol. 9, No. 4; August 2002.
- [6] Pierre Tardiveau, Emmanuel Morode, André Agneray, “Tracking an individual streamer branch among others in a pulsed induced discharge”, *J. Phys. D: Appl. Phys.* pp. 2823-2829, Vol. 35, 2002.
- [7] David Yañez Mendoza. “Dimensión Fractal de Trayectorias de Descargas Eléctricas en Aire” En Tesis MC. - Instituto Politécnico Nacional.
- [8] Fausto, Joshua, Holly, Claudio, Gabriel, “The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 5, No. 4, October-December 2000.
- [9] Hervé Delingette, “Simplex Meshes: a General Representation for 3D Shape Reconstruction”, *Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94)*.
- [10] Hervé Delingette, “General Object Reconstruction based on Simplex Meshes”, *International Journal of Computer Vision*, 32, 111-142 (1999) Kluwer Academic Publishers, Boston. Manufactured in The Netherlands.
- [11] R. Rangel-Kuoppa, C. Avilés-Cruz, J.L. Hernández –Ávila, and R. Escarela-Pérez, “3d Reconstruction of a Spark Discharge” *37th International Universities Power Engineering Conference, Stafford, U.K., 9-11 September 2002, Conference Proceedings*, pp. 483-487, Vol. 2.

- [12] Wolfgang Niem, Marcus Steinmetz, "Camera Viewpoint Control for the Automatic Reconstruction of 3D Objects", SPIE Proceedings, Vol. 2182, 655-658, 1996.
- [13] A. Shahrokni, H. Soltanian-Zadeh, R. A. Zoorofi, "Fast Skeletonization Algorithm for 3-D Elongated Objects". Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94).
- [14] L. Niemeyer, L. Pietronero, H. J. Weismann "Fractal Dimension of Dielectric Breakdown", Vol. 52. No. 12, Phys. Rev. Lett. 52, 1033 – 1036, marzo 1984.
- [15] Ioana Ene, Cornelia Motoc, Mircea Rusu, "Fractal Models for 2D and 3D Electric Discharge" The First South-East European Symposium on "Interdisciplinary approaches in fractal analysis ", May 7-10, 2003 Bucharest, Romania.
- [16] Y. Ehara, M. Naoe, K. Urano, H. Kishida, M. Matsuyama, T. Ito, "Fractal Analysis of the Treeing Process from Luminous Discharge Image and Measurement of Discharge Magnitude", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 728-733, Vol. 5 No. 5, Oct. 1998.
- [17] Reginald D. Smith, "The fractal dimension of ionization cascades in the glow discharge" Journal Of Physics D: Applied Physics, pp. 1016-1020, 17 March 2005.
- [18] M. Petit, A. Goldman, M. Goldman, "Glow currents in a point-to-plane dielectric barrier discharge in the context of the chemical reactivity control", J. Phys. D: Appl. Phys. pp. 2969-2977, Vol. 35, 2002.
- [19] S. Hasino, "Three-Dimensional Reconstruction of Fire from Images", Master Thesis, University of Toronto.
- [20] Gonzalez and Woods, "Digital Image Processing", Second Edition, Prentice-Hall, 2002.
- [21] Sossa Azuela J. H. Apuntes de visión por computadora, Centro de Investigación en Computación del I.P.N.
- [22] B. H. P. Broks, W. J. M. Brok, J. Remy, J. J. A. M. van der Mullen, A. Benidar, L. Biennier, and F. Salama. Numerical investigation of the discharge characteristics of the pulsed discharge nozzle. Phys. Rev. E, Vol. 71, 2005.
- [23] V. Repän, M. Laana and T. Plank, "Electric Field Modelling for Point-Plane Gap" Institute of Experimental Physics and Technology, University of Tartu, Tähe 4, 51010 Tartu, Estonia.
- [24] K. Kudo, "Fractal Analysis of Electrical Trees", IEEE Transactions on dielectrics and Electrical Insulation pp. 713-728, Vol. 5 No. 5, October 1998.

- [25] Ute Ebert, Wim van Saarloos and Christiane Caroli, “Streamer Propagation as a Pattern Formation Problem: Planar Fronts”, *Physical Review Letters*, pp. 4178-4181, Vol. 77, No. 20, November 1996
- [26] J. M. K. MacAlpine, D. H. Qiu, “An Analysis of Spark Paths in Air Using 3-Dimensional Image Processing”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 331-336, Vol. 6 No. 3, June 1999.
- [27] D. H. Qiu, J. M. K. MacAlpine, “An Incremental Analysis of Spark Paths in Air Using 3-dimensional Image Processing”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, pp. 758-763, Vol. 7 No. 6, December 2000.
- [28] Th. Hinterholzer, W. Boeck, “Breakdown in SF6 influenced by Corona-Stabilization”, Institute of High Voltage Engineering and Electric Power Transmission, Technical University of Munich, 2001.
- [29] Arturo Galván Diego, Raúl Velázquez Sánchez, “Protección contra el efecto de las tormentas eléctricas de estructuras y edificios: conceptos básicos, evolución y aplicación en México”, *Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas*, pp. 200-218, septiembre-octubre del 2001.
- [30] Youl-Moon Sung, Masahisa Otsubo, and Chikahisa Honda, “ICCD Images of Laser Induced Streamer”, *IEEE transactions on plasma science*, vol. 33, no. 2, 2005.
- [31] G. Vogiatzis, P. Torr, R. Cipolla, “Bayesian Stochastic Mesh Optimisation for 3D Reconstruction”. *Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94)*.
- [32] G. Ori and G. Nathan, “Gurewich Visual C++ 6 quick start”, ebook, release 2003.
- [33] Ceballos Sierra F. J., “Microsoft Visual C++, Aplicaciones para Win32”, 2a edición, Ra-Ma, 1998.
- [34] Edward Angel, “Interactive Computer Graphics: A top-down approach”, Addison Wesley, 3rd Edition, 2003.
- [35] Akeley K., Segal M., “The OpenGL[®] Graphics System: A Specification Version 2.1”, 2006.

Anexo 1

En esta sección se muestra la reconstrucción de descargas eléctricas en dos geometrías de electrodos distintas, la primera geometría mostrada es entre electrodos plano-plano con 5 mm de separación y sus tablas de análisis correspondientes, y la segunda son reconstrucciones de luminiscencias en geometría punta-plano.

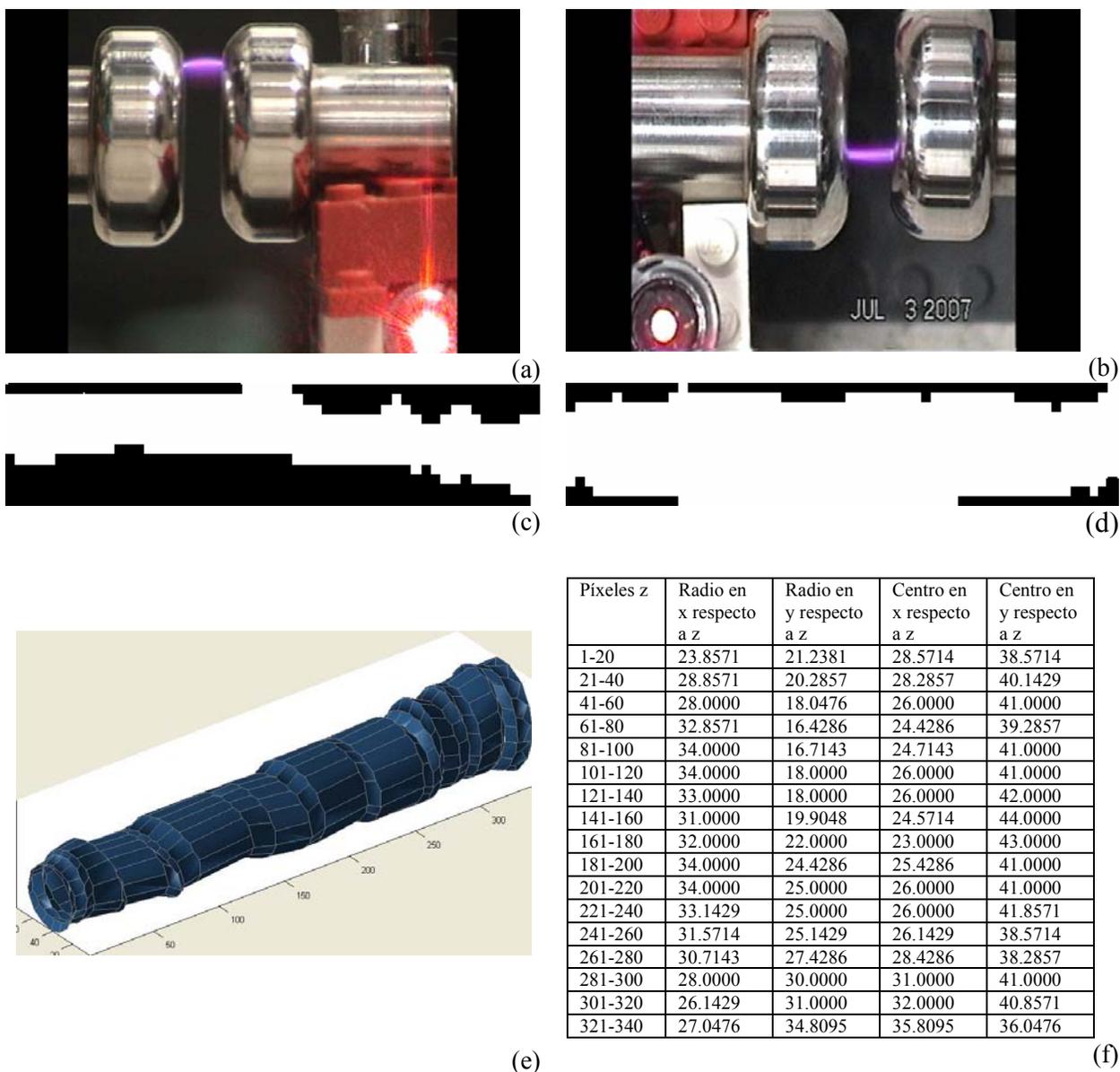


Figura Anx-1. Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2682

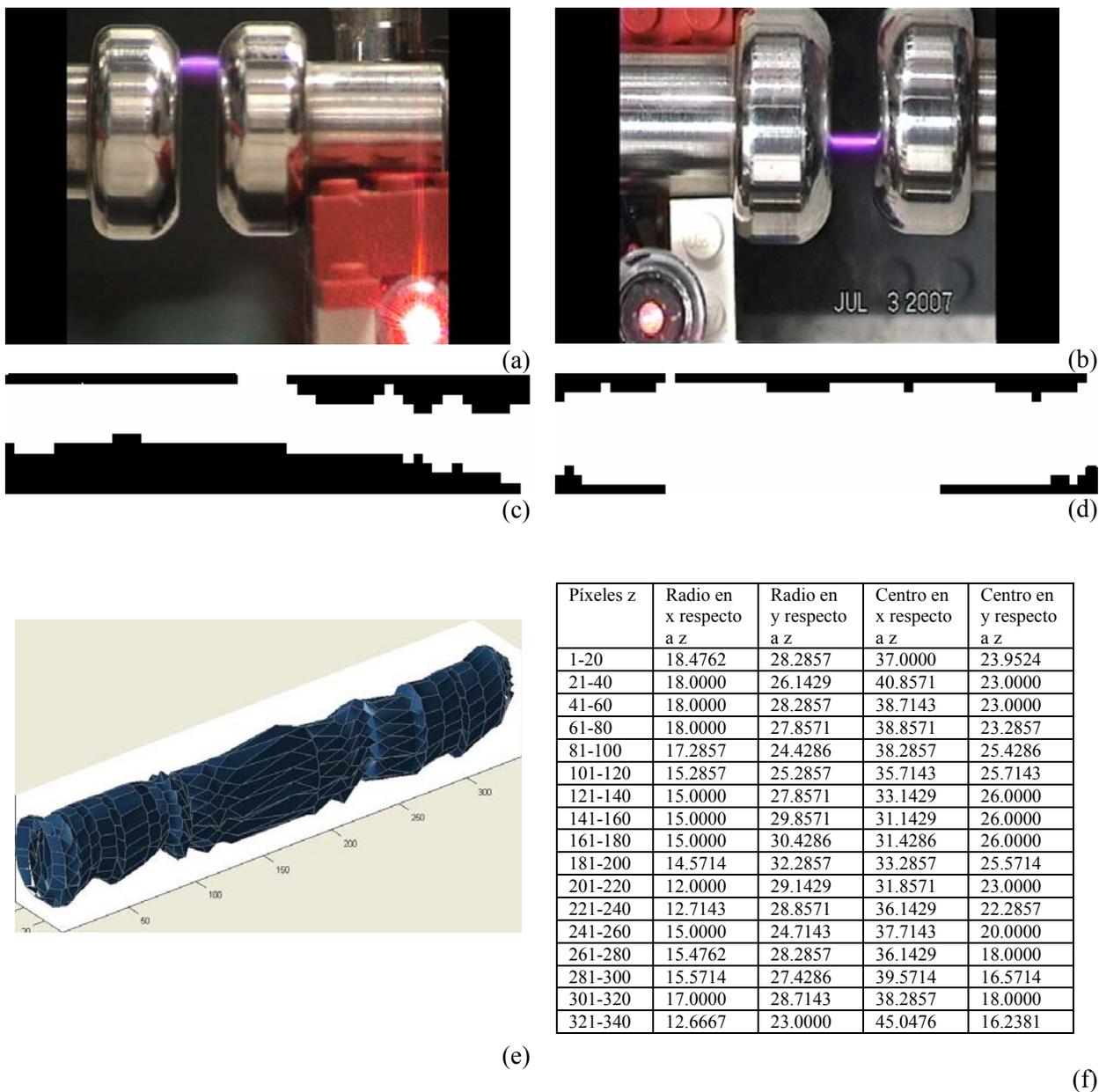


Figura Anx-2 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2111

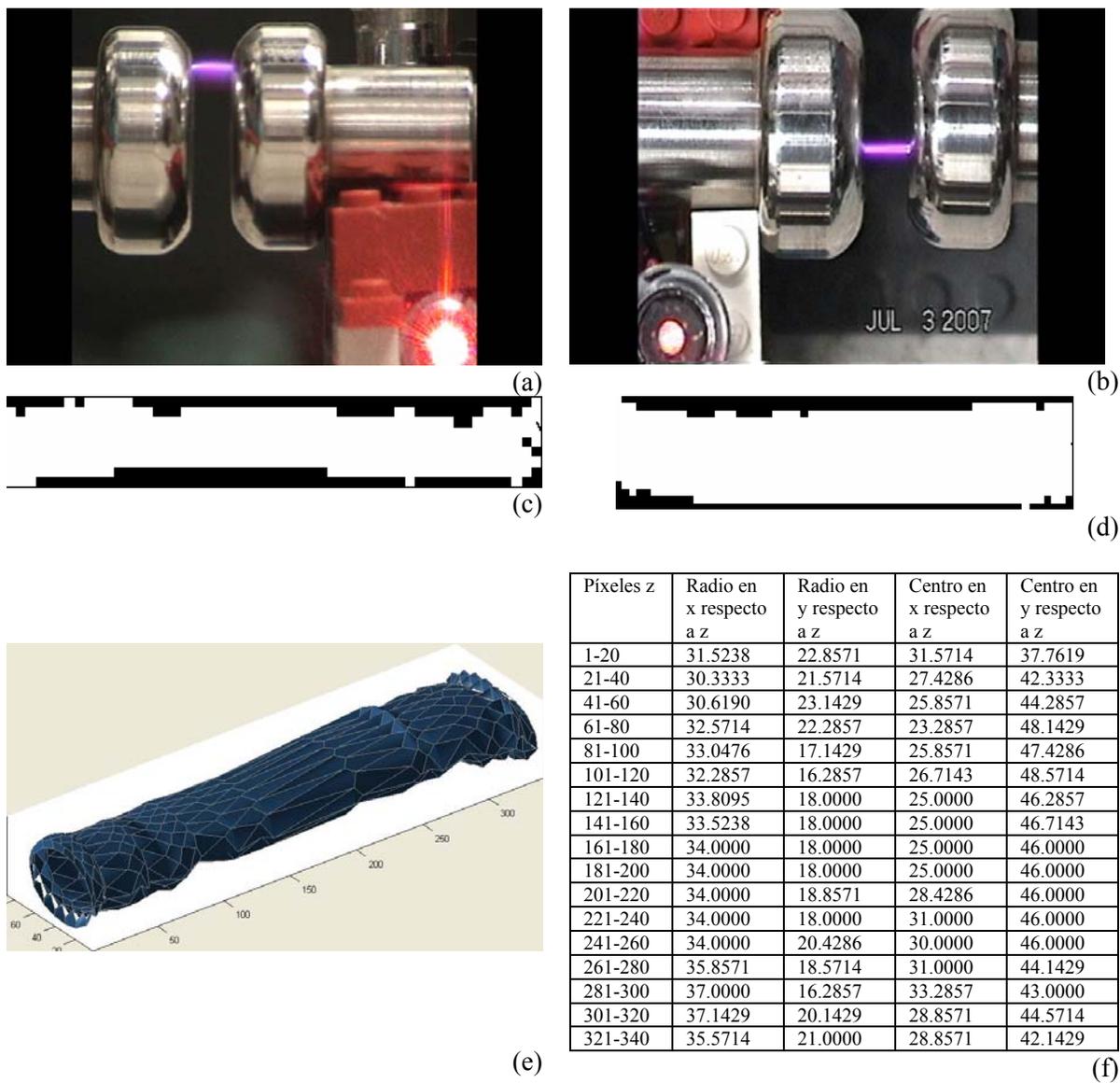
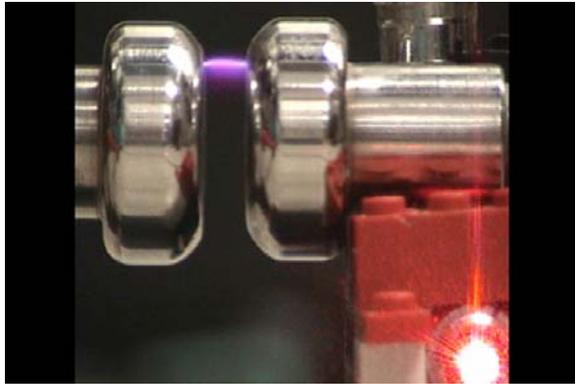
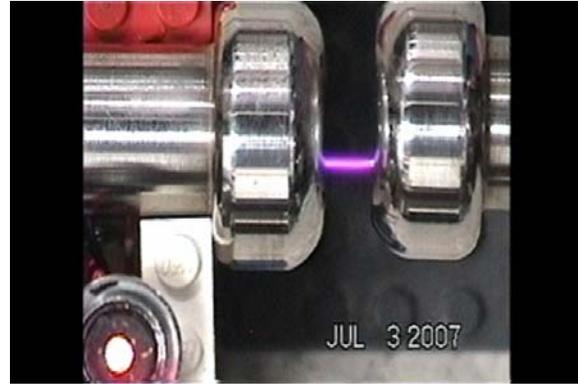


Figura Anx-3. Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2700



(a)



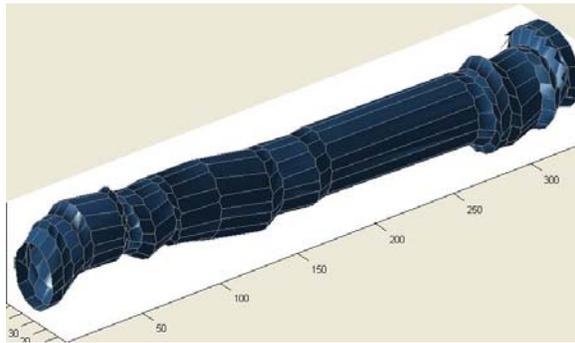
(b)



(c)



(d)



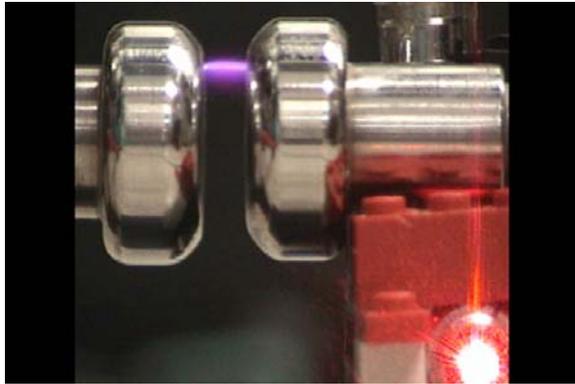
(e)

Pixeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	17.4286	19.7143	30.3333	30.4286
21-40	19.0000	18.1429	39.1429	32.0000
41-60	16.8571	17.8571	38.8571	31.2857
61-80	19.0000	17.8571	34.5238	32.0000
81-100	17.5714	18.1429	34.1429	34.1429
101-120	17.0000	20.2857	31.7143	35.0000
121-140	17.0000	22.0000	30.0000	35.0000
141-160	17.0000	21.0476	26.7143	35.0000
161-180	17.8571	19.0000	27.0000	33.7143
181-200	17.2857	19.0000	27.0000	34.5714
201-220	17.0000	19.0000	27.0000	35.0000
221-240	17.0000	19.0000	27.0000	35.0000
241-260	17.0000	19.0000	27.0000	35.0000
261-280	17.8095	19.0000	27.0000	33.8571
281-300	22.0000	23.2381	25.5714	29.0000
301-320	21.4286	21.9048	27.7143	26.4286
321-340	26.2857	21.0952	37.4286	27.2857

(f)

Figura Anx-4. Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.1973



(a)



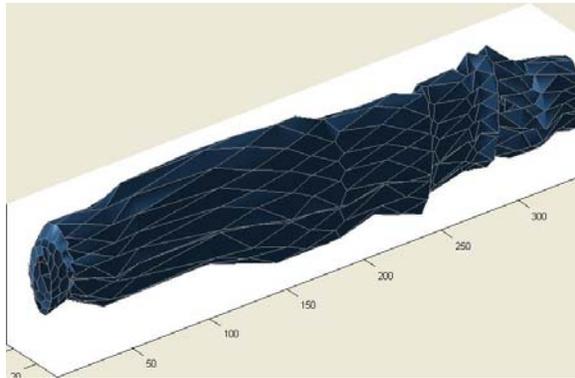
(b)



(c)



(d)

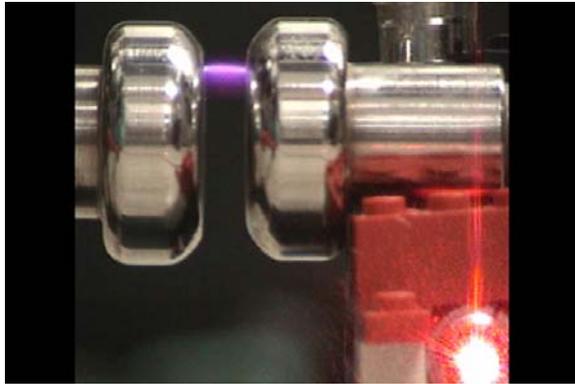


(e) (f)

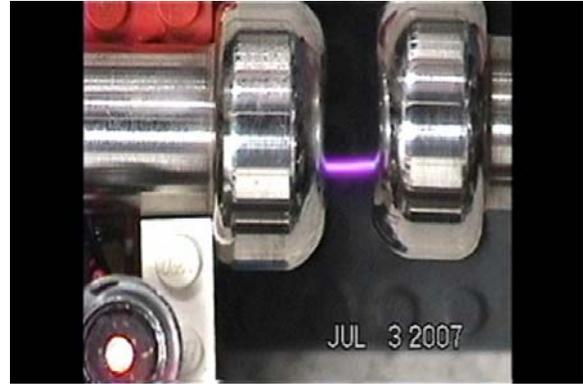
Pixeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	12.5238	19.1429	51.1429	19.9524
21-40	13.0000	24.0952	51.9048	25.0000
41-60	13.0000	28.8571	47.1429	25.0000
61-80	13.0000	33.8095	49.8095	25.0000
81-100	13.0000	34.0000	50.0000	25.0000
101-120	14.0000	34.0000	50.0000	26.0000
121-140	16.0000	34.5714	49.2381	28.0000
141-160	16.0000	37.1905	45.8095	28.0000
161-180	15.0000	41.0000	42.0000	27.0000
181-200	13.7143	39.0952	40.0952	25.7143
201-220	13.0000	37.0000	38.0000	25.0000
221-240	13.0000	34.1429	40.8571	25.0000
241-260	12.1429	35.2857	39.7143	24.1429
261-280	12.5714	32.0000	43.3333	24.5714
281-300	10.7143	33.6190	49.6190	21.2857
301-320	13.4762	29.4286	45.4286	19.7143
321-340	15.8095	23.5238	44.4762	16.8095

Figura Anx-6. Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.1944



(a)



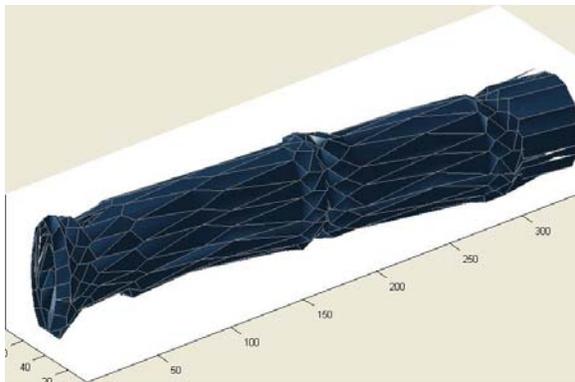
(b)



(c)



(d)



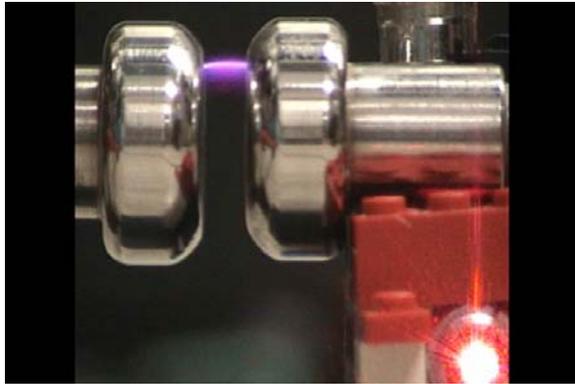
(e)

Píxeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	16.0000	35.1905	47.8095	41.4286
21-40	19.0000	26.8571	47.8571	43.0000
41-60	21.1429	26.2857	46.6190	45.1429
61-80	23.2857	29.0000	43.0000	47.2857
81-100	22.5714	29.0000	43.0000	46.5714
101-120	19.5714	29.0000	43.0000	47.6190
121-140	21.1429	29.0000	43.0000	45.1429
141-160	19.0000	29.0000	43.0000	43.0000
161-180	20.7143	30.8571	41.1429	41.5714
181-200	21.2857	31.2857	40.7143	42.4286
201-220	22.0000	29.5714	37.5714	40.0000
221-240	22.0000	29.0000	37.0000	40.0000
241-260	24.0000	29.0000	37.0000	38.0000
261-280	25.0000	29.0000	37.0000	37.0000
281-300	24.1429	30.8571	33.1905	32.8095
301-320	25.0000	26.4286	33.4286	32.0000
321-340	23.7143	26.7143	34.7143	29.5714

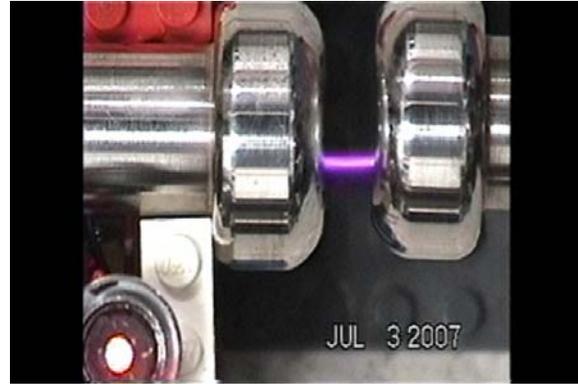
(f)

Figura Anx-5 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2250



(a)



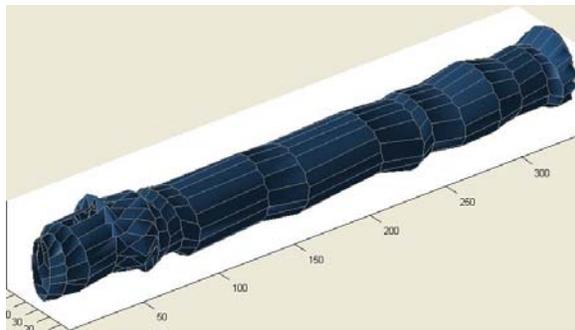
(b)



(c)



(d)



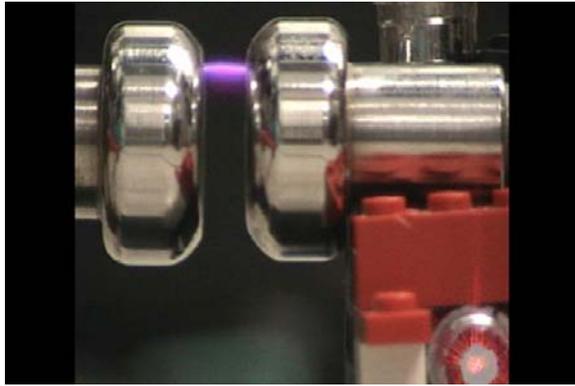
(e)

Pixeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	13.9524	19.0000	27.0000	26.7143
21-40	20.8095	19.1905	27.1905	28.2857
41-60	21.1429	20.3333	28.3333	31.7143
61-80	19.7143	19.3333	25.0000	30.2857
81-100	21.5714	17.0000	22.6667	33.5714
101-120	22.0000	19.0000	20.0000	34.0000
121-140	22.0000	19.0000	20.0000	34.0000
141-160	19.5714	19.0000	20.0000	36.4286
161-180	21.1429	19.0000	20.0000	34.8571
181-200	22.0000	19.0000	20.0000	34.0000
201-220	22.0000	18.1429	21.1429	34.0000
221-240	22.0000	16.0000	24.0000	34.0000
241-260	22.0000	17.0000	22.6667	34.0000
261-280	23.4286	16.0000	24.0000	31.8571
281-300	22.6667	17.7143	25.7143	29.6667
301-320	19.0000	16.4286	29.5714	26.0000
321-340	22.0952	16.9524	30.9524	25.9524

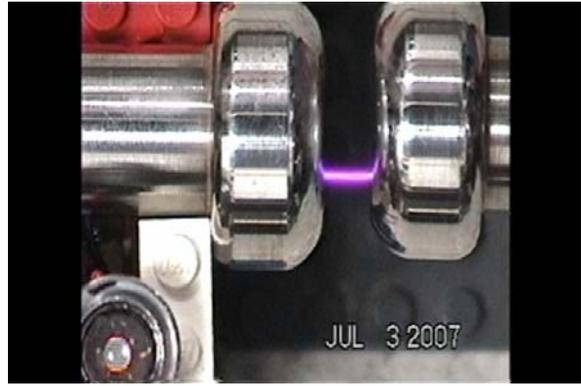
(f)

Figura Anx-6 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.1407



(a)



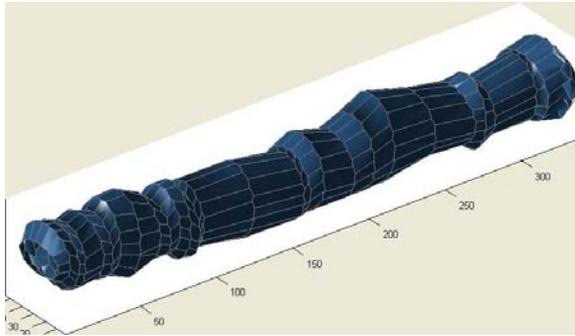
(b)



(c)



(d)



(e)

Píxeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	18.5714	14.8095	36.1429	25.5714
21-40	17.8571	19.1429	34.1429	24.8571
41-60	17.0000	23.5238	35.8571	24.0000
61-80	17.0000	20.1429	33.1429	24.0000
81-100	17.0000	20.1429	30.1429	24.5714
101-120	17.0000	19.0000	27.0000	30.0000
121-140	17.0000	20.2857	25.7143	30.0000
141-160	17.0000	22.0000	24.0000	30.0000
161-180	18.7143	20.1429	22.1429	31.7143
181-200	20.0000	21.5714	23.5714	33.0000
201-220	20.0000	20.4286	22.4286	33.0000
221-240	20.0000	25.2381	27.2381	33.0000
241-260	20.0000	22.6667	27.5238	33.0000
261-280	19.7143	18.4286	26.4286	32.7143
281-300	17.7143	17.7143	24.0000	30.7143
301-320	17.5714	16.5714	24.5714	30.2857
321-340	22.8571	19.4286	29.0952	27.0000

(f)

Figura Anx-7 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.1587

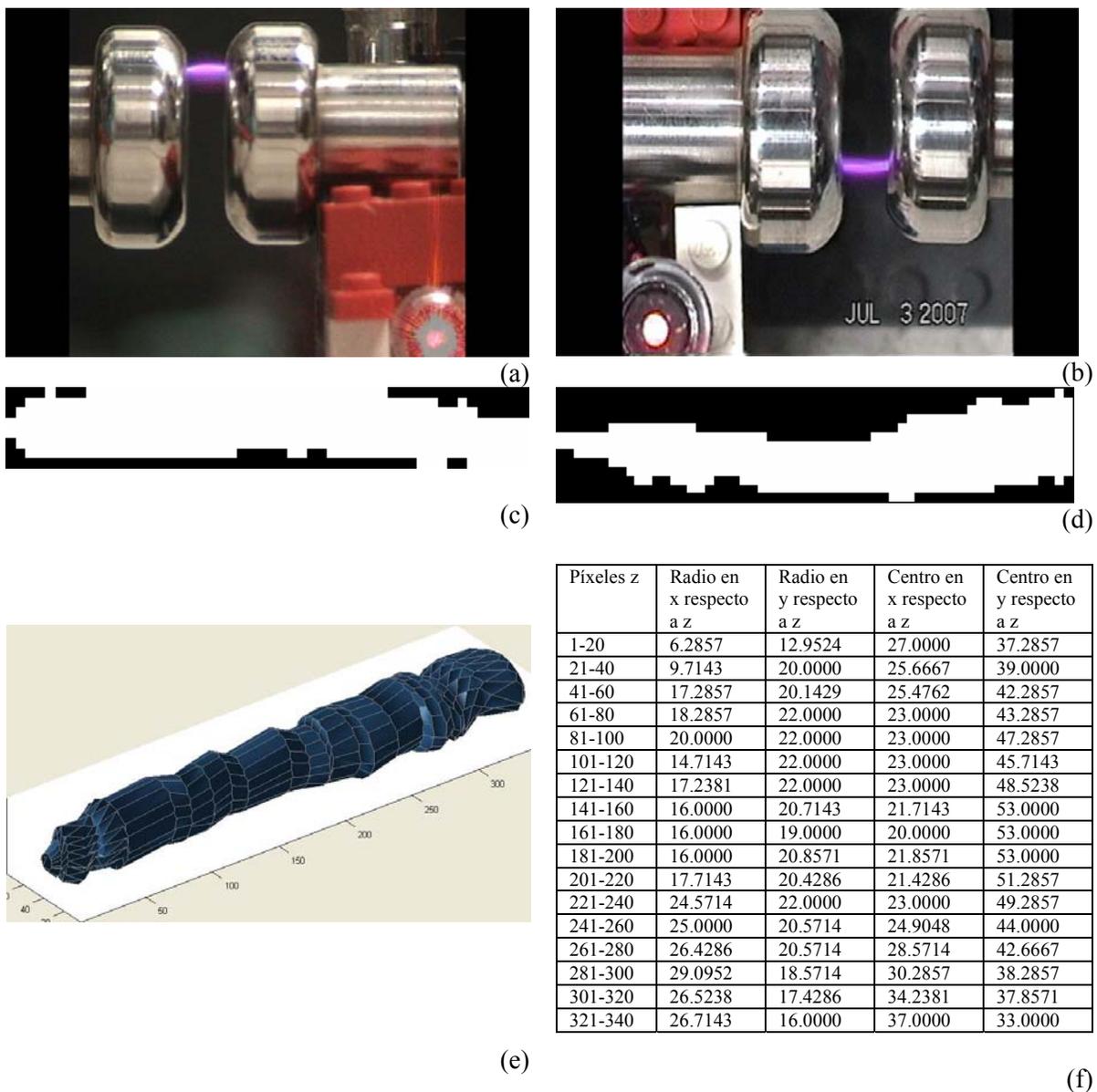
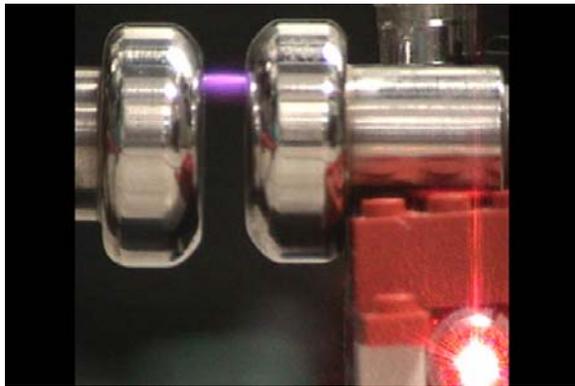
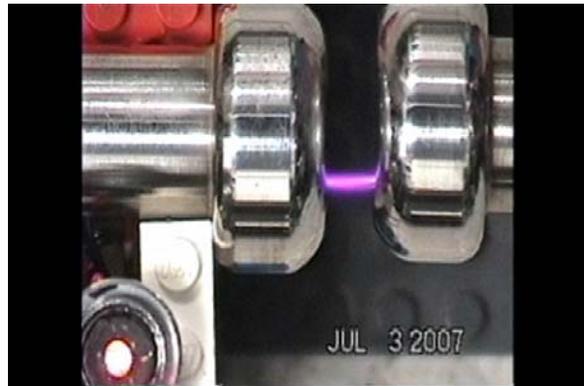


Figura Anx-8 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2107



(a)



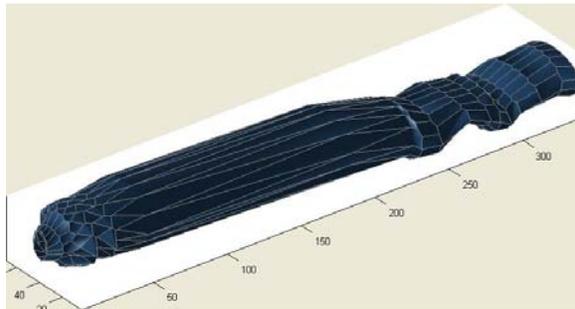
(b)



(c)



(d)



(e)

Pixeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	13.2381	12.0000	24.0000	38.0000
21-40	23.0952	16.0000	24.0000	39.4286
41-60	22.5714	16.1905	23.8571	42.5714
61-80	24.0000	20.0000	21.0000	44.0000
81-100	24.0000	20.0000	21.0000	44.0000
101-120	24.0000	20.0000	21.0000	44.0000
121-140	23.1429	20.0000	21.0000	43.1429
141-160	21.8571	20.0000	21.0000	41.8571
161-180	21.0000	20.0000	21.0000	41.0000
181-200	22.9048	20.0000	21.0000	39.5714
201-220	23.4286	20.0000	21.0000	36.4286
221-240	22.8571	18.6667	19.6667	34.1429
241-260	25.0000	14.1429	15.1429	32.0000
261-280	25.0000	8.6667	18.3333	32.0000
281-300	25.0000	10.1905	14.1905	32.0000
301-320	25.0000	7.1429	14.4762	32.0000
321-340	22.3333	11.2857	19.2857	28.1905

(f)

Figura Anx-9 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.1844

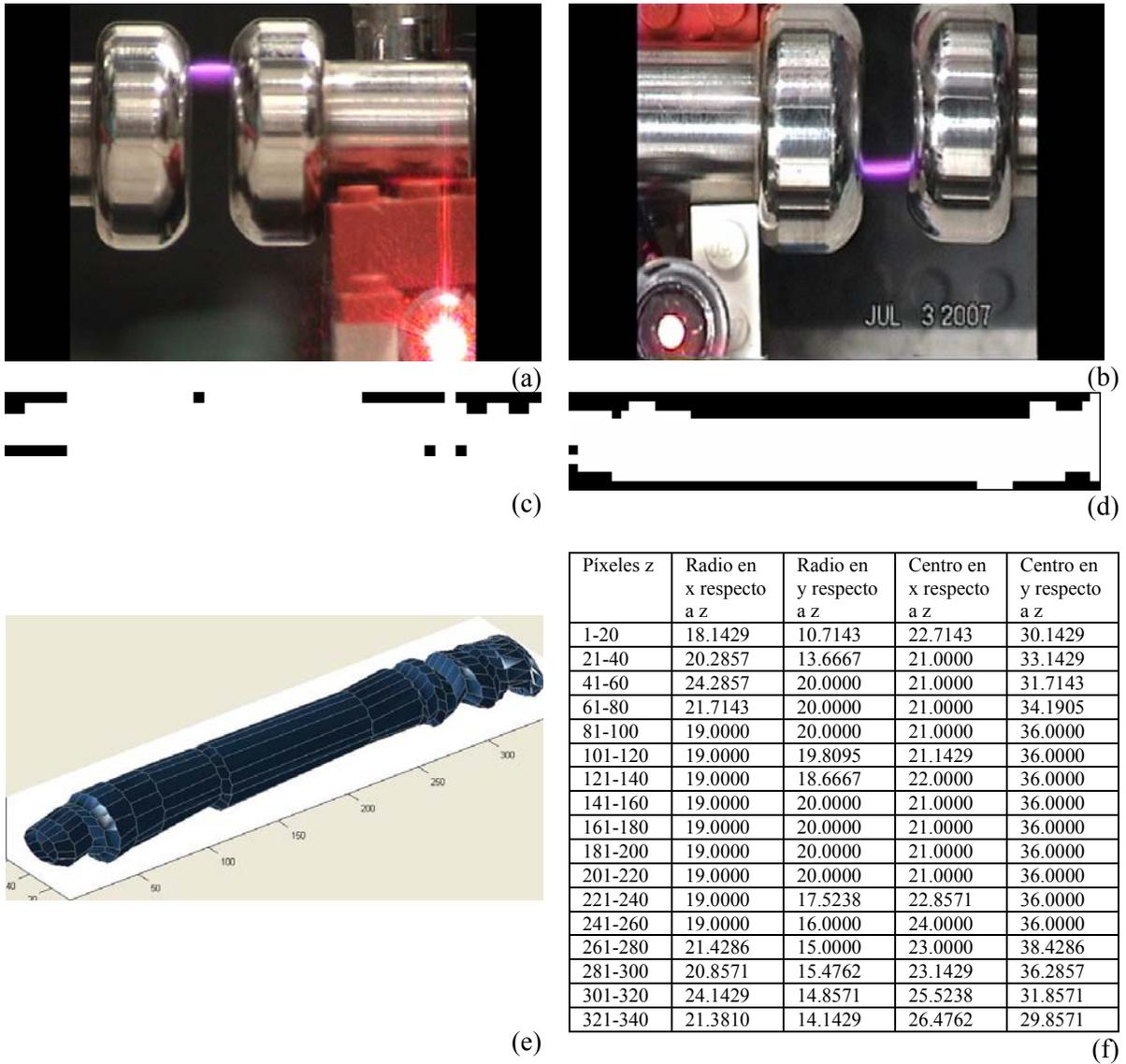
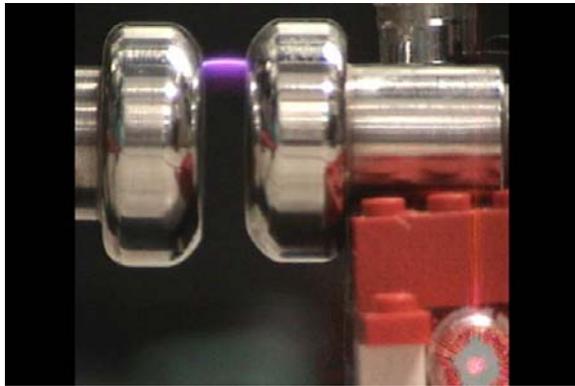
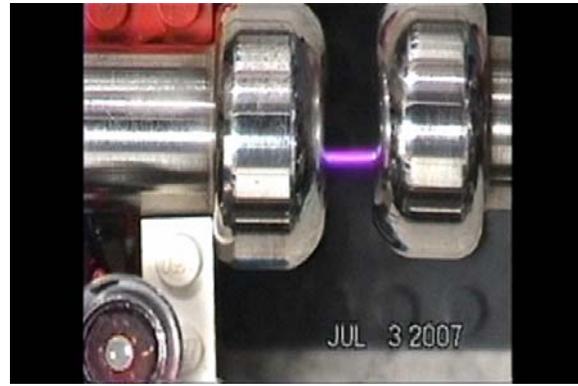


Figura Anx-10 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2265



(a)



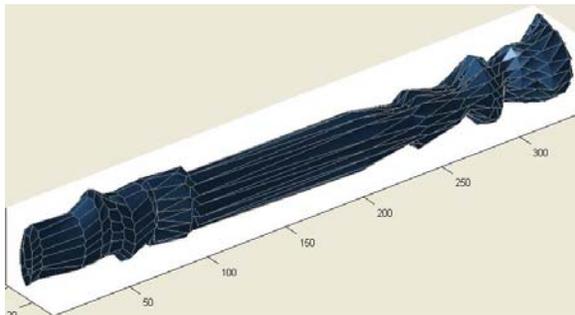
(b)



(c)



(d)



(e)

Píxeles z	Radio en x respecto a z	Radio en y respecto a z	Centro en x respecto a z	Centro en y respecto a z
1-20	7.1429	16.0000	24.0000	26.1429
21-40	9.7143	16.1429	24.1429	25.2857
41-60	13.1429	18.0000	26.0000	26.1429
61-80	13.8571	17.8571	21.5238	27.1429
81-100	11.5714	18.8571	20.1905	29.4286
101-120	11.4286	17.1429	18.1429	29.5714
121-140	11.0000	16.0000	17.0000	30.0000
141-160	11.0000	16.0000	17.0000	30.0000
161-180	11.0000	16.0000	17.0000	30.0000
181-200	11.0000	16.0000	17.0000	30.0000
201-220	12.2857	16.0000	17.0000	28.7143
221-240	14.0000	16.0000	17.0000	27.0000
241-260	14.0000	13.6667	17.0000	27.0000
261-280	14.0000	11.2857	17.7143	27.0000
281-300	12.7143	15.0476	19.6190	25.7143
301-320	11.2857	15.1429	22.1429	23.7143
321-340	15.4286	17.5714	25.5714	21.9524

(f)

Figura Anx-11 Reconstrucción tridimensional de canal. a) y b) vista 2D frontal y superior. c) y d) segmentación de las descargas. e) reconstrucción 3D del canal. f) tabla de análisis.

Dimensión fractal: 2.2017

Como resultado complementario se muestra la reconstrucción de varias luminiscencias en la geometría de electrodos punta-plano.

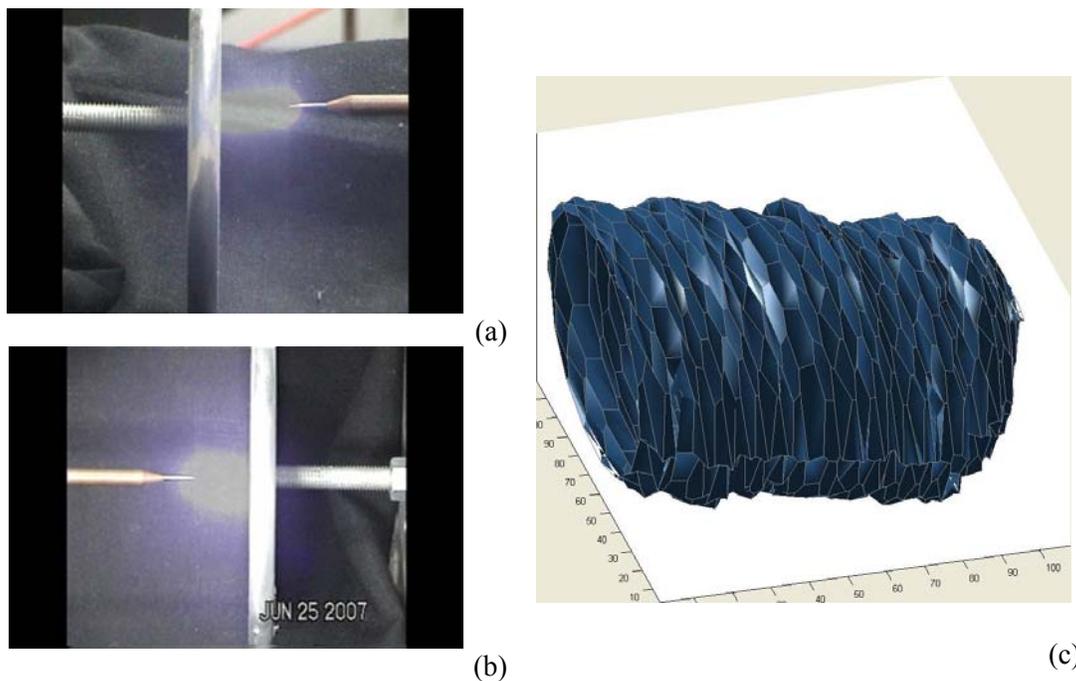


Figura Anx-12 Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.

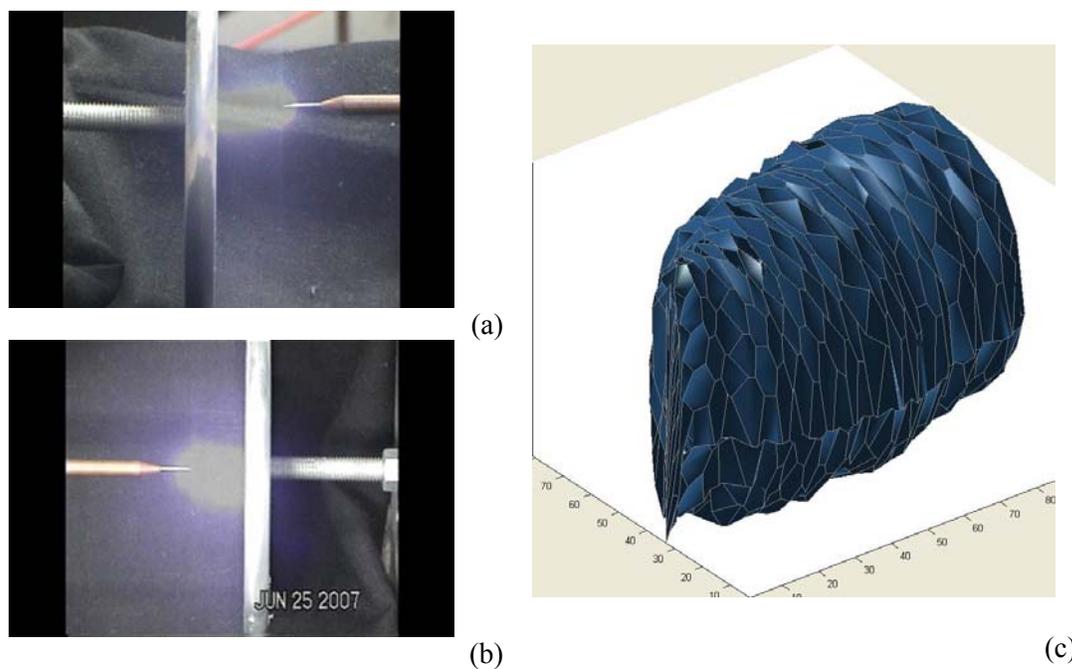
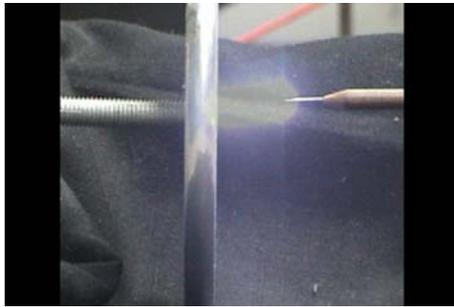
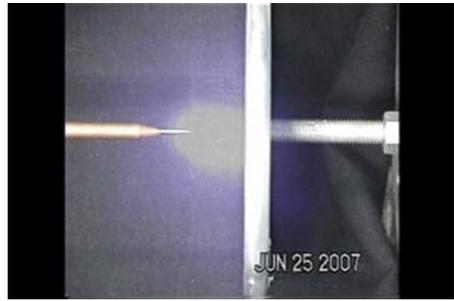


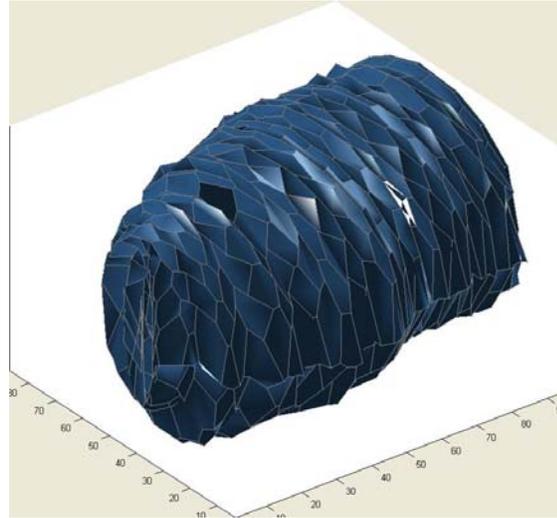
Figura Anx-13 Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.



(a)

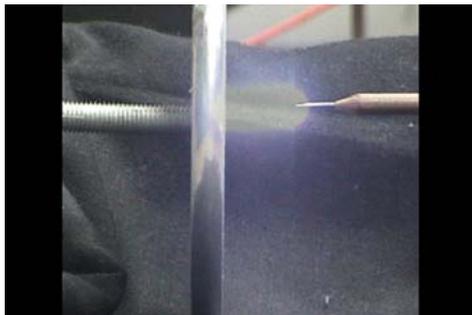


(b)

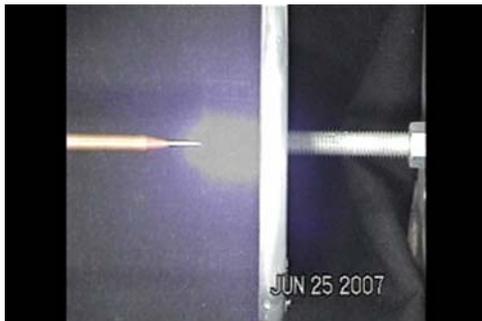


(c)

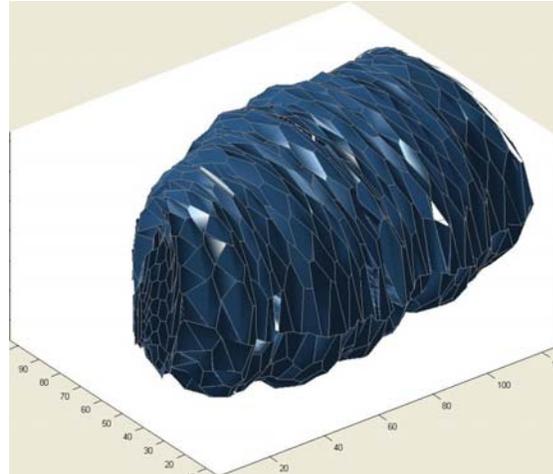
Figura Anx-14 Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.



(a)



(b)



(c)

Figura Anx-15 Reconstrucción tridimensional de luminiscencia. a) y b) vista 2D frontal y superior y c) reconstrucción 3D de la luminiscencia.

Apéndice A

Montaje eléctrico

El montaje eléctrico presentado por D. B. Watson [3] (ver figura A-1), es un montaje que permite la caracterización de las descargas eléctricas, según presencia o no de fuentes de calor, este montaje esta en un ambiente semi-controlado (ver especificaciones más adelante) que permite la captura de imágenes de las descargas eléctricas, por lo que se ajusta de modo natural al problema de este proyecto; de tener un ambiente semi-controlado para la obtención del fenómeno a estudiar (las descargas eléctricas), requiriendo una mínima adecuación para la toma de imágenes en dos planos para la reconstrucción tridimensional.

Descripción del montaje eléctrico

Este montaje ha sido usado para el estudio del comportamiento de las descargas eléctricas en presencia de fuego, para lo cual se realizaron pruebas experimentales en una configuración de electrodos punta plano.

En un sistema de electrodos punta plano, la trayectoria de la descarga sigue raramente el eje, a menudo choca con el electrodo plano a una distancia considerable del centro.

La trayectoria tomada por la descarga puede ser sumamente irregular en si misma, algunas veces brinca y se divide. Pero en contraste hay también trayectorias de descarga los cuales parecieran cruzar suavemente entre los electrodos.

Montaje de los electrodos

Se empleó un par de electrodos punta-plano, para los cuales se implementó un sistema de sujeción para poder separarlos entre ellos a las distancias d , de 2, 2.3, 2.5, 2.8 y 3 cm, como se muestra en la figura A-1.

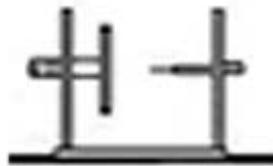


Figura A-1 Montaje de los electrodos (Distancia de separación entre los electrodos " d ")

Los electrodos anteriormente descritos están montados sobre dos placas paralelas de acrílico (figura A-1) y son sujetados por medio de un juego de tornillos y tuercas. Para

realizar los ajustes de separación 'd' entre electrodos. El armazón se hizo de manera tal que la punta sea deslizable y con ello modificar la distancia.

El esquema electrodos está aislado por una cabina de acrílico, la cual sirve para evitar perturbaciones del gas debido a la circulación de aire en el laboratorio.

Montajes eléctricos

Para energizar los electrodos se emplea una fuente controlada de alta tensión en corriente directa y polaridad positiva (Spellman, modelo SL600, 0-20 kV) conectada al plano activo a través de una resistencia limitadora (R), de $47M\Omega$, como protección de la fuente de voltaje.

El voltaje en el electrodo punta es monitoreado con ayuda de un divisor de tensión resistivo de 40 kV (Punta atenuadora BK-PR28A 1:1000 V), asociado a un voltímetro digital como se muestra en la figura A-2.

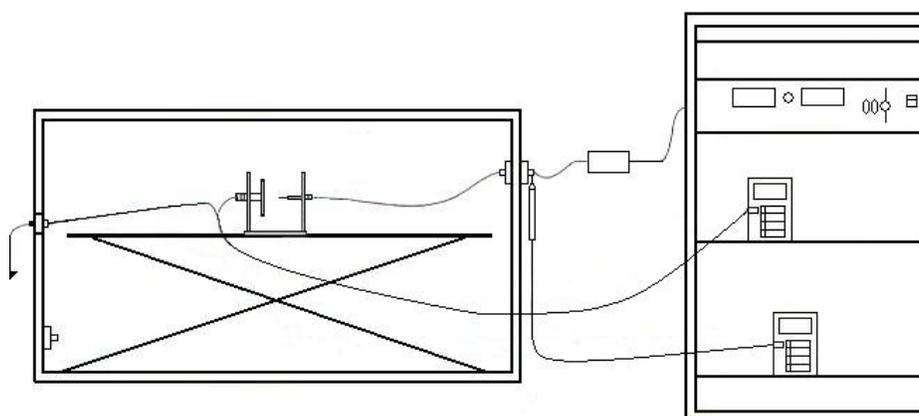


Figura A-2 Esquema ilustrativo del montaje eléctrico.

La medición de corriente de descarga se realizó empleando un electrómetro de alta impedancia de la marca Keithley, modelo 6517, conectado en el lado de baja tensión de acuerdo a lo mostrado en la misma Figura.

Con la intención de generar una descarga de mayor tamaño entre electrodos se ha aumentado un generador Marx a la salida de la fuente controlada de alta tensión con ello se puede alcanzar voltajes de 0-80 kV

Generador Marx

Un generador marx es una ingeniosa manera de cargar un número de capacitores en paralelo, y descargar a ellos en serie. Originalmente descrito por E. Marx en 1924, los generadores Marx son probablemente la manera más común de generar impulsos de alto voltaje que sobrepasen lo que se puede conseguir con las fuentes de alto voltaje disponibles. Además, alrededor de 200 kV, los capacitores de descarga llegan a ser muy caros y enormes. El siguiente circuito es muy popular donde se tiene muy buen control sobre el voltaje de impulso.

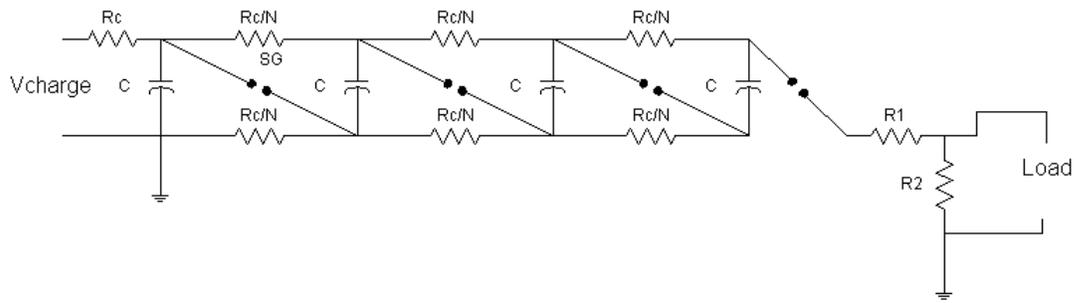


Figura A-3. Diagrama esquemático de un generador Marx.

Al aplicar un voltaje de carga al sistema, los capacitores de cada etapa se cargan a través de los resistores de carga (R_c). Cuando está cargado completamente, o el espacio entre las esferas tiene el tamaño suficiente para permitir el rompimiento de dieléctrico o es accionado por una fuente externa (siempre y cuando el espaciamiento entre electrodos sea lo suficientemente grande para que el voltaje de carga no rompa el dieléctrico).

Al activarse el generador, se conectan los dos capacitores de más a la izquierda, el sobrevoltaje rompe el dieléctrico de la siguiente esfera y entonces pone los tres capacitores en serie y así sucesivamente. Este proceso es conocido como “erigir”, un parámetro común es la capacitancia erigida del banco, que es igual a la capacitancia de cada etapa dividida por el número de etapas. Los resistores de carga se eligen para proporcionar una constante de tiempo de carga típica de varios segundos.

Apéndice B

Matlab Compiler

Matlab tiene un toolbox llamado Matlab compiler, este tiene la capacidad de crear bibliotecas compartidas, con ello funciones o algoritmos de Matlab pueden ser usados en C o C++, este toolbox se utilizó para exportar la malla simplex a Visual C++ y con esto trabajar directamente con OpenGL y obtener todos sus beneficios.

Empaquetador de bibliotecas compartidas C++

El empaquetador de bibliotecas compartidas C++ te permite crear una biblioteca compartida de un conjunto arbitrario de archivos-m. El compilador de matlab genera un archivo empaquetado y un archivo cabecera. El archivo cabecera contiene todos los puntos de entrada para todas las funciones-m compiladas. Un ejemplo de biblioteca compartida C++ lo vemos a continuación.

El procedimiento para crear una biblioteca compartida de archivos-m lo se puede realizar con el siguiente comando.

```
mcc -W cpplib:libmatrixp -T link:lib addmatrix.m multiplymatrix.m -v
```

La opción -W cpplib:<libname> llama al compilador de matlab para generar una función empaquetada para una biblioteca llamada <libname>.

La opción -T link:lib especifica cuales serán las funciones agregadas a la biblioteca.

Incorporando una biblioteca compartida dentro de una aplicación C++

Para incorporar una biblioteca compartida a C++ en la aplicación, se hará, en general, siguiendo estos pasos:

- Incluye el archivo el archivo generado para cada biblioteca en tú aplicación. Cada una de las bibliotecas compartidas tienen asociado un nombre de archivo de cabecera <libname>.h, donde libname es el nombre de la biblioteca que se usó cuando compilamos.
- Inicializa las bibliotecas de matlab llamando la función del API `mclInitializeApplication()`, debes llamar a está función solo una vez por aplicación antes de llamar a cualquier otra función de la biblioteca.
- Para cada biblioteca compartida generada por el compilador de Matlab se debe de incluir una función de inicialización, para que está haga varias inicializaciones

locales. La inicialización de la biblioteca será llamada con la función `<libname>Initialize()`.

Llama las funciones exportadas en la biblioteca como se necesiten. Usa el C MX api para procesar argumentos de entrada y salida para esas funciones.

Cuando la aplicación no necesite más la biblioteca llama a la función de terminación para liberar recursos. Será llamada `<libname>Terminate()`.

Cuando la aplicación no necesite más las bibliotecas generadas por el matlab compiler, llama `mclTerminateApplication` API function. Esta función libera los recursos a nivel de aplicación.

Manejo de errores

La interfaz para manejo de errores durante ejecución por una excepción de C++. Usa la clase `mwException` para este propósito. La aplicación puede cachar la `mwException` y consultar el metodo `what()`, para dar el mensaje de error

```
try {  
    ...  
    (llamada a la función de matlab)  
    ...  
}  
catch (const mwException& e) {  
    ...  
    (manejador de error error)  
    ...  
}
```

Apéndice C

Graficación 3D

Sistemas de Coordenadas [34]

Típicamente las aplicaciones de gráficos en 3-D usan dos tipos de sistemas de coordenadas cartesianas: mano-izquierda y mano-derecha. En ambos sistemas de coordenadas, el eje 'x' del origen a la derecha es positivo y el eje 'y' es positivo desde el origen hacia arriba.

La dirección en que se manejan los puntos, ya sea hacia o fuera de uno, es la dirección para los puntos del eje z para el sistema de coordenadas. La siguiente ilustración (figura C-1) muestra los dos sistemas de coordenadas.

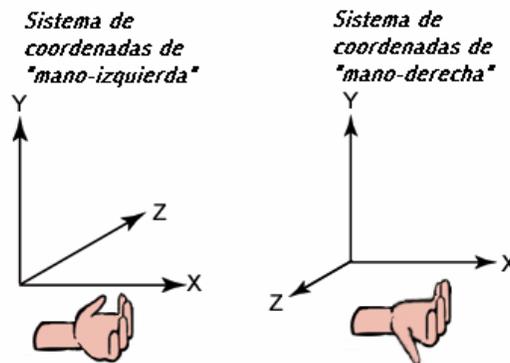


Figura C-1 Tipos de sistemas de coordenadas.

Aunque los sistemas de coordenadas de mano izquierda y mano derecha son los sistemas más comunes, hay una variedad de otros sistemas de coordenadas usadas en software 3-D.

Por ejemplo, no es raro, para aplicaciones de modelado en 3-D, usar sistemas de coordenadas en las cuales el eje 'y' va desde o hacia el observador, y el eje 'z' va hacia arriba.

En este caso, el sistema coordenado de la mano derecha esta definido como positivo a cualquier eje (x, y o z) que vaya en dirección hacia el observador. El sistema coordenado de la mano izquierda esta definido como positivo a cualquier eje (x, y o z) que vaya en dirección opuesta al observador. Si se esta usando una aplicación de modelado de mano izquierda, donde el eje z vaya hacia arriba, se tiene que hacer una rotación de todos los datos del vértice adicionalmente a los pasos anteriores.

Las operaciones esenciales ejecutadas sobre objetos definidos en sistemas de coordenadas 3-D, son traslación, rotación y escalamiento. Se pueden combinar estas transformaciones básicas para formar una matriz transformada.

Cuando se combinan estas operaciones, los resultados no son conmutativos, el orden en que se multiplican las matrices es muy importante.

Primitivas poligonales

Las primitivas poligonales son grupos de polígonos que se describen de forma conjunta para ahorrar espacio de almacenamiento y coste de visualización en tiempo real, razón por la cual son ampliamente utilizadas. Algunas de las primitivas más utilizadas son:

- **Tira de cuadriláteros:** los primeros cuatro vértices definen el primer cuadrilátero, y cada nuevo par define otro cuadrilátero formado por éste par de vértices y el anterior. Se puede ver que este tipo de primitiva ahorra, respecto de la especificación de polígonos aislados, casi la mitad de espacio. Sin embargo, tiene el inconveniente de que no se garantiza que en cada cuadrilátero los vértices sean coplanarios.

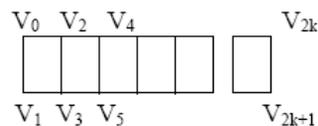


Figura C-2. Formación de tira de cuadriláteros.

Tira de triángulos: con los tres primeros puntos se construye un triángulo y los demás se forman añadiendo sucesivos puntos. Cada nuevo triángulo se forma por los tres últimos vértices añadidos, de tal forma que con N puntos se obtienen N-2 triángulos.

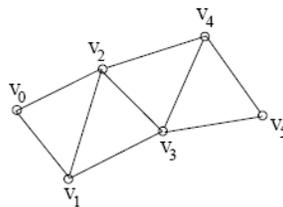


Figura C-3. Formación de tira de triángulos.

Abanico (Fan): se da un primer punto y luego el resto siguiendo un abanico. Aparecen N-2 triángulos formados por el primer vértice y los vértices $i, i+1$ (i diferente de 1). Se emplea para conseguir formas imposibles de lograr con la tira de triángulos. Esta primitiva, al igual que la anterior, tiene la ventaja de que no es necesario comprobar la coplanariedad.

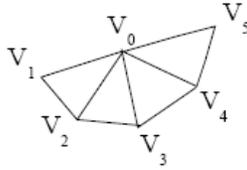


Figura C-4. Formación de abanico.

Malla rectangular. Se utiliza directamente una matriz de n por m vértices.

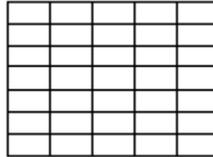


Figura C-5. Malla rectangular

Modelo de representación poligonal sobre OpenGL

La librería gráfica OpenGL es por naturaleza una librería orientada al trabajo con modelos poliédricos, por tanto será fácil realizar una representación de esta naturaleza. Puntualizaremos que se trata de una librería de funciones orientada principalmente a modelos interactivos, por ello se premia la rapidez frente al espacio, el tipo de representación poligonal que empleara será por tanto explícita. Las definiciones de primitivas poligonales en OpenGL se encierran entre las llamadas a las funciones:

glBegin(GLenum tipo_primitiva) y **glEnd**(void). Entre dichas funciones deberemos especificar la lista de vértices que componen este polígono. La función para pasar las coordenadas de cada vértice es **glVertex3fv**(GLfloat coord), donde 'coord' es un vector que contiene las tres coordenadas del vértice. Los tipos de primitiva son las constantes:

Tabla de Primitivas Gráficas OpenGL

Valor de la constante de OpenGL	Tipo de Primitiva Poligonal
GL_POINTS	Puntos aislados
GL_LINES	Líneas de dos vértices
GL_LINE_STRIP	Línea de cualquier numero de vértices
GL_LINE_LOOP	Línea Cerrada
GL_POLYGON	Polígono de Cualquier tipo
GL_TRIANGLES	Polígonos de tres lados
GL_TRIANGLE_STRIP	Tira de Triangulos
GL_QUADS	Polígonos de cuatro vertices
GL_QUAD_STRIP	Tira de Cuadrilateros
GL_TRIANGLE_FAN	Abanico de triangulos

La siguiente ilustración muestra un cubo. Dos triángulos forman cada cara del cubo. El conjunto de las formas de los triángulos forman un cubo primitivo. Se pueden aplicar texturas y materiales para las superficies de las primitivas para hacer parecer una única forma de sólido.

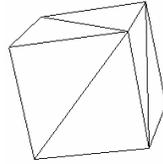


Figura C-6. Cubo representado por una malla de triángulos.

Se pueden usar triángulos para crear primitivas, donde las superficies parecen ser curvas lisas o uniformes.

La siguiente ilustración muestra como una esfera puede ser simulada con triángulos. Después de que un material es aplicado, la esfera luce como una curva cuando esta es renderizada.

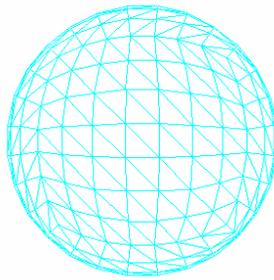


Figura C-7. Esfera simulada con triángulos.

Transformaciones 3-D

En aplicaciones que trabajan con gráficos 3-D, se pueden usar transformaciones geométricas haciendo lo siguiente:

- Indicar la localización de un objeto relativo a otro objeto
- Rotar y aumentar objetos
- Cambiar las posiciones de las vistas, direcciones y perspectivas.

Se puede transformar cualquier punto en otro punto, usando una matriz 4x4 en el siguiente ejemplo, una matriz reinterpreta un punto (x,y,z) , produciendo un nuevo punto (x', y', z') .

$$[x' y' z' 1] = [x y z 1] \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} \end{bmatrix}$$

Ejecutar las siguientes operaciones sobre (x, y, z) y la matriz produce el punto (x', y', z').

$$x' = (x \times M_{11}) + (y \times M_{21}) + (z \times M_{31}) + (1 \times M_{41})$$

$$y' = (x \times M_{12}) + (y \times M_{22}) + (z \times M_{32}) + (1 \times M_{42})$$

$$z' = (x \times M_{13}) + (y \times M_{23}) + (z \times M_{33}) + (1 \times M_{43})$$

Las transformaciones más comunes son traslación, rotación y escalamiento. Se pueden combinar las matrices que producen estos efectos en una matriz sencilla para calcular varias transformaciones a la vez. Por ejemplo, se puede construir una matriz sencilla para trasladar y rotar una serie de puntos.

Las matrices están escritas en orden renglón-columna. Una matriz que uniformemente escala los vértices a través de cada eje, conocido como escala uniforme, es representada por la siguiente matriz usando una notación matemática.

$$\begin{bmatrix} s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Traslación y Escalamiento

La siguiente transformación de un punto (x, y, z) a un nuevo punto (x', y', z').

$$[x' y' z' 1] = [x y z 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ T_x & T_y & T_z & 1 \end{bmatrix}$$

Escalamiento

La siguiente transformación escala el punto (x, y, z) por valores arbitrarios en las direcciones x-, y-, z- a un nuevo punto (x', y', z').

$$[x' y' z' 1] = [x y z 1] \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotación

Las transformaciones descritas aquí son para sistemas de coordenadas de mano izquierda, y pueden ser diferentes a las matrices de transformación que se han visto en otros lados. La siguiente transformación rota el punto (x, y, z) alrededor del eje x , produciendo un nuevo punto (x', y', z') .

$$[x' y' z' 1] = [x y z 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La siguiente transformación rota el punto alrededor del eje y

$$[x' y' z' 1] = [x y z 1] \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La siguiente transformación rota el punto alrededor del eje z

$$[x' y' z' 1] = [x y z 1] \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

En estos ejemplos de matrices, theta (θ) indica el ángulo de rotación, en radianes. Los ángulos son medidos en el sentido de las manecillas del reloj cuando se ve a lo largo de la rotación del eje hacia el origen.

Concatenación de matrices

Una ventaja de usar matrices es que uno puede combinar las matrices al multiplicarlas entre sí. Esto significa que para rotar un modelo y luego trasladarlo a alguna posición, no es necesario el aplicar dos matrices. En cambio, uno puede multiplicar las matrices de rotación y traslación para producir una matriz compuesta que contiene todos sus efectos.

Este proceso, llamado concatenación de matrices, puede ser escrito con la siguiente fórmula.

$$C = M_1 \cdot M_2 \cdot M_{n-1} \cdot M_n$$

En esta fórmula, C es la matriz compuesta que se crea, y M_1 hasta M_n son las transformaciones individuales que la matriz C contiene. En la mayoría de los casos, sólo dos o tres matrices son concatenadas, pero no hay límite.

El orden en el que las matrices se multiplican es crucial. La fórmula anterior refleja la regla de “izquierda-a-derecha” para concatenación de matrices. Esto es, los efectos visibles de las matrices que se usan para crear la matriz compuesta ocurren en el orden de izquierda a derecha. Una matriz de transformación “de mundo” típica se muestra en el siguiente ejemplo. Imaginemos que uno está creando una matriz de transformación de mundo para un platillo volador estereotípico. Probablemente uno querría el inclinar el platillo volador alrededor de sus centro (el eje y del espacio del modelo) y trasladarlo a alguna otra ubicación en la escena. Para llevar a cabo esto, uno primero crea una matriz de rotación y luego la multiplica por una matriz de traslación, como se muestra en la siguiente fórmula.

$$W = R_y \cdot T_w$$

En esta fórmula, R_y es una matriz para rotación sobre el eje y, y T_w es una traslación a otras coordenadas del mundo real.

El orden en el que se multiplican las matrices es importante ya que, a diferencia de la multiplicación de dos valores escalares, la multiplicación de matrices no es conmutativa.

La multiplicación de matrices en el orden opuesto tiene el efecto visual de una traslación del platillo volador a su posición en el espacio del mundo, y luego su rotación alrededor del origen del mundo. No importa qué tipo de matriz se está creando, hay que recordar la regla izquierda-a-derecha para asegurar de que se obtienen los efectos deseados.

La discusión de transformación de mundo introduce los conceptos básicos y provee detalles acerca de cómo configurar una matriz de transformación de mundo.

¿Qué es una transformación de mundo?

Una transformación de mundo cambia las coordenadas del modelo especial, donde los vértices están definidos en relación al origen local del modelo, a el espacio de mundo, donde los vértices están definidos en relación a un origen común a todos los objetos en la escena. En esencia, la transformación de mundo posiciona al modelo en el mundo, valga la redundancia. El siguiente diagrama ilustra la relación entre el sistema de coordenadas del mundo y el sistema de coordenadas local del modelo.

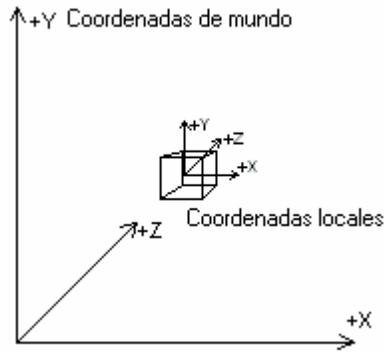


Figura C-8 Relación de coordenadas locales y coordenadas mundo.

La transformación de mundo puede incluir cualquier combinación de traslaciones, rotaciones y escalamientos.

Configurando una matriz de mundo

Aunque con cualquier otra transformación, uno puede crear la transformación de mundo al concatenar una serie de matrices de transformación en una simple matriz que contiene el total de la suma de sus efectos. En el caso más simple, cuando un modelo está en el origen del mundo y sus ejes de coordenadas locales están orientados al mismo espacio del mundo, la matriz de mundo es la matriz identidad. Más comúnmente, la matriz de mundo es una combinación de una traslación al espacio del mundo y posiblemente una o más rotaciones para girar el modelo según se necesite.

Transformación de vista

Esta sección introduce los conceptos básicos de la transformación de vista y provee los detalles de cómo configurar una matriz de transformación de vista.

¿Qué es una transformación de vista?

La transformación de vista posiciona al observador en el espacio del mundo, transformando los vértices en el espacio de la cámara. En el espacio de cámara, la cámara, u observador, está en el origen, viendo en la dirección de z positivamente. La matriz de vista reposiciona los objetos en el mundo alrededor de la posición y orientación de la cámara (el origen del espacio de cámara).

Hay muchas formas de crear la matriz de vista. En todos los casos, la cámara tiene alguna posición lógica y orientación en el espacio del mundo que es usada como posición de inicio para crear una matriz de vista que será aplicada a los modelos en la escena. La matriz de vista traslada y rota objetos para posicionarlos en el espacio de la cámara, donde la cámara está en el origen. Una forma de crear la matriz de vista es combinando una matriz de traslación con matrices de rotación para cada eje. En este enfoque se aplica la siguiente fórmula general de matrices.

$$V = T \cdot R_x \cdot R_y \cdot R_z$$

En esta fórmula, V es la matriz de vista a ser creada. T es la matriz de traslación que reposiciona los objetos en el mundo, y Rx hasta Rz son matrices de rotación que rotan los objetos a lo largo de los ejes x,y,z. Las matrices de traslación y rotación están basadas en la posición lógica de la cámara y su orientación con respecto al espacio del mundo. Así que, si la posición lógica de la cámara en el mundo es <10,20,100>, el objetivo de la matriz de traslación es mover los objetos -10 unidades a lo largo del eje x, -20 unidades a lo largo del eje y, y -100 unidades a lo largo del eje z. Las matrices de rotación en la fórmula están basadas en la orientación de la cámara, en términos de qué tanto los ejes del espacio de la cámara están rotados fuera o alineados con el espacio del mundo. Por ejemplo, si la cámara mencionada antes está apuntando directamente hacia abajo, su eje z está 90 grados fuera de alineación con el eje z del espacio del mundo, como se muestra en la siguiente figura.

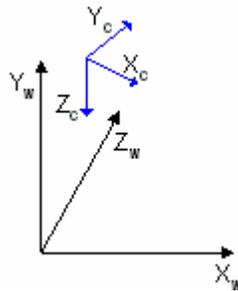


Figura C-9 Ejemplo del espacio mundo y vista no alineados.

Las matrices de rotación aplican rotaciones de igual, pero opuesta, magnitud de los modelos en la escena. La matriz de vista para esta cámara incluye una rotación de -90 grados alrededor del eje x. La matriz de rotación está combinada con la matriz de traslación para crear una matriz de vista que ajusta la posición y orientación de los objetos en la escena de forma tal que su tope está de cara hacia arriba, dando la apariencia de que la cámara está arriba del modelo.

Otro enfoque involucra la creación de la matriz de vista directamente. Este enfoque usa la posición de la cámara en el mundo y su punto de vista en la escena para derivar los vectores que describen la orientación de los ejes del espacio de coordenadas de la cámara. La posición de la cámara es sustraída del punto de visión para producir un vector para la dirección de la cámara (vector n). Entonces, el producto cruz del vector n y el eje 'y' del espacio del mundo es tomado y normalizado para producir un vector derecho (vector u). Luego, el producto cruz de los vectores u y n son tomados para determinar un vector hacia arriba (vector v). Los vectores derecho (u), arriba (v) y dirección-vista (n) describen la orientación de los ejes de coordenadas para el espacio de la cámara en términos del espacio de mundo. Los factores de traslación 'x', 'y' y 'z' son calculados al tomar el negativo del producto punto entre la posición de la cámara y los vectores u, v y n. Estos valores se ponen en la siguiente matriz para producir la matriz de vista.

$$\begin{bmatrix} u_x & v_x & n_x & 0 \\ u_y & v_y & n_y & 0 \\ u_z & v_z & n_z & 0 \\ -(u \cdot c) & -(v \cdot c) & -(n \cdot c) & 1 \end{bmatrix}$$

En esta matriz, u, v y n son los vectores de arriba, derecha y dirección-vista, y c es la posición de la cámara en el espacio del mundo. Esta matriz contiene todos los elementos necesarios para trasladar y rotar vértices del espacio de mundo al espacio de la cámara. Después de crear esta matriz, uno puede aplicar una matriz de rotación alrededor del eje z para permitir a la cámara ladearse.

Apéndice D

Detalles de la implementación [32][33][35]

Para trabajar con gráficos 3D se utilizan muchos conceptos, los cuales no se puede cubrir a fondo dentro de la tesis, sin embargo, en las referencias se puede encontrar los lugares correctos para obtener la teoría sobre ello. En ésta sección mencionaremos dos cosas que a menudo son imperceptibles, rotar una imagen en pantalla de manera manual utilizando el mouse y que no parpadee la pantalla cuando hay una animación.

Interfaz para una rotación arbitraria [33]

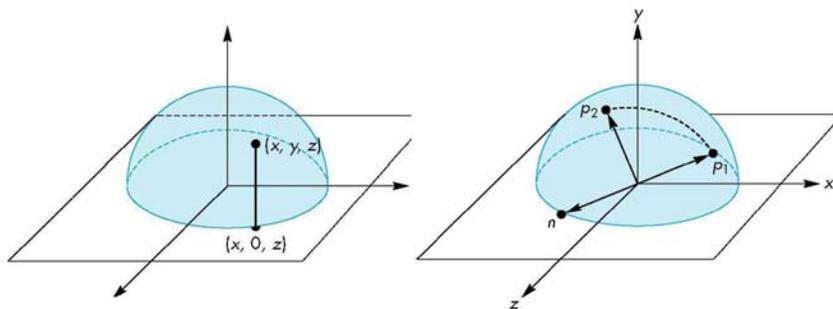
Para una rotación general 3D, necesitamos proveer el eje u y el ángulo θ . Con el objeto de usar los movimientos del ratón para lograr esto, se tienen que generar una coordenada 3D a partir de una coordenada 2D. Hay varias formas de hacer esto. Un método razonable es usar el concepto de virtual trackball. En este método puntos en 2D son mapeados sobre la hemisfera unitaria (vea figura a), para hacer esto, suponga que se tienen una entrada de posición (x,y) , entonces (x,y,z) es el punto correspondiente donde

$$z = \sqrt{1 - x^2 - y^2}$$

Sea p_1 y p_2 sean dos puntos 3D se puede simplemente formar los vectores $v_1 = P_1 - O$ y $v_2 = P_2 - O$. La normal n a ese vector es una buena selección para el eje de rotación figura (b)

$$u = n = v_1 \times v_2$$

también se usó el ángulo entre v_1 y v_2 como θ



Eliminando el parpadeo (*flickering*)

Uno de los problemas frecuentes al programar animaciones es el efecto de “flickering” ese molesto parpadeo que aparece cuando presentamos la animación. Una animación está formada por *frames*. Cada frame es una imagen estática que representa el contenido gráfico de la animación en un momento dado. Al dibujar en forma sucesiva estos frames, se tiene la sensación de movimiento y animación. Por lo general, en una animación aparecerán muchos objetos moviéndose por la pantalla a medida que cada frame es dibujado y es en ese momento donde el flickering entra en escena. Intuitivamente para hacer una animación lo primero que intentará hacer es un bucle como este:

1. Actualizar las posiciones de los objetos
2. Borrar o limpiar la pantalla
3. Dibujar cada objeto en pantalla
4. Volver a 1

El problema de este bucle es que da paso al indeseado flickering. ¿Por qué? Analicemos este bucle para ver lo que sucede en la pantalla. En el paso 1 se actualizan las coordenadas de cada objeto de la animación. En el paso 2 se limpia la pantalla para que no quede “basura” del frame anterior. Si no se hace esto cada objeto dibujado en la pantalla dejara su “rastros” al moverse.

Al terminar el paso 2, la pantalla está en blanco. Ahí es donde se genera el parpadeo, porque el usuario puede ver el instante en el que la pantalla queda vacía. Luego, en el paso 3, cada objeto es dibujado en la pantalla, esto conlleva a otro problema: si la imagen es muy complicada de dibujar y tomará mucho tiempo en hacerlo, y el usuario podrá ver cómo se va componiendo el frame.

Para solucionar este problema basta con introducir un back buffer en el que se va a pintar cada frame antes de dibujarlo en la pantalla. Un back buffer es un bitmap creado en memoria de video, que tiene el mismo tamaño de la pantalla (o del espacio asignado para la animación). Lo que se debe hacer es dibujar en el back buffer y luego hacer un “volcado” a la pantalla, es decir, pintar el back buffer en la pantalla. El nuevo bucle quedaría así:

- 1 - Actualizar las posiciones de los objetos a dibujar.
- 2 – Borrar o limpiar el back buffer.
- 3 – Dibujar cada objeto en el back buffer.
- 4 – Dibujar el back buffer en la pantalla.
- 5 – Volver a 1.

Como se puede ver, en ningún momento se está limpiando la pantalla, simplemente se pinta el frame ya construido encima del anterior. Sólo se manda a pantalla el frame cuando la imagen ya está trazada en el back buffer. Este sistema se conoce como doble buffer.

3D Optimized Reconstruction of a Point-to-Plane Spark Discharge

ANTONIO AMAYA-GARCIA¹, CARLOS AVILÉS-CRUZ¹, JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ-ÁVILA²,
RENÉ ARECHIGA-MARTÍNEZ¹

¹Departamento de Electrónica, ²Departamento de Energía
Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco
Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, C. P. 02200, Mexico D. F.
hajl@correo.azc.uam.mx, caviles@correo.azc.uam.mx

ABSTRACT

Abstract: In this paper, a new three-dimensional optimized reconstruction of a spark discharge is proposed. A Discharge process is analyzed in gas atmosphere for two different electrodes. New tools employed to characterize the electrical insulation increase the knowledge about the physical phenomena involved in the development of electrical discharge processes. This work reports the progress of a 3D reconstruction of a spark discharge. The reconstruction is based on a mesh method called Simplex. After simplex mesh reconstruction, a mesh optimization is applied to reduce the number of polygons of the polyhedron, taking into account the gradient across the channel. The 3D optimized reconstruction takes into account the orthogonal projections of images taken by two digital cameras. Such reconstruction is done with a point-plane electrode system, with distance between 3mm and 30 mm. Negative pulse voltage from 40 kV up to 70 kV was applied to the point electrode. Atmospheric air was used as electrical insulator.

Key words: discharges, 3D reconstruction, simplex method.

1 Introduction

One common process for creating a model is the characterization of a phenomenon. In this work, we are making the 3D reconstruction of spark discharges. This reconstruction process is based on the information obtained through digital images of the spark discharges. Previous works about characterization of spark discharges, based on digital images, has been reported following a two dimensional analysis [1][2]. Of particular interest is the characterization of the path of an electrical discharge, since the cause of the spark behavior could be related to the electrical field strength and to the ionized process in the head of the discharge[3][4].

We have developed a reconstruction based on a three dimensional model which has not been done before; or at least, it has never been reported. The reconstruction is based on a mesh method called *Simplex*[5]. After simplex mesh reconstruction, a mesh optimization is applied to reduce the number of polygons of the polyhedron, taking into account the gradient across the channel. 3D optimized reconstruction takes into account two orthogonal projections of images. The images were taken by two digital cameras. The 3D reconstruction phenomena is done with point-plane electrodes array at a distance between 0.3 and 3 cm. Negative pulse voltage from 40 kV up to 70 kV was applied to the point electrode. Atmospheric air was used as electrical insulator

The structure of the paper is organized as follows. Section II gives details of 3D reconstruction process, whereas the polyhedron reconstruction, based on simplex mesh methodology, are given in section III. In order to reduce the number of polygons of the polyhedron, an optimized simplex mesh are detailed in section IV. Whole spark discharge reconstruction is

presented in section V and section VI shows results of our proposed approach. Finally, future works and conclusions are presented in section VII.

2 3D Reconstruction Process

The 3D reconstruction process generates a model based on *Simplex* meshes [5]. For this, the digital images of the spark discharges are pre-processed in order to isolate the information of the phenomenon, in order to obtain a 3D model which only represents the spark discharges.

The pre-processing consists of three stages:

1. Filtering.- Using a color-based filter most of the non-phenomenon data in the images is eliminated.
2. Fitting.- Using a region-spreading algorithm, the zone of the images in which the spark discharges appear, is located.
3. Improvement.- With the projection data after the fitting stage, a set of 3D “improved” vertices is created (see ahead), over which the simplex mesh will be created.

The overall process for the 3D reconstruction is shown in Figure 1.

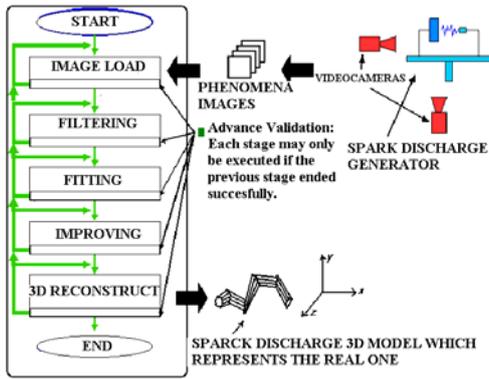


Figure 1: The overall process of the 3D reconstruction of a spark discharge

The images were taken using two video-cameras on independent recording, from which “synchronized” frames were taken.

The synchronization was implemented in two levels: a macro-synchronization based on the video tape timing and a micro-synchronization using an intermittent laser signal, which is visible in the frames.

The video-cameras were positioned in order to obtain orthogonal plane projections. This was implemented by mounting a chassis over the cameras. The chassis includes a laser diode with a beam parallel to the normal vector of the viewing plane of the camera. And using a chassis with a mirror mounted 45 degrees over horizon. The cameras were positioned orthogonally to each other, as shown in Figure 2.

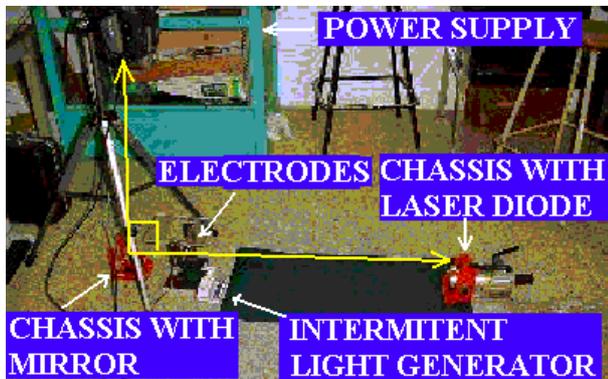


Figure 2: Scheme for image acquisition.

With the acquisition scheme implemented, we developed the pre-processing stages and the 3D reconstruction, described next.

The applied filter is:

$I_f = fc(I)$, where I_f is the image after filtering, and I , the original image. The color filter is defined as:

$$fc(I) = \{p \in I \text{ IF } \partial_{R-} \leq R(p) \leq \partial_{R+} \text{ AND } \partial_{G-} \leq G(p) \leq \partial_{G+} \text{ AND } \partial_{B-} \leq B(p) \leq \partial_{B+}\} \quad (1)$$

Where $R(p), G(p), B(p)$ are the values for the Red, Green and Blue components of the p pixel respectively, and $R(p), G(p), B(p) \in [0, 255]$.

p is any pixel in the image and $\partial_{R-}, \partial_{R+}, \partial_{G-}, \partial_{G+}, \partial_{B-}, \partial_{B+}$ are the minimal and maximal thresholds for each color band, and $\partial_{R-} \leq \partial_{R+}, \partial_{G-} \leq \partial_{G+}, \partial_{B-} \leq \partial_{B+}$.

For the fitting stage we first look for a pixel that satisfies the next criteria:

$$\begin{aligned} &(\partial_{R-} + \Delta r) \leq R(q) \leq (\partial_{R+} - \Delta r) \text{ AND} \\ &(\partial_{G-} + \Delta r) \leq G(q) \leq (\partial_{G+} - \Delta r) \text{ AND} \\ &(\partial_{B-} + \Delta r) \leq B(q) \leq (\partial_{B+} - \Delta r) \\ &\forall \Delta r \in [0, \dots, 255] \end{aligned} \quad (2)$$

Where Δr restricts the range of the filter. A pixel that satisfies these criteria is named the “root” pixel and is used to define the image after fitting, as follows:

$I_e = En(I_f)$ where

$$En(I_f) = \{p \in I_f \text{ IF there is a path of } 8_neighbors \text{ of } p \text{ "root" pixel AND}$$

$$\begin{aligned} &\partial_{R-} \leq R(t) \leq \partial_{R+}, \partial_{G-} \leq G(t) \leq \partial_{G+}, \\ &\partial_{B-} \leq B(t) \leq \partial_{B+} \text{ y } \partial_{R-} \leq R(p) \leq \partial_{R+}, \\ &\partial_{G-} \leq G(p) \leq \partial_{G+} \text{ y } \partial_{B-} \leq B(p) \leq \partial_{B+}\} \end{aligned} \quad (3)$$

Where t is an element of the path that is being constructed. It is said that a pixel ‘q’ is an 8_neighbor of an ‘r’ pixel if ‘q’ is adjacent horizontal, vertical or diagonally to ‘r’.

Experimentally it was determined that:

$$\begin{aligned} &\partial_{R-} = 52, \partial_{R+} = 255, \partial_{G-} = 6, \partial_{G+} = 170, \\ &\partial_{B-} = 4, \partial_{B+} = 255, \Delta r = 5 \end{aligned} \quad (4)$$

had a good response, but these parameters are variable.

The improvement stage generates a set of 3D vertices, $V_r \in \mathcal{R}^3$ and is described next:

Define $\Delta x, i$ as the number of horizontal pixels with information of the phenomenon in the image of the frontal view, for i pixel column. and $\Delta y, j$ number of vertical pixels with information of the phenomena in the image of the top view, for the j column of pixels. As shown in Figure 3.

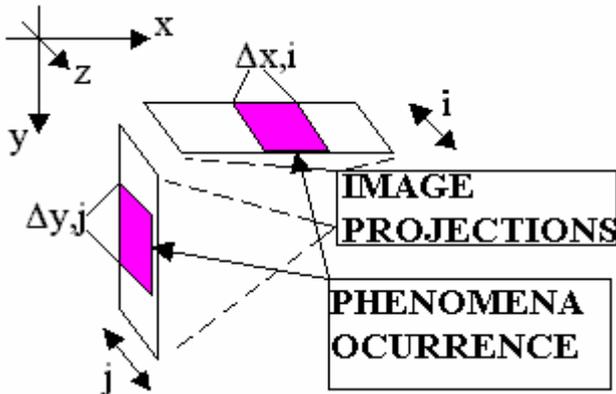


Figure 3: Parameters of the projections

$\Delta x, i$ and $\Delta y, j$ are used to define the minor and mayor radius of the ellipse in whose perimeter are distributed the vertices that define the shape of the 3D model.

Now, let $X(P_{i,j}), Y(P_{i,j}), Z(P_{i,j})$ be the X, Y and Z components of a 3D point $P \in \mathfrak{R}^3$. Then, based on these definitions, we say that the vertices set $V_r \in \mathfrak{R}^3$, that are obtained after the improving stage is given by: $V_r = V_{hs} \cup V_{hi} \cup V_{li} \cup V_{ld}$, where: (5)

$V_{hs} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid X(v)$ is the X coordinate of a non-zero pixel in the top image in column i and $Y(v)$ is the $\max(\text{all non-zero pixels in the frontal image, in } i \text{ column}), I=[0,1,2 \dots (\text{length of frontal image})-1]$

$V_{hi} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid X(v)$ is the X coordinate of a non-zero pixel in the top image in column i and $Y(v)$ is the $\min(\text{all non-zero pixels in the frontal image, in } i \text{ column}), I=[0,1,2 \dots (\text{length of frontal image})-1]$

$V_{li} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid Y(v)$ is the Y coordinate of a non-zero pixel in the frontal image, in column j and $X(v)$ is the $\max(\text{all non-zero pixels in the top image, in } j \text{ column}), j=[0,1,2, \dots (\text{length of top image})-1]$

$V_{ld} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid Y(v)$ is the Y coordinate of a non-zero pixel in the frontal image, in column j and $X(v)$ is the $\min(\text{all non-zero pixels in the top image, in } j \text{ column}), j=[0,1,2, \dots (\text{length of top image})-1]$

With this we have all the pixels that define the shape of the projected volume. But this volume has a rectangular shape, so we also adjust it to an ellipsoidal one, as shown in Figure 4.

If $V_{si} = \{v \in V_r \mid Z(v) = i\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, we adjust each element of each V_{si} with:

Let $v_k \in V_{si}$ with $k=[0,1,2, \dots, |V_{si}|-1]$, then

$$X(v_k) = 0.5 * \max(X(v_m) - X(v_n)) * \sin(k * 360), \quad (6)$$

$$Y(v_k) = 0.5 * \max(Y(v_m) - Y(v_n)) * \cos(k * 360), \quad (7)$$

$$v_m, v_n \in V_{si}$$

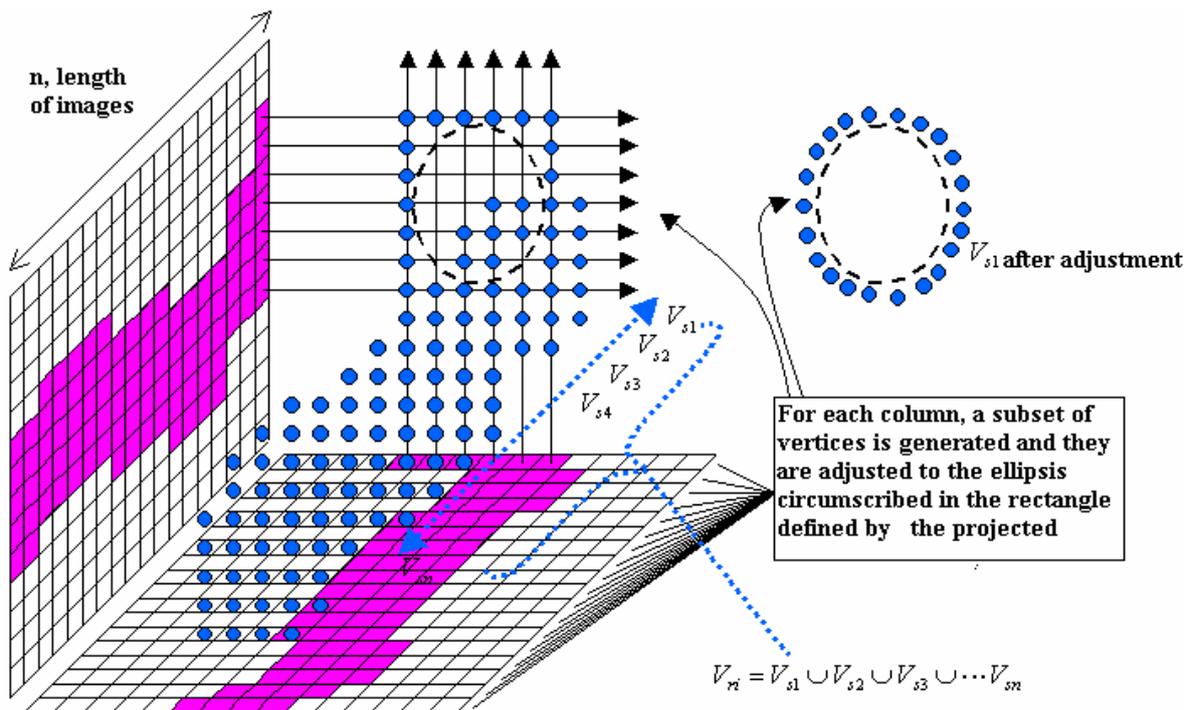


Figure 4: Shape vertices representation.

Leaving $V_{ri} = V_{s1} \cup V_{s2} \cup V_{s3} \cup \dots \cup V_{sn}$ as the set of vertices that define the shape of the 3D model, but this is not finished yet, because we still have to define the edges that connect the vertices, so that the model is a simplex mesh.

The 3D reconstruction defines edges that connect vertices, following the next rules:

3 Polyhedron Reconstruction

Starting from the top and lateral orthogonal views, the 3D cylindrical polyhedron reconstruction is done; so we have a continuous 2D function (explained in the previous chapter). Now the mesh reconstruction is done. The cylinder can be sampled by n -images (longitudinally) and by m samples per image (see Figures 5 and 6). Then the Mesh reconstruction is applied. We have used simplex mesh methodology at 2-simplex mesh configuration; it means that each polyhedron vertex could be connected with other three vertices, as it can be seen in figure 6.

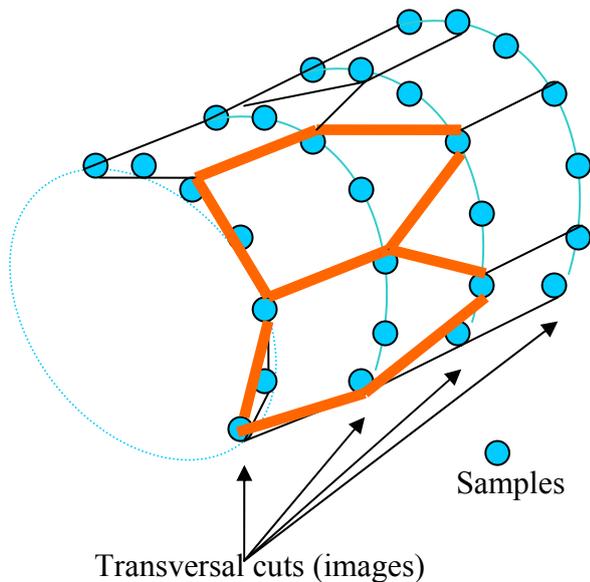


Figure 5: Sampling over cylinder: n -images (longitudinally) and m samples per image.

Ideally, the number of polygons η is determined as a function of two parameters, the first one is the number of images taken n (transversal cuts number), and the second one is the number of samples m taken per image. The number of polygons η can be estimated by the followings equations:

Case 1) when the number of images is an even number, and the number of samples is even number, for $m \geq 4$, and $n \geq 4$:

$$\eta = \frac{m \cdot n}{4} \tag{8}$$

Case 2) when the number of images is an odd number and the number of samples is an even number, for $m \geq 4$, and $n \geq 3$:

$$\eta = \frac{m \cdot (n - 1)}{4} \tag{9}$$

Case 3) when the number of images is an odd number and the number of samples is an odd number, for $m \geq 3$, and $n \geq 5$, we have two cases

i) When the image number $(n-1)$ is divisible by four:

$$\eta = \frac{m \cdot (n - 1)}{4} \tag{10}$$

When the image number $(n+1)$ is divisible by four:

$$\eta = \frac{m \cdot (n - 1) - 2}{4} \tag{11}$$

Case 4) when the number of images is an even number and the number of samples is an odd number, for $m \geq 3$, and $n \geq 4$, there are two cases:

ii) When the image number n is divisible by four::

$$\eta = \frac{m \cdot n}{4} \tag{12}$$

iii) When the image number $(n-2)$ is divisible by four:

$$\eta = \frac{m \cdot n - 2}{4} \tag{13}$$

As an example, if we take 224 images and 30 samples per image, then the number of polygons created are 1680 (This corresponds to Case 1)

$$\eta = (n \cdot m / 4) = (224 \cdot 30) / 4 = 1680 \tag{14}$$

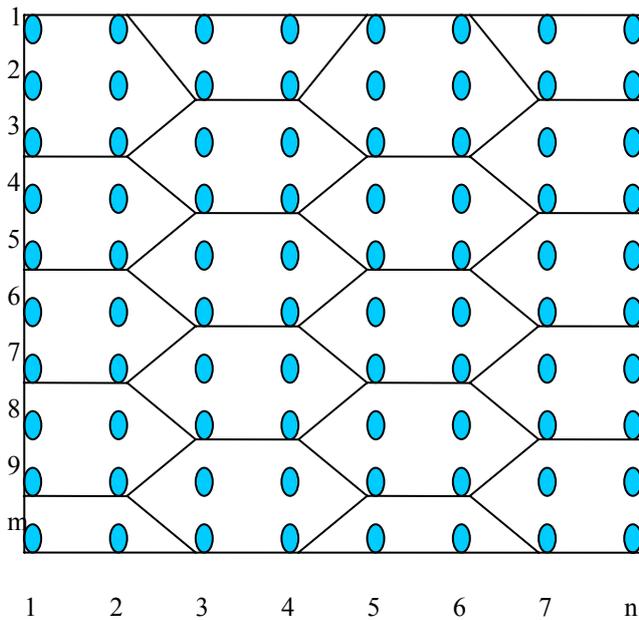


Figure 6: Sampling points over 2D projection: n -images in horizontal axis vs. m -samples per image in vertical axis.

4 Optimized Simplex Mesh

Once the general reconstruction mesh by the simplex method has been obtained, an optimization over it is applied. Optimization is concerned with the localization of the best polygonal distribution units; it is applied across the channel (cylinder) spark reconstruction. Optimization technique is based in local gradient estimation. The next equation represents the gradient for the 2D function (image case), where the norm is taken.

$$|\nabla f(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)^2} \quad (15)$$

If the gradient is less or equal than a specified threshold, the polygon is eliminated since it is redundant.

5 Spark Discharge Reconstruction

A brief description the electrical experimental set-up it follows: a point-plane electrodes array was employed for the tests. The active electrode is made by a brass rod with a length of 10 cm, finished by a stainless-steel tip point radii of less of 1mm. The earthed electrode is a stainless-steel disk with a diameter length of 12 cm (4 in) and 7 mm width. Both electrodes were aligned horizontally. In order to obtain the negative high voltage pulse, a negative 20 kV DC high-voltage supply (Spellman SL600R) is employed to charge a four capacitor-bank (each capacitor with 3.2 nF @ 30kV maximum of charge) in a Marx array, so it is possible to obtain up to 70 kV_p pulse. A set of measurements

were made for spark occurrence at different gap separations, ranging from 3 mm to 30 mm, and negative pulse voltage from 40 kV_p up to 70 kV_p.

The spark discharge characterization was done with help of this 3D reconstruction tool. Spark voltages (V_s) were taken for each distance at least, three times and the reconstruction of the spark image was done for each sample. Figure 7 shows two examples of the original images used for the 3D reconstruction (for one spark condition). Figure 7(a) shows the horizontal view, parallel to the phenomenon and Figure 7(b) shows the top view, orthogonal to the parallel view.

From these images, the spark discharges are isolated, taking only the blue zone. The images are also synchronized by a laser ray. The Methodology presented in Figure 1, was applied until the 3D reconstruction is accomplished.

All the stages shown in Figure 1 have been implemented with a software tool, which allows to manually define the parameters for the thresholds in the filter and also to define the “root” pixels for the fitting, among other features. With this software the laboratory experiments were done.

6 Results

Once the methodology was defined and the physical phenomenon implemented, we proceeded to process images in order to obtain the cylindrical reconstruction. Two electrodes were used, the first one is aluminum (plane electrode) and the second one is tungsten (point electrode). The main propose of this work is 3D optimized reconstruction of point-plane spark discharge (computationally). The electrical parameters of the physical phenomenon were set up as follows: inter-electrodes distance: 5mm; applied voltage: 30 kV.

Figure 7 shows two images of the phenomenon; Figure 7(a) shows the horizontal view and Figure 7(b) shows the top view. Those images are orthogonal; parallel and orthogonal to the spark discharge, respectively. Starting from these images, the proposed computational methodology was applied: color filtering, images synchronization, fitting and improvement, until 3D reconstruction.

The 3D mesh reconstruction is then ready to be optimized. Figure 8 shows an example with and without optimization. Figure 8(a) presents the 2-simplex mesh [3] reconstruction without optimization. This reconstruction gives a total of 2,780 polygons (220 images, 50 samples per image). Figure 8(b) presents an optimized example at 5 degrees of gradient. This optimized reconstruction gives a total of 1075 polygons.

The algorithm was also tested with different gradient values, from about one to 8 degrees. Table 1 shows results of number of polygons needed for a good reconstruction (220 images, 30 samples per image). We

can see from table 1, that there is a 27% polygon's reduction while varying the gradient from 1 to 8 degrees. No significant degradation occurs when making the reconstruction of the image in the range going from 1 to 5 degrees (see Figures 9(a) and 9(b)).

Other test was also developed on the 3D reconstruction algorithm. Now at 50 samples per image, keeping 220 images. The results are shown in table 2. There is a 27% reduction in the number of polygons when going from 1 to 8 degrees. The same reduction of polygons is obtained, making the reconstruction with 30 and 50 samples per image (see Table 1 vs. Table 2)

7 Conclusions and Future Wworks

A 3D reconstruction of spark discharges employing a mesh method called *Simplex* was presented. From general simplex mesh reconstruction, an optimization was applied based on gradient criteria. The optimized procedure gives 27% reduction in the number of polygons (at 5 degrees of gradient).

With the optimized methodology, there is a reduction in processing time of the spark discharge of about 30%, for the following operations: 3D mesh reconstruction, rendering and visualization time.

Different expressions were developed to find ideal number of polygons for the 2-simplex meshes' method. The number of polygons for mesh reconstruction can be obtained as a function of the number of images and the number of samples per image.

Future work consists in the characterization of spark discharge, and the relation between electrical parameters and the physical phenomenon. Such characterization will make use of statistical features such as fractal dimension and density functions. Finally, a propagation model will be proposed taking into account those statistical features.

REFERENCES

- [1] Bañuelos Velázquez E. and Jiménez Rojas R. "Estudio de la rigidez dieléctrica de una línea de alta tensión en aire sometida a una flama directa y análisis de la trayectoria de la descarga eléctrica" UAM Azcapotzalco, Energy Dept. 2001 (In Spanish)
- [2] Hernández-Ávila J. L., Robledo-Martínez A., Escarela-Pérez R., "Air Insulation Strength for DC Voltages when Gap is Bridged by Flames". Proc. 35th UPEC 2000, paper 207, North Ireland, 2000.
- [3] Watson D. B., Kho S K and Samuels K A , "Impulse flashover of air in divergent fields", J. Phys. D: Appl. Phys. 25 , 1777-1779 (1992).
- [4] Alexandrov N. L. Bazelyan E. M., "The Peculiarities of Long-Streamer Propagation in Gases With Strong Electron Attachment", Proc. XIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Vol. 1, pp 430-433, Glasgow 3-8 September, 2000.
- [5] Delingette H., "General Object Reconstruction based on Simplex Meshes". International Journal of Computer Vision, 32, pp. 111-142, Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [6] Achat S, Teisseyre Y and Marode E., "The scaling of the streamer-to-arc transition in positive point to plane gap with pressure", J. Phys. D.: Appl. Phys., 25, 661-668, 1992.
- [7] Aleksandrov N L, Bazelyan E M, Kochetov I V and Dyatko N A, "The ionization kinetics and electric field in the leader channel in long air gaps", J. Phys. D: Appl. Phys. 30 No 11, 1616-1624, 1997.
- [8] D. H. Qiu, J. M. K. MacAlpine, "An Incremental Analysis of Spark Paths in Air Using 3-dimensional Image Processing", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 758-763, Vol. 7 No. 6, December 2000.
- [9] W. E. Lorensen, H. E. Cline, "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm", Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 87), Vol. 21, No. 4, pp. 163-169.
- [10] F. Bernardini, J. Mittleman, C. Silva, G. Taubin, H. Rushmeier, "The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 4, October-December 2000.
- [11] W. Niem, M. Steinmetz, "Camera Viewpoint Control for the Automatic Reconstruction of 3D Objects", SPIE Proceedings, Vol. 2182, 1996.
- [12] H. Delingette, "Simplex Meshes: a General Representation for 3D Shape Reconstruction", Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94).
- [13] G. Vogiatzis, P. Torr, R. Cipolla, "Bayesian Stochastic Mesh Optimisation for 3D Reconstruction". Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94).
- [14] A. Shahrokni, H. Soltanian-Zadeh, R. A. Zoorofi, "Fast Skeletonization Algorithm for 3-D Elongated Objects". Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '94).
- [15] S. Hasino, "Three-Dimensional Reconstruction of Fire from Images", Master Thesis, University of Toronto.
- [16] G. Ori and G. Nathan, Gurewich Visual C++ 6 quick start, ebook, release 2003.
- [17] [18] Edward Angel, Interactive Computer Graphics: A top-down approach, Addison Wesley, 3rd Edition, 2003.
- [18] Akeley K., Segal M., The OpenGL[®] Graphics System: A Specification Version 2.1, 2006

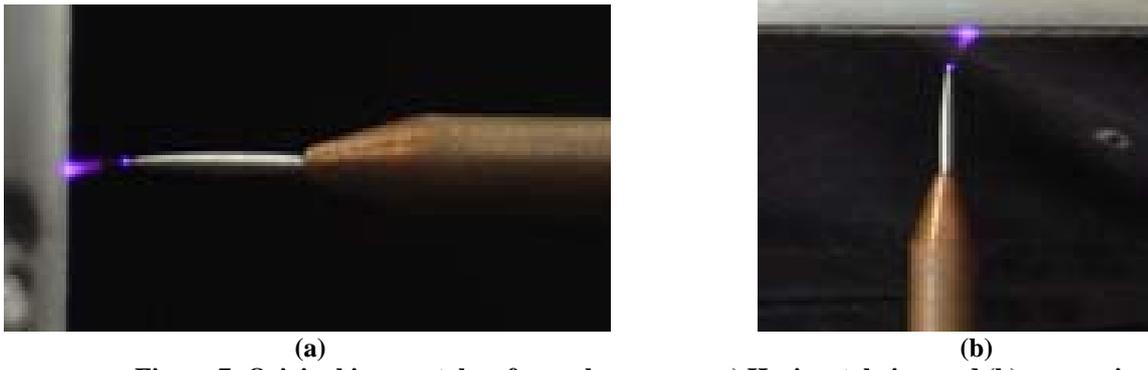


Figure 7: Original images taken from phenomena: a) Horizontal view and (b) upper view

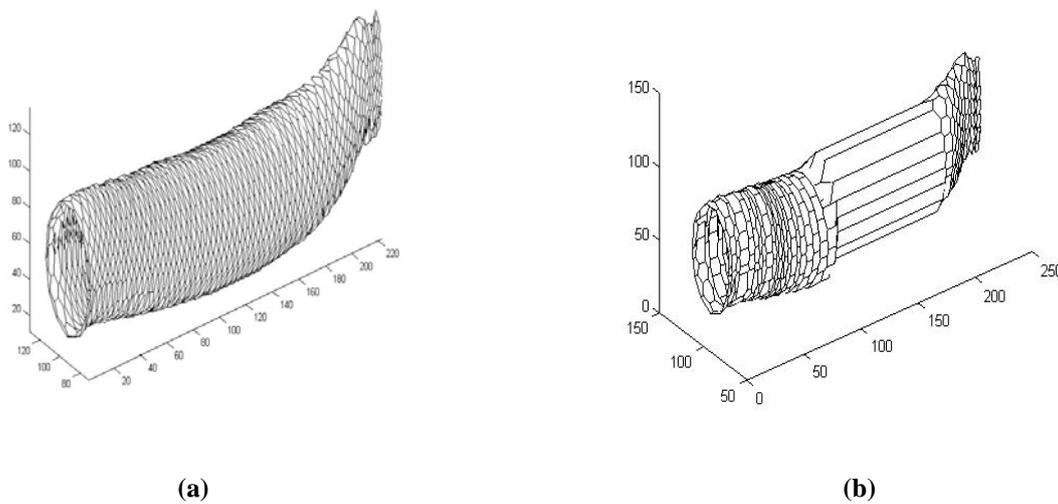


Figure 8: A 3D reconstruction examples (V_s : -30 kV, d: 5 mm.): (a) Without polygonal optimization: 7,700 polygons; (b) With optimization: 1075 polygons at 5 degrees of gradient

Gradient Threshold	Polygons number
$\pm 1^\circ$ - 0.0175 rad.	720
$\pm 2^\circ$ - 0.0349 rad.	705
$\pm 3^\circ$ - 0.0524 rad.	690
$\pm 4^\circ$ - 0.0698 rad.	660
$\pm 5^\circ$ - 0.0893 rad.	645
$\pm 6^\circ$ - 0.1047 rad.	615
$\pm 7^\circ$ - 0.1222 rad.	585
$\pm 8^\circ$ - 0.1396 rad.	525

Table 1: Polygons optimization as a function of gradient threshold (at 220 images and 30 samples per image).

Gradient Threshold	Polygons number
$\pm 1^\circ$ rad.	1200
$\pm 2^\circ$ rad.	1175
$\pm 3^\circ$ rad.	1150
$\pm 4^\circ$ rad.	1100
$\pm 5^\circ$ rad.	1075
$\pm 6^\circ$ rad.	1025
$\pm 7^\circ$ rad.	975
$\pm 8^\circ$ rad.	875

Table 2: Polygons optimization as a function of gradient threshold (at 220 images and 50 samples per image).

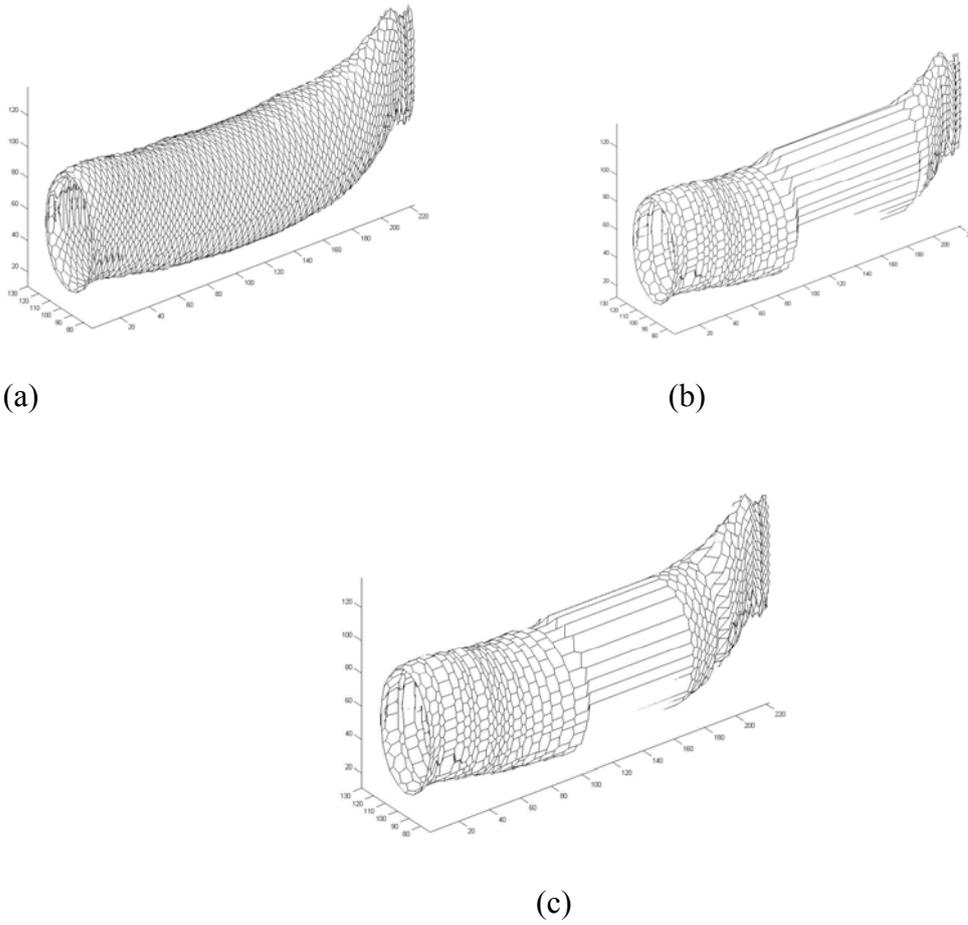


Figure 9: 3D Reconstructions as function of gradient and polygons units: (a) Without polygonal optimization: 7,700 polygons (220 images and 140 samples per image); (b) With optimization: 875 polygons at 8 degrees of gradient (220 images and 50 samples per image); (c) With optimization: 1075 polygons and 5 degrees of gradient (220 images and 50 samples per image).