



DIVISIÓN DE  
CIENCIAS BÁSICAS  
E INGENIERÍA

---

---

## Maestría en Ciencias de la Computación

### Reconstrucción Tomográfica 3D de Descargas Eléctricas

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

Ing. en S.C. Rist o Rangel Kuoppa

Dirigida por:  
Dr. Carlos Avilés Cruz  
Dr. José Luis Hernández Ávila

México, D.F., mayo 2002

## Agradecimientos

Siempre que he alcanzado una meta en mi vida, ya sea académica, profesional, social incluso; me gusta detenerme un poco a valorar lo que he obtenido, quiénes me han ayudado, quiénes me han perjudicado, qué hice bien y qué hice mal. Y me doy clara cuenta de que en definitiva todas las metas y hasta para mí mismo está presente un apoyo incondicional, una guía sabia, un cuidado amoroso, una preocupación sana y un amor desinteresado, siendo todas estas vivencias presentes constantemente en cada instante de mi vida y provista de manera única en su forma y majestuosidad por dos personas; mi madre y mi padre. Por eso:

“...Gracias a ti Papá y gracias a ti Mamá  
Gracias a los dos por ser los mejores  
padres que yo podría tener  
en esta vida...”

También dentro de este logro académico, está presente una persona quien en mi corazón tiene un lugar único y privilegiado, quien con su ayuda he podido llegar a buen término esta etapa de mi vida:

“...Gracias a ti Idalia por estar presente en mi vida  
y en mi corazón, y gracias también por  
corresponderme de igual manera...”

Durante el desarrollo de mi maestría tuve un gran honor, un honor que sólo en pocas ocasiones se da en la vida y que es reflejo de uno de los valores más nobles en la humanidad; este honor es de el haber encontrado un verdadero amigo quien también me apoyo para alcanzar esta meta:

“...Gracias Jesús por ser mi amigo y  
considerarme como tal...”

No han sido pocos los que me ayudaron directa o indirectamente para formarme como Maestro en Ciencias de la Computación y a quienes les estoy inmensamente agradecido, entre ellos a mis asesores: el Dr. Carlos Avilés Cruz y el Dr. José Luis Hernández Avila. Al Dr. Felipe Monroy Pérez, de quien no pude tener el honor de recibir su cátedra pero que con su coordinación de la Maestría brindó un gran apoyo.

También están todos los profesores de quien tuve la suerte de recibir cátedra; el M. en C. Luis Fernando Hoyos, Dr. Héctor Ruiz Barradas (muchas gracias por su comentarios tan sabios para entender la realidad de un posgrado y de la ciencia), M. en C. Silvia González Brambila, Dr. Rossen Petrov Popnicolov, M. en C. Hugo Moncayo, M. en C. Jose Alfredo Estrada Soto, M. en C. Blanca Silva, M. en C. Hugo Pablo Leyva, Dra. Guadalupe Rodríguez Sánchez, Dr. Rafael López Bracho, Dr. Jesús Isidro González.

También agradezco a quienes fungieron como sinodales en mi examen de grado, el Dr. Rafael Escarela Pérez, el Dr. Joaquín Azpiroz Leehan y Dr. Carlos Avilés Cruz.

Un agradecimiento especial a la Dra. Mabel Baca por su excelente seminario para el desarrollo de tesis de maestría.

Un personaje también destacado en el desarrollo de esta maestría quien apoyo vigilando el buen funcionamiento de los recursos y a quien también le estoy agradecido es Martín, perdón pero no me sé sus apellidos.

Adicionalmente quiere agradecer a mi institución de quien soy un orgulloso egresado, la Universidad Autónoma Metropolitana.

Especialmente agradezco a los personajes que en mi vida han marcado mi formación y que humildemente nombro por sus iniciales: J. de N. , S.G. el B., L.R., M.D., V. S., T., R., C.C., J.J.B., T.R.

Y un agradecimiento a todas las personas que me apoyaron para alcanzar esta meta y que en mi descuido no he recordado mencionar .... gracias.

¿la dedicatoria? .... no, no está olvidada, simplemente es que la tesis está dedicada a todos los anteriormente mencionados.

# INDICE

INDICE.....	4
INDICE DE FIGURAS Y TABLAS .....	5
INTRODUCCIÓN.....	8
Descripción de la tesis .....	10
1.    PROBLEMÁTICA.....	12
2.    ESTADO DEL ARTE .....	15
3.    FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DESARROLLO .....	18
3.1    Introducción.....	18
3.2    Adquisición de imágenes.....	18
3.2.1 Sincronización de imágenes .....	24
3.3    Procesamiento digital de imágenes.....	25
3.3.1 Proceso de filtrado .....	29
3.3.2 Algoritmo de filtrado .....	31
3.3.3 Proceso de encuadre .....	31
3.3.4 Algoritmo de encuadre .....	38
3.3.5 Proceso de realce .....	39
3.3.6 Algoritmo de realce .....	42
3.4    Reconstrucción Tomográfica.....	45
3.4.2. Método de las mallas Simplex.....	49
3.4.2 Algoritmo de Reconstrucción 3D.....	58
4.    IMPLEMENTACIÓN .....	61
4.1    Introducción.....	61
4.2    Manual del programador.....	64
5.    RESULTADOS .....	74
5.1    Manual del usuario .....	74
5.2    Retodeel en funcionamiento .....	82
6.    CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS .....	90
Observaciones sobre el desarrollo .....	90
Conclusiones.....	92
Trabajo Posterior .....	93
7.    REFERENCIAS .....	95
Apéndice A    MONTAJE ELÉCTRICO.....	98
Apéndice B    CONTROLES ACTIVEX .....	105
Apéndice C    GRAFICACIÓN 3D.....	108
Apéndice D    DETALLES DE LA IMPLEMENTACIÓN .....	117
Artículo 1    “Reconstrucción Tomográfica 3D de Descargas Eléctricas” .....	119
Artículo 2    “3D Reconstruction of a Spark Discharge” .....	120

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1-1 La Reconstrucción Tomográfica .....	12
Figura 1-2 Diagrama de flujo de los procesos para la reconstrucción tomográfica de este proyecto .....	14
Figura 3-1 Esquema de prueba para la captura con 1 sola cámara y un espejo.....	19
Figura 3-2 Esquema de captura con dos videocámaras (1 puerto USB y una tarjeta de adquisición de video).....	19
Figura 3-3 Esquema de captura independiente con dos videocámaras.....	20
Figura 3-4 Imagen del armazón para diodo láser .....	21
Figura 3-5 Imagen del armazón para diodo láser .....	21
Figura 3-6 Imagen del armazón con espejo a 45 grados sobre la horizontal.....	22
Figura 3-7 Imagen del armazón, cátodos y circuito de señal lumínica .....	22
Figura 3-8 Imagen del esquema de captura de imágenes .....	23
Figura 3-9 Imagen del esquema de captura de imágenes ya calibrado.....	23
Figura 3-10 Imagen del generador de señal luminosa, para sincronización de imágenes ...	24
Figura 3-11 Imágenes frontal y superior, obtenidas de los videos .....	25
Figura 3-12 Objetivo del encuadre .....	26
Figura 3-13 a) Imagen de trabajo b) Imagen tras el filtrado de color – Imagen tomada de la herramienta Retodeel.....	26
Figura 3-14 Zona del fenómeno aislada - Imagen tomada de la herramienta Retodeel .....	27
Figura 3-15 Etapas del procesamiento de imágenes para la reconstrucción tomográfica y sus resultados .....	28
Figura 3-16 Arriba: Secciones transversales de perfiles básicos para filtros en el dominio de frecuencias con simetría circular. Abajo: secciones transversales de los filtros correspondientes en el dominio espacial .....	30
Figura 3-17 Una mascara 3x3 con coeficientes (pesos) arbitrarios .....	30
Figura 3-18 Una máscara general 3x3 .....	33
Figura 3-19 Máscaras de línea .....	34
Figura 3-20 Ejemplo de crecimiento de regiones utilizando puntos de salida conocidos: (a) matriz imagen original; (b) resultado de la segmentación al utilizar una diferencia absoluta entre los niveles de intensidad menor de 3; (c) al usar una diferencia menor de 8.....	36
Figura 3-21 a) Imagen de trabajo. b) Imagen tras el filtrado de color - Capturado de la herramienta Retodeel. ....	38
Figura 3-22 Proyecciones para la reconstrucción.....	40
Figura 3-23 Contorno del prisma sin interpolar información.....	41
Figura 3-24 Contorno del prisma interpolando información.....	41
Figura 3-25 Parámetros de las proyecciones .....	42
Figura 3-26 Conjunto de vértices creados para la reconstrucción.....	44
Figura 3-27 El esquema general de reconstrucción de objetos.....	45
Figura 3-28 Ejemplos de p-células $0 \leq p \leq 3$ .....	49
Figura 3-29 Cuatro mallas 2-simplex genéricas .....	50
Figura 3-30 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. Dos primeras son triangulaciones sin fronteras y las otras dos tienen fronteras .....	52
Figura 3-31 Dos contornos definidos en una malla 2-simplex. El de más a la derecha delimita una cara de la malla. ....	54
Figura 3-32 (a) los dos operadores Euleriano $T_1^2, T_2^2$ definidos en mallas 2-simplex; (b) Los dos meta-operadores $T_3^2$ y $T_4^2$ ; (c) El operador de conmutación de segmento $T_7^2$ . ....	55
Figura 3-33 (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. ....	56
Figura 3-34 Prisma NO basado en mallas simplex.....	58
Figura 3-35 Prisma en base a mallas simplex. ....	59
Figura 4-1 Diagrama a bloques de la herramienta Retodeel.....	61
Figura 4-2 Ejemplo de imagen obtenida; Vista superior .....	63
Figura 4-3 Ejemplo de imagen obtenida; Vista frontal. ....	63
Figura 4-4 Diagrama de estados de la herramienta Retodeel .....	64
Figura 4-5 Diagrama de estados mostrando las condiciones de transición. ....	65
Figura 4-6 Diagrama de flujo del filtrado. ....	68
Figura 4-7 Diagrama de flujo del encuadre .....	69
Figura 4-8 Diagrama de flujo del realce .....	70
Figura 4-9 Diagrama de flujo de la reconstrucción tomográfica .....	72
Figura 5-1 Vista de la herramienta Retodeel .....	74
Figura 5-2 Retodeel tras haber cargado las imágenes de trabajo.....	75
Figura 5-3 Botones de comandos y sus funcionalidades. ....	76
Figura 5-4 Ventana para configurar los parámetros de los algoritmos de filtrado y encuadre. ....	78
Figura 5-5 Ventana para la visualización del modelo 3D.....	79
Figura 5-6 Vista de la ayuda en línea de la herramienta.....	81
Figura 5-7 Imágenes de trabajo para los ejemplos de Retodeel .....	82
Figura 5-8 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 1 .....	83
Figura 5-9 Imagen del modelo 3D del ejemplo 1 .....	83
Figura 5-10 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 2 .....	84
Figura 5-11 Imagen del modelo 3d del ejemplo 2 .....	84
Figura 5-12 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 3 .....	85
Figura 5-13 11 Imagen del modelo 3d del ejemplo 3.....	85
Figura 5-14 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 4 .....	86
Figura 5-15 Imagen del modelo 3d del ejemplo 4.....	86
Figura 5-16 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 5 .....	87
Figura 5-17 Imagen del modelo 3d del ejemplo 5.....	87
Figura 5-18 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 6 .....	88
Figura 5-19 Imagen del modelo 3d del ejemplo 6.....	88
Figura A-1 Montaje de los electrodos (Distancia de separación entre los electrodos "d") .	99
Figura A-2 Esquema ilustrativo del montaje eléctrico .....	101
Figura A-3 Montaje "a". Electrodo y mechero aterrizados .....	102
Figura A-4 Montaje "b". Electrodo flotado, medición a través del mechero. ....	102
Figura A-5 Montaje "c". Mechero flotado, medición a través del electrodo.....	102
Figura A-6 Montaje "d". Medición a través del mechero y electrodo.....	102

Figura A-7 Esquema para la adquisición de imagen. ....	103
Figura C-1 Tipos de sistemas de coordenadas.....	108
Figura C-2 Cubo representado por una malla de triángulos .....	109
Figura C-3 Esfera simulada con triángulos .....	110
Tabla 3-1 Las relaciones de conectividad en una malla k-simplex .....	51
Tabla 3-2 Dualidad entre una k-triangulación y una malla k-simplex para caras internas...	52
Tabla 3-3 Dualidad entre una k-triangulación y una malla k-simplex para caras en la frontera.....	52
Tabla 5-1 Funcionalidad de los comandos de la herramienta Retodeel .....	76
Tabla 5-2 Funcionalidad de la ventana para personalizar algoritmos. ....	78
Tabla 5-3 Funcionalidad de la ventana de visualización 3D.....	79
Tabla 5-4 Ejemplos de demostración de Retodeel .....	82

## INTRODUCCIÓN

Desde que el ser humano inició su interminable proceso de entender el por qué de las cosas, innumerable cantidad de formas se han dado para interpretar el mundo que nos rodea. Hoy en día, con el avance científico y tecnológico de nuestra especie se han generado un sinnúmero de modelos que nos permiten entender el universo que nos rodea. Y de cada modelo creado, siempre ha estado a la par la comprobación de dicho modelo, ya sea por procesos empíricos ó teóricos.

Ahora que la tecnología nos ha facilitado capacidades de cómputo nunca antes vista, ha habido una natural traducción de los modelos que describen al universo, hacia el ámbito de los sistemas computacionales. Esto se ha dado con el objetivo de poder corroborar más fácilmente la validez de los modelos, así como también facilitar la evolución y/o creación de nuevos modelos.

En particular, se tiene la necesidad de describir objetos de la vida real a través de un sistema de cómputo. Este problema tiene una gran cantidad de consideraciones a tomarse en cuenta; desde la cantidad de información con que se representará el objeto de la vida real, hasta la forma en que se adquiere y se traduce esta información, pasando por consideraciones sobre la forma de agrupar la información e incluso transformaciones que se le tenga que aplicar.

De lo anterior, podemos deducir que la generación de un modelo dentro de un sistema computacional, requiere de una cierta cantidad de procesos de cómputo y más aún cuando se busca que este modelo represente a un objeto de la vida real.

Pues bien, en este proyecto se expone la investigación y desarrollo de los procesos de cómputo que se han llevado a cabo para generar un modelo de un objeto de la vida real. Estos procesos se han enfocado para que en particular se obtenga un modelo, en base a especificaciones de una representación innovadora. Haciendo por tanto, también innovador el desarrollo de este proyecto, así como algunos de los procesos involucrados y las representaciones del modelo.



El modelo se implementa a través del método de las mallas *simplex* [1], que ha sido propuesto como general para la representación de objetos tridimensionales tanto sólidos como deformables. Este modelo, de reciente creación, no reporta aplicaciones previas al objeto de la vida real que se ha decidido representar y que se especifica más adelante.

El método toma como información de entrada, imágenes digitales del objeto de la vida real, las cuales requieren de un procesamiento digital previo. El objetivo es obtener un modelo tridimensional del objeto, para una posterior caracterización del mismo.

Cabe también mencionar que la generación del modelo del objeto surge de la necesidad presente en un proyecto de investigación divisional del área de "Energía y Electromagnetismo" del Departamento de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco. Donde ya se ha realizado una caracterización de descargas eléctricas con información bidimensional de las mismas (ver "*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*" de Edgar Bañuelos Velázquez y Raúl Jiménez Rojas [2]) y ahora se requiere de la generación de un modelo informático tridimensional de una descarga eléctrica, para una posterior caracterización de la misma.

Por lo tanto, en este proyecto, el objeto de la vida real del que se genera un modelo son las descargas eléctricas. En este proyecto se aborda el problema desde una perspectiva computacional, en función de los algoritmos requeridos para el procesamiento de la información y la reconstrucción tomográfica 3D del modelo de la descarga eléctrica. Nuestra propuesta es innovadora dado que la literatura no reporta trabajo similar.

Algo importante a mencionar aquí, es que el método de las mallas *simplex*, es un modelo para el tratamiento y representación de objetos tridimensionales, sin embargo, en ningún momento se estipula el cómo generar estos modelos a partir de información obtenida de la vida real, por lo que el método presentado en esta tesis es una aportación totalmente innovadora al estado del arte, al presentar en conjunto con las demás técnicas, una técnica para la reconstrucción tomográfica 3D de descargas eléctricas, aplicando el esquema de las mallas *simplex*. Técnica al menos no documentada hasta la fecha del desarrollo de este proyecto.

Como demostración de los algoritmos propuestos, éstos se han implementado en una herramienta de software. La herramienta se ha bautizado como *Retodeel* (Reconstrucción Tomográfica Descargas Eléctricas).

## Descripción de la tesis

La tesis se compone de los siguientes capítulos:

1 Problemática .- Presenta la descripción general del proyecto y sus objetivos a alcanzar, así como algunas de sus características más relevantes, sirve para generar en el lector una visión global de los procesos involucrados, sin entrar en los detalles.

2 Estado del arte - Es la investigación bibliográfica que se realizó para definir el marco contextual de este proyecto, así como para corroborar su aportación innovadora, describiendo someramente los artículos más relevantes encontrados.

3 Fundamentos Teóricos y Desarrollo.- Expone la base teórica que respalda los algoritmos involucrados para llevar a cabo el objetivo del proyecto, se presenta la información en el mismo orden en que se ejecutan las etapas de la reconstrucción tomográfica. Al final de cada sección, se expone el desarrollo particular de cada etapa de este proyecto.

4 Implementación .- Toca los puntos más relevantes de implementación de los algoritmos propuestos, en la herramienta de software que refleja el proceso de la reconstrucción tomográfica. La información se presenta como un "Manual del Programador" para facilitar la continuación de este proyecto.

5 Resultados .- Refleja el producto obtenido y las características del mismo. Este producto es una herramienta de software, que en esta sección se describe a través del "Manual de Usuario". También se presenta una serie de imágenes de la herramienta en funcionamiento y se describen sus características más relevantes.

6 Conclusiones y perspectivas - Resume el conocimiento y la experiencia adquirida durante el desarrollo de este proyecto, así como el trabajo posterior que se ha vislumbrado como continuación del mismo.

7 Referencias .- Una compilación de las referencias en que se sustenta este proyecto, siguiendo la notación de un artículo científico.

Apéndice A - Montaje Eléctrico .- Describe con detalles técnicos el montaje eléctrico del que se tomó las imágenes de las descargas eléctricas para realizar su reconstrucción tomográfica. Este montaje eléctrico es ya existente previo al desarrollo de este proyecto, por lo que sólo se retoma la información y no se reporta como desarrollado durante este proyecto.

Apéndice B - Controles ActiveX .- Introduce los conceptos básicos de esta tecnología de desarrollo, que es sobre la que se implementó la herramienta de software. También menciona otras fuentes para continuar con el aprendizaje de la tecnología de desarrollo.

Apéndice C - Graficación 3D - Introduce los conceptos básicos de las técnicas para la graficación de información 3D en un sistema computacional. También menciona otras fuentes para continuar con el aprendizaje de estas técnicas.

Apéndice D - Detalles de la implementación .- Presenta información más específica acerca de la implementación de los algoritmos, sirviendo de complemento al capítulo 4 - Implementación. Esta información más específica sirve para preparar al lector que decida inspeccionar el código fuente de la herramienta de software.

Finalmente, la tesis termina con una recopilación de los artículos que se han publicado como trabajo derivado del desarrollo del proyecto.

# 1. PROBLEMÁTICA

Para realizar la construcción del modelo de las descargas eléctricas, se hace uso de un montaje eléctrico [2] (ver apéndice A) como fuente de las imágenes para su posterior tratamiento y de ahí realizar reconstrucción 3D de las descargas (reconstrucción tomográfica).

La reconstrucción tomográfica es el proceso de generar un modelo (normalmente 3D) que representa a un objeto de la vida real, haciendo uso de información obtenida del objeto. Ver Figura 1.1. Generalmente esta información se presenta a través de imágenes (2D) que se han tomado del objeto, a través de algún medio electrónico y/o mecánico. Para este proyecto, el modelo generado en la reconstrucción tomográfica hace uso del "método de mallas Simplex" [1].

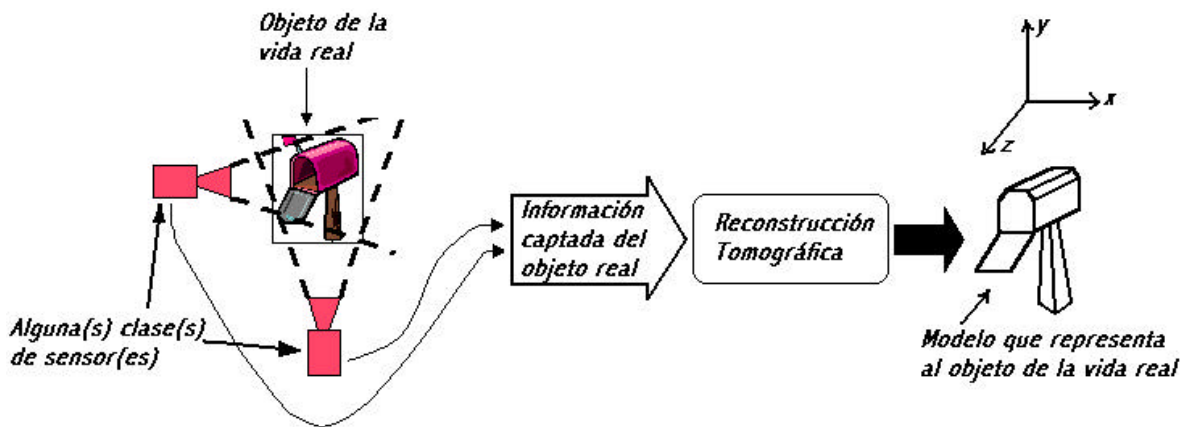


Figura 1-1 La Reconstrucción Tomográfica

Para solventar la necesidad planteada (ver Introducción) de una caracterización de descargas eléctricas, más allá de la ya realizada con información bidimensional [2]. El objetivo general de este proyecto es *diseñar e implementar los algoritmos que generan el modelo tridimensional de una descarga eléctrica.*

Una vez definido el objetivo general de este proyecto se han establecido los siguientes objetivos particulares:

1. Plantear una metodología de captura de imágenes del fenómeno de descargas eléctricas, modificando el esquema de adquisición de imágenes del montaje eléctrico a ser usado [2], para realizar la captura de imágenes del fenómeno en más de un plano del espacio.
2. Instrumentar la metodología de captura propuesta.

3. Diseñar los algoritmos para el procesamiento digital de las imágenes que permitirá tener información para la reconstrucción tomográfica.
4. Aplicar el método de mallas simplex, para la reconstrucción tomográfica del fenómeno de la descarga eléctrica, partiendo de la información posterior al procesamiento digital de las imágenes.

Las descargas eléctricas, al igual que otros fenómenos de índole eléctrico, son fenómenos que dada su naturaleza, pueden reflejar información relacionada con el entorno en el que se está presentando. Este fenómeno lo podemos ver en la vida real, en ejemplos tales como los relámpagos de las tormentas, en las cercas electrificadas, en el encendido de electrodomésticos, y un largo etcétera.

Otro ejemplo se encuentra en las líneas de alta tensión, que presentan fallas eléctricas por la generación de arcos voltaicos entre los cables. Estos arcos voltaicos, entre otros motivos, se dan cuando los agricultores realizan la quema de sus siembras, que provocan un aumento en las partículas suspendidas en el aire entre los cables. Lo cual facilita la ionización del ambiente, permitiendo la generación de arcos voltaicos entre las líneas. Este proyecto genera la base para poder realizar la caracterización de descargas eléctricas, y que con una extensión al mismo, permitiría caracterizar los arcos de las líneas de alta tensión y por tanto definir las características del ambiente para que no se produzcan los arcos y se eviten fallas en el suministro de energía.

Entonces, el presente proyecto se justifica al solventar la necesidad de una definición de los procesos de cómputo necesarios para llevar a cabo la reconstrucción tomográfica de un particular objeto de la vida real, no realizada antes. Generando así la base para realizar una nueva contribución al análisis y representación de fenómenos físicos u objetos (en particular de descargas eléctricas) a través de modelos creados en algún sistema informático. Para esto, se presenta la metodología desarrollada (incluyendo los procesos de cómputo necesarios) para la captura y procesamiento de imágenes y la creación del modelo.

Las mallas simplex [1], son un modelo de superficies que pueden representar superficies de todas las topologías, tal y como lo hacen las mallas por triangulación. Aún más, la geometría de las mallas simplex habilita el definir en cada vértice, cantidades geométricas discretas tales como el promedio de curvatura ó los vectores normales. Tienen definidas fuerzas de regularización que permiten tener una continuidad geométrica de alto orden [1] de manera simple y eficiente. Adicionalmente, están

definidos operadores topológicos globales y locales para refinar una malla simplex ó cambiar su base de manera sencilla.

En la Figura 1.2, se presenta el diagrama de flujo general del proceso para obtener la reconstrucción tomográfica, cuyas etapas son:

- Carga de imágenes
- Filtrado
- Encuadre
- Interpolación
- Reconstrucción 3D

entregando al final, el modelo tridimensional del fenómeno.

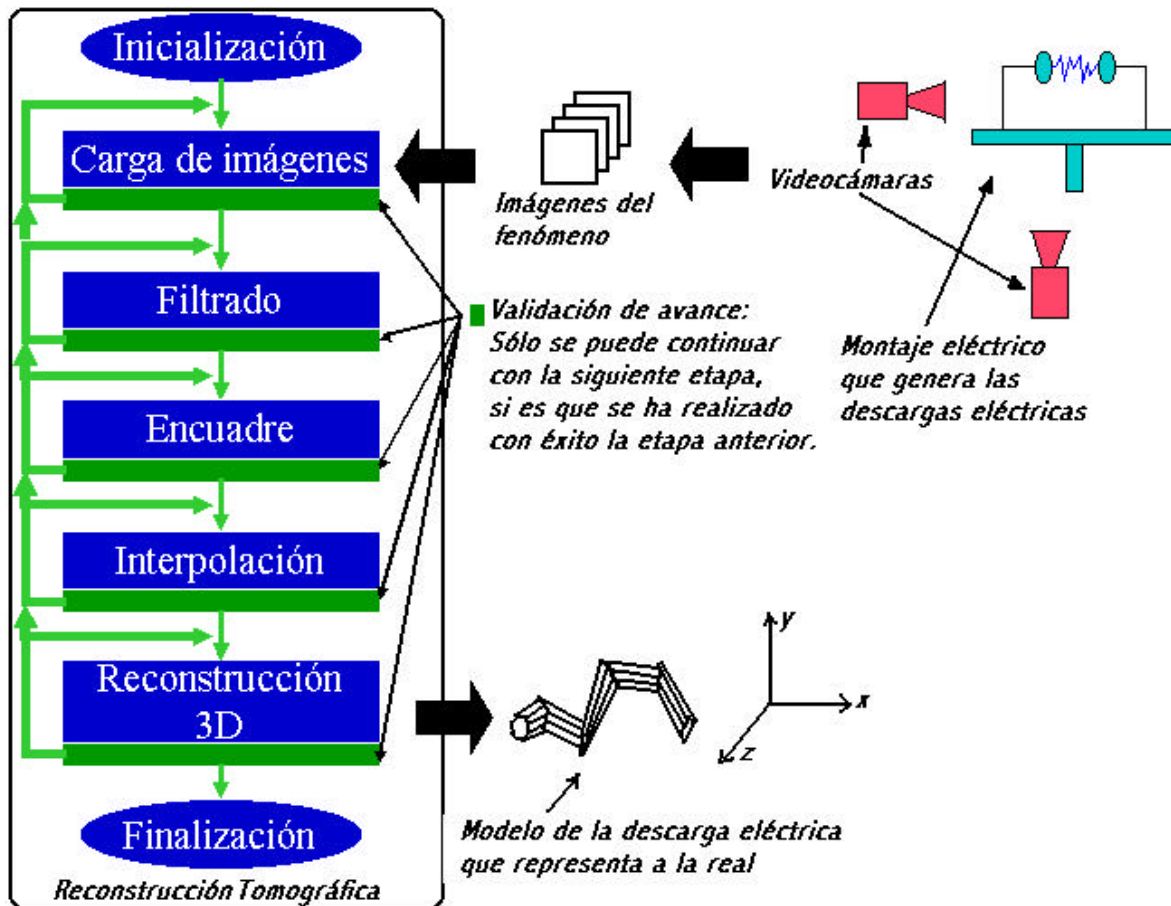


Figura 1-2 Diagrama de flujo de los procesos para la reconstrucción tomográfica de este proyecto

Para poder realizar la carga de las imágenes, primero se ha tenido que diseñar e implementar un esquema para la captura de imágenes, ya que el montaje eléctrico con el que se cuenta [2], está diseñado para la toma en un solo plano.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Para definir el estado del arte relacionado con esta tesis, se buscaron artículos de investigación recientes, enfocados al tema de la reconstrucción tomográfica.

Estos artículos han sido estudiados y comprendidos, con el objetivo de familiarizarse con los temas de la reconstrucción tomográfica e identificar los diversos métodos existentes, valorando ventajas y desventajas de los mismos, así como su posible influencia en el proyecto actual.

Cabe mencionar que durante la revisión del estado del arte, en ningún momento se encontró referencia alguna a bibliografía relacionada con la reconstrucción 3D de descargas eléctricas ó de la aplicación de las mallas simplex en algún fenómeno real, así mismo, entrevistando a investigadores entendidos en el tema, se supo que no existe desarrollos de esta índole. Con lo que se corrobora la aportación innovadora al estado del arte, por parte de este proyecto. Tanto en la definición de los procesos de cómputo para generar un modelo basado en mallas simplex, como en la generación del modelo del fenómeno particular de las descargas eléctricas.

Dentro de los artículos encontrados, se destacan los siguientes:

Hervé Delingette [1] presenta un algoritmo de reconstrucción tridimensional general para imágenes volumétricas, basándose en mallas simplex deformables. 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 vuelven tan interesante al método de las mallas simplex para su aplicación a este proyecto, ya que el fenómeno a reconstruir (el arco eléctrico) es un plasma, no pudiéndose pronosticar características de su forma. Cabe resaltar que los autores presentan la teoría sin alguna aplicación en particular así como no se detalla sobre su implementación.

Isaac Weiss y Manjit Ray [3], presentan un estudio sobre problemas poco tratados de reconocimiento de objetos, como es la pérdida de información de profundidad de un objeto 3D partiendo de una simple

imagen 2D, así como la complejidad de encontrar las correspondencias entre imágenes.

La aportación de este artículo al proyecto se ve en la aportación al marco teórico que debe de respaldar la [investigación del presente proyecto](#).

Ming-Fang Wu y Hsin-Teng Sheu [4] proponen un método (y su algoritmo) para la generación de Descriptores de Fourier 3D de dos variables, a partir directamente de un sistema de barrido con luz. Experimentos reportados indican que el algoritmo converge muy rápido y que las descripciones con los Descriptores de Fourier 3D tienen buen grado de certeza.

Jen-Hui Chuang y Min-Chi Ko [5] publican un artículo en el que se presenta [una esqueletización de objetos en tres dimensiones utilizando la técnica de potencial generalizado de campo](#).

Renato Pajarola y Jarek Rossignac [6], retoman el modelo clásico de representación de superficies (a través de mallas triangulares), para hacer una extensión en su tratamientos, al proponer el manejo de mallas progresivas, que resultan en menor información que el de las mallas triangulares. Manejándose así información comprimida de un modelo tridimensional.

La aportación de este artículo se aprecia en la presentación de una alternativa para el manejo más rápido de la representación de un modelo tridimensional. [Ya que el método de las mallas simplex puede reducirse a una malla basada en triangulaciones, pero no son equivalentes \(ver capítulo 3 – Fundamentos Teóricos\), este artículo provee las bases para diseñar un manejo más rápida de la representación de un modelo 3D, pero ahora basado en mallas simplex.](#)

Fausto Bernardini, Joshua Mittleman [7], muestran el algoritmo de "Ball-Pivoting" que realiza el cálculo de una malla triangular al interpolar una nube de puntos dada, que generalmente representa muestra de una superficie. Su aportación al proyecto se basa en el valor adquirido al poder comparar un método de generación de mallas triangulares, con un método de generación de una topología dual, a saber, las mallas Simplex.

Dentro de este proyecto, también se requiere del manejo interno de la representación en malla del modelo tridimensional, por lo que el artículo de Alan P. Mangari y Ross T. Whitaker [8], al presentar un método para la partición de mallas de superficies 3D, haciendo uso de la técnica de segmentación de imágenes "Watershed", aporta en la base de



conocimiento necesario para la comprensión y valoración de las técnicas usadas en este proyecto.

Yong Zhou y Arthur W. Toga [9], en su artículo se presenta un algoritmo eficiente de esqueletización basado en "líneas centrales" que se sustituyen por descripciones espaciales, a través de operaciones de reemplazo, refinamiento, suavizados y conexiones. Su aportación se da al presentar un método reciente para el manejo de esqueletizaciones de objetos volumétricos, situación que se da en este proyecto al iniciar la reconstrucción tomográfica.

M. Zerroug y R. Nevatia [10], presentan un método para realizar el cálculo necesario para la obtención de descripciones de "partes" de imágenes, así como la extrapolación de información tridimensional, explotando el uso de propiedades proyectivas de una clase de estructuras tridimensionales preestablecidas (cilindros), así como de las posibles uniones de éstas estructuras.

Issac J. Trotts, Bernd Hamann y Kenneth I. Joy [11], muestran un par de algoritmos que permiten realizar la simplificación de mallas tetraédricas de modelos tridimensionales, con una mínima pérdida de información. En particular, este [artículo da una contribución al presentar un método que serviría como base para después desarrollar un método de simplificación pero ahora para mallas Simplex.](#)

Estos son los artículos que permiten obtener un panorama de la situación actual de la reconstrucción tomográfica en la ciencia de hoy, sin embargo todavía existen otros artículos presentes en las referencias que no se han citado en esta sección, esto se debe a que son artículos que más bien tratan de una técnica en particular y que por tanto son citados en las partes del desarrollo de las mismas y no aquí, donde sólo se pretende dar un panorama de la ciencia de hoy enfocada a la reconstrucción tomográfica.

## 3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y DESARROLLO

### 3.1 Introducción

Como se aprecia de la Figura 1.2, antes de realizar la reconstrucción de modelo 3D, se requiere de un procesamiento previo 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.

Sin embargo, antes de poder hablar acerca de los métodos para el procesamiento de las imágenes, veamos un poco de la adquisición de las mismas. Cabe mencionar que la siguiente sección tiene los pruebas hechas y los resultados realizados para llevar a cabo la adquisición de imágenes, esto se ha hecho así, en vez de poner un fundamento teórico de la adquisición de imágenes, ya que el objetivo principal de este proyecto es realizar los procesos de cómputo para la reconstrucción tomográfica y no enfocarse en la adquisición de las imágenes.

### 3.2 Adquisición de imágenes

Para realizar la adquisición de imágenes para la reconstrucción tomográfica, se analizó el esquema *ya existente* de captura de imágenes del montaje eléctrico, para diseñar e implementar un sistema ya sea de espejos ó de varias cámaras [2] que permita realizar la captura de imágenes de más de un plano del espacio tridimensional. Y así tener información suficiente para la reconstrucción completa del fenómeno 3D.

Para la elección del montaje a usar se realizaron las pruebas que se enumeran a continuación:

1. Realizar la captura directa en la computadora con una videocámara y adecuar el sistema de espejos para que se proyecten los dos planos sobre la imagen capturada (ver Figura 3-1)

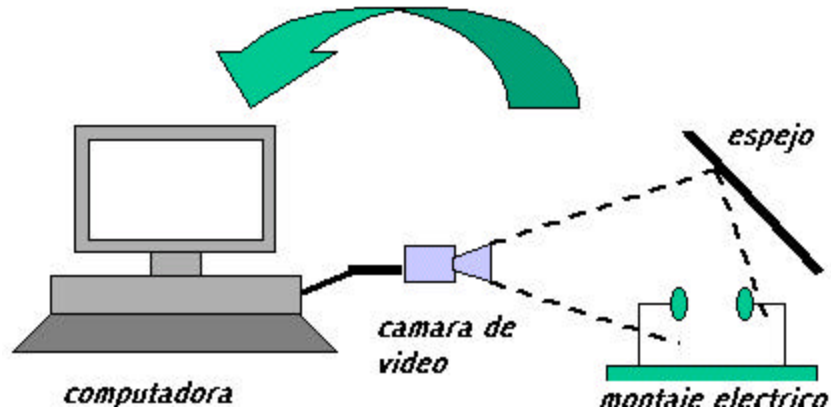


Figura 3-1 Esquema de prueba para la captura con 1 sola cámara y un espejo

La desventaja presentada en este esquema fue la difícil adecuación del sistema de espejos para garantizar la misma distancia focal de la captura en imágenes para ambos planos, por lo que se decidió no implementarlo.

2. Realizar la captura directa en la computadora con dos videocámaras simultáneamente, una videocámara conectada a una tarjeta de adquisición de video y la otra capturando por un puerto USB (ver Figura 3-2)

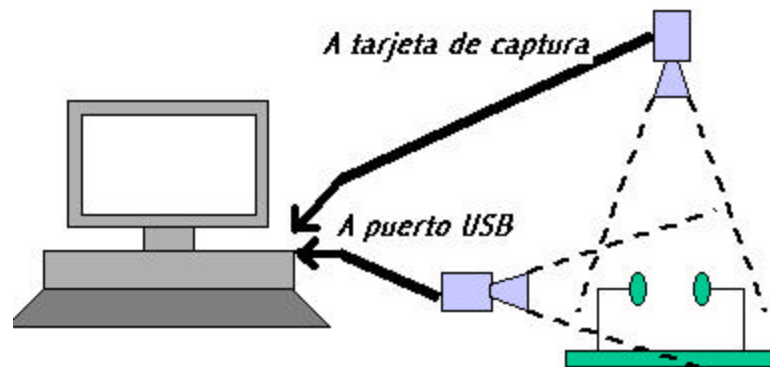


Figura 3-2 Esquema de captura con dos videocámaras (1 puerto USB y una tarjeta de adquisición de video)

La desventaja principal de este esquema, fue el bajo tiempo de respuesta de la computadora además del excesivo tiempo de transferencia, perdiéndose información (imágenes) en el flujo de video, por lo que este montaje fue descartado.

Se sospecha que el cuello de botella para el tiempo de respuesta se presentó debido a la velocidad de conmutación de bus interno de la tarjeta madre (Puerto a Disco Duro) entre los puertos de captura de imágenes (USB y PCI-Tarjeta de captura de video), ya que ambos dispositivos requieren de un acceso directo al mapa de memoria del disco duro (*cuya velocidad de respuesta es lenta en comparación con la memoria de acceso aleatorio*), más que a la velocidad del microprocesador y/o cantidad de memoria instalada.

De este mismo esquema se planteó la posibilidad de cambiar el uso del puerto USB, por otra tarjeta de adquisición de video, sin embargo, debido a las dificultades presentadas en la instalación de dos tarjetas simultáneamente (aún de distinta marca y controladores), se eliminó esta posibilidad.

3. Realizar la captura independiente por parte de dos cámaras, almacenándose los videos en cintas, para posteriormente realizar la edición de ambos videos y extraer las imágenes deseadas. Esto con el fin de evitar la pérdida de información durante la captura de los mismos. (ver Figura 3-3)

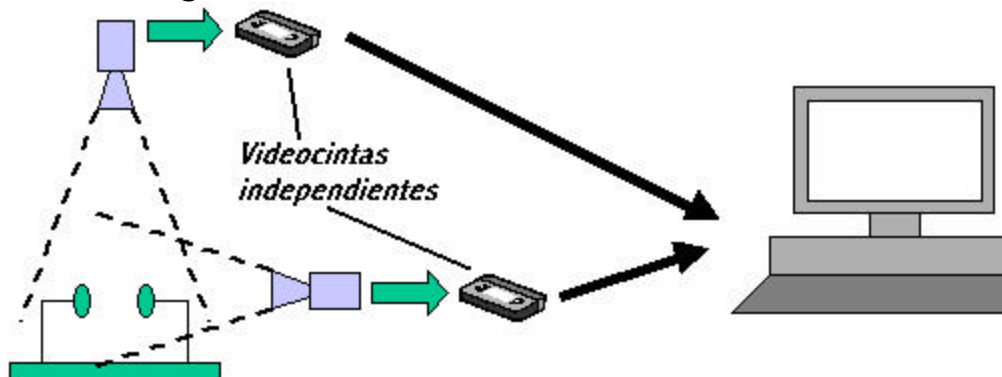


Figura 3-3 Esquema de captura independiente con dos videocámaras

Este es el montaje finalmente elegido (para facilitar la reconstrucción tomográfica [2],[9],[10],[11],[18]) y para el cual, se adecuó la estructura de captura de imágenes; relacionado a esto, se puede comentar que para garantizar lo más posible la ortogonalidad de los planos capturados, se implementó el siguiente arreglo:

- Con ayuda de un armazón sobre las video-cámaras, se montó un diodo láser cuyo haz es paralelo al vector perpendicular al plano de adquisición. Como se muestra en las Figuras 3-4 y 3-5.

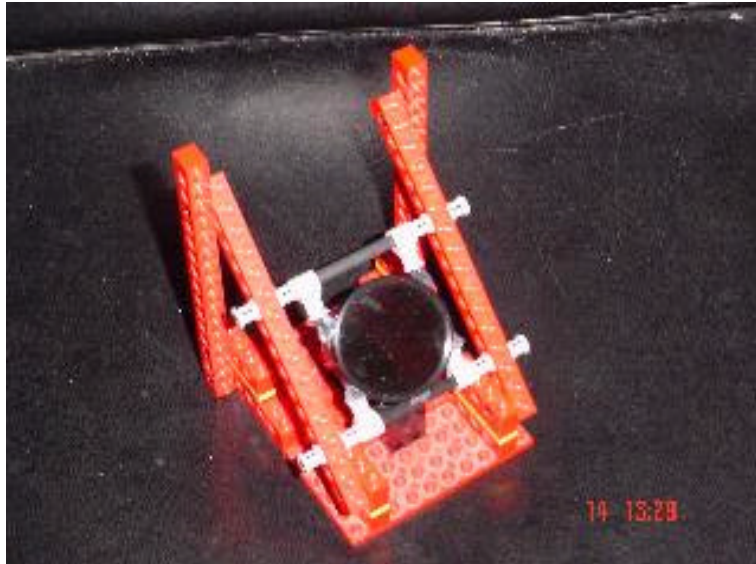


**Figura 3-4 Imagen del armazón para diodo láser**

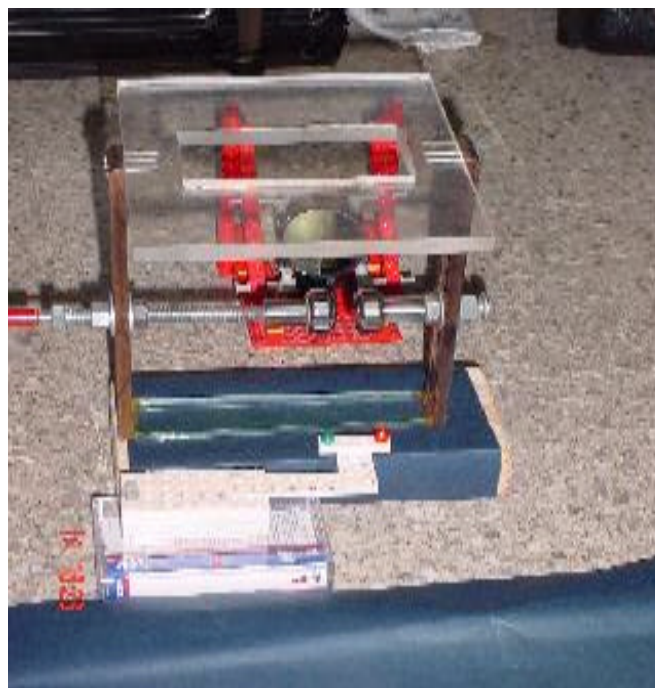


**Figura 3-5 Imagen del armazón para diodo láser**

- Por otra parte, se construyó un armazón con un espejo a 45 grados sobre la horizontal (se hace uso del piso, como marco de referencia). Como se muestra en la Figuras 3-6 y 3-7.



**Figura 3-6 Imagen del armazón con espejo a 45 grados sobre la horizontal**



**Figura 3-7 Imagen del armazón, cátodos y circuito de señal lumínica**



- Teniendo estos elementos, se llevó a cabo el proceso de "calibración" del esquema, para poder tomar los videos, con planos ortogonales, como se muestra en la Figuras 3-8 y 3-9.



**Figura 3-8 Imagen del esquema de captura de imágenes**



**Figura 3-9 Imagen del esquema de captura de imágenes ya calibrado**

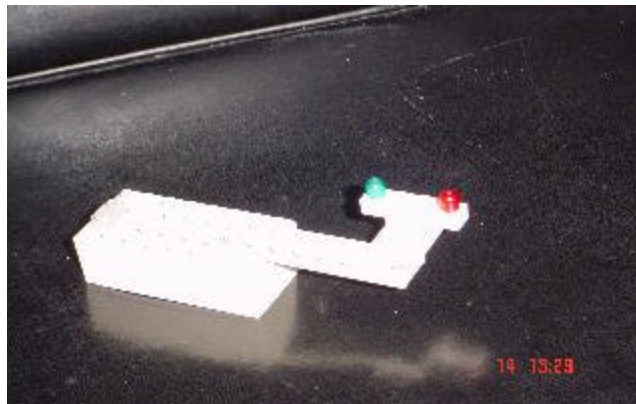
El procedimiento de calibración se efectúa como sigue:

- I) Se pone de frente, sobre un mismo plano y alineando los lentes de las video-cámaras, para marcar la zona de incidencia del diodo láser sobre la video-cámara que no tiene el diodo láser.
- II) Se monta una de las video-cámaras en un trípode y con el armazón del espejo, se busca que incida el haz del diodo láser, en la marca puesta en el inciso anterior.
- III) Alcanzado esto, se sustituye el armazón del espejo, por el arreglo eléctrico del que se captura las imágenes.

Realizados estos pasos, se procede a la captura de las imágenes.

### 3.2.1 Sincronización de imágenes

Antes de cerrar esta sección, cabe mencionar que dado que se realiza una captura independiente de imágenes, se encuentra la necesidad de poder sincronizar las imágenes en el video, y para lo cual, se implementó la generación de una señal luminosa, que es la que se busca en el video, para garantizar que se toman dos cuadros concurrentes del fenómeno. La señal luminosa se generó a través de un sencillo circuito electrónico, mostrado en la Figura 3-10.



**Figura 3-10 Imagen del generador de señal luminosa, para sincronización de imágenes**

Este circuito genera el prendido y el apagado alternado de los focos en sus extremos (uno de color rojo y otro de color azul), esto lo realiza a una frecuencia de: 4 Hz. La sincronía de los cuadros de imagen de los videos, para la obtención de las imágenes, se lleva a cabo al realizar una sincronización "macro-ajuste" buscando la presencia del fenómeno (la presencia de la descarga eléctrica) y una posterior sincronización "micro-



ajuste", basándose en el color e intensidad del foco prendido del circuito generador de la señal de sincronía. Ver Figura 3-11.



Figura 3-11 Imágenes frontal y superior, obtenidas de los videos

Otros ejemplos prácticos de la sincronización de imágenes para obtener información de las mismas, los encontramos en [12],[14],[15] y [17].

### 3.3 Procesamiento digital de imágenes

En esta actividad se implementan los algoritmos necesarios para poder separar de la imagen de trabajo, la zona donde se presenta el fenómeno (Figura 3-12) y así tener la información necesaria y suficiente para poder llevar a cabo la reconstrucción tomográfica. La implementación del procesamiento de imágenes se divide en varias etapas; filtrado, encuadre, interpolación y reconstrucción tomográfica.

Cabe mencionar que en este proyecto se trabaja con imágenes a color, donde cada una equivale a un conjunto de píxeles y cada uno tiene una coordenada "X" y "Y" que representan su ubicación bidimensional sobre la imagen. Así mismo, cada pixel tiene 3 componentes que representan una aportación de los colores básicos (Rojo, Verde y Azul) al color del píxel. Estas componentes toman un valor desde 0 hasta 255, debido a la implementación tecnológica (formato gráfico BMP de 24 bits).

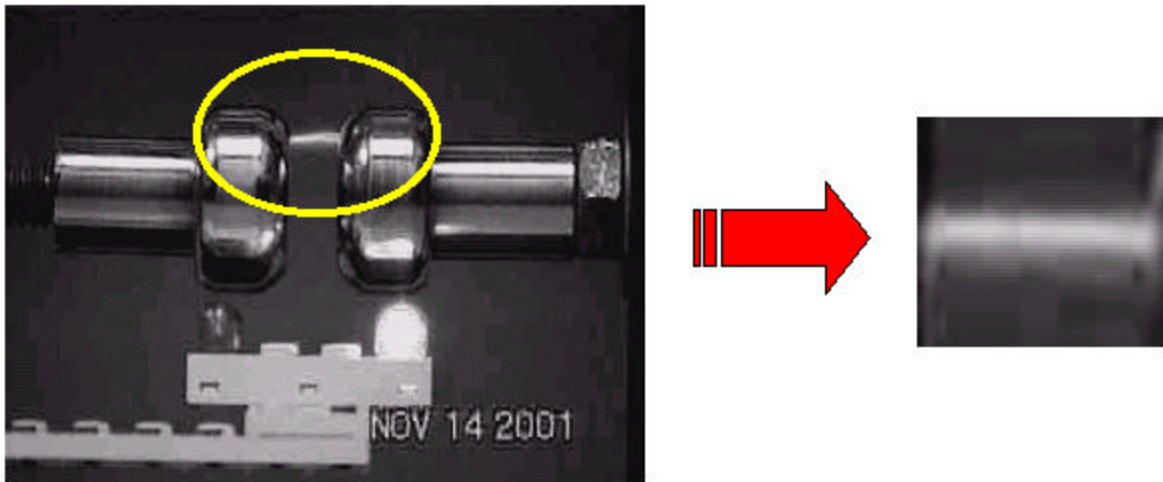


Figura 3-12 Objetivo del encuadre

Conociendo que cada punto en una imagen posee una cantidad definida de componentes de color básicos (rojo, verde y azul), y conociendo que el fenómeno a estudiar, se encuentra en un rango de estos colores básicos, se puede definir un procesamiento sobre la imagen de trabajo, para eliminar zonas de color que no corresponden al fenómeno de estudio y así aislar de manera más fácil la zona de ocurrencia del mismo. Ver Figura 3-13.

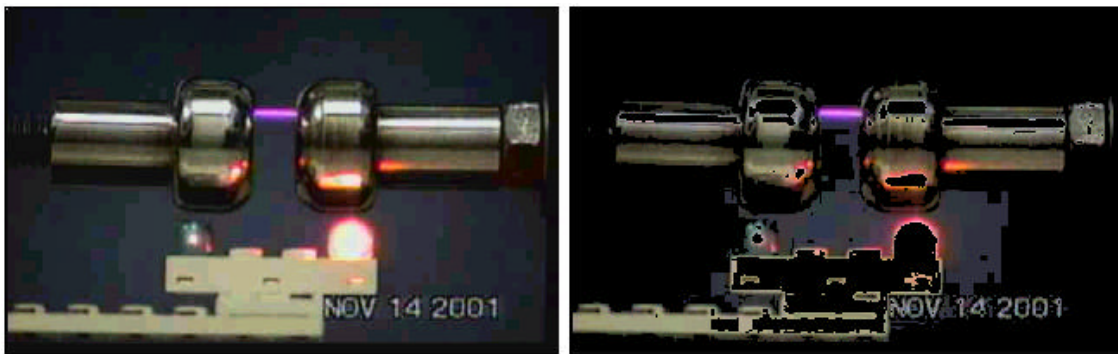


Figura 3-13 a) Imagen de trabajo b) Imagen tras el filtrado de color – Imagen tomada de la herramienta Retodeel

Este procedimiento se conoce como un filtrado por color [24] ([que se describe con mayor detalle en las sección 3.3.1](#)) y es la primera etapa del algoritmo de encuadre implementado, que se lista a continuación:

- 1.- Etapa de filtrado por color.
- 2.- Ubicación del fenómeno.- Se hace una búsqueda sobre la imagen de los píxeles, que contengan una contenido cromático muy característico del fenómeno.

3.- Se define la zona del fenómeno al ubicar todos los píxeles que tienen un contenido cromático relativo al fenómeno y que son "alcanzables" por el píxel original, únicamente a través de píxeles con contenidos cromáticos similares al píxel original.

Ejecutado este algoritmo, se ha definido la zona de ocurrencia del fenómeno, como se muestra en la Figura 3-14.



**Figura 3-14 Zona del fenómeno aislada - Imagen tomada de la herramienta Retodeel**

## Desarrollo

Para poder aislar la información del fenómeno (las descargas eléctricas) de toda la información presente en las imágenes capturadas, se requiere de un procesamiento de las mismas [19]; el cual, al aislar únicamente la información del fenómeno, nos permite realizar una reconstrucción tomográfica exclusivamente del fenómeno deseado.

El procesamiento de las imágenes se resume en tres principales etapas, como se muestra en la Figura 3-15.

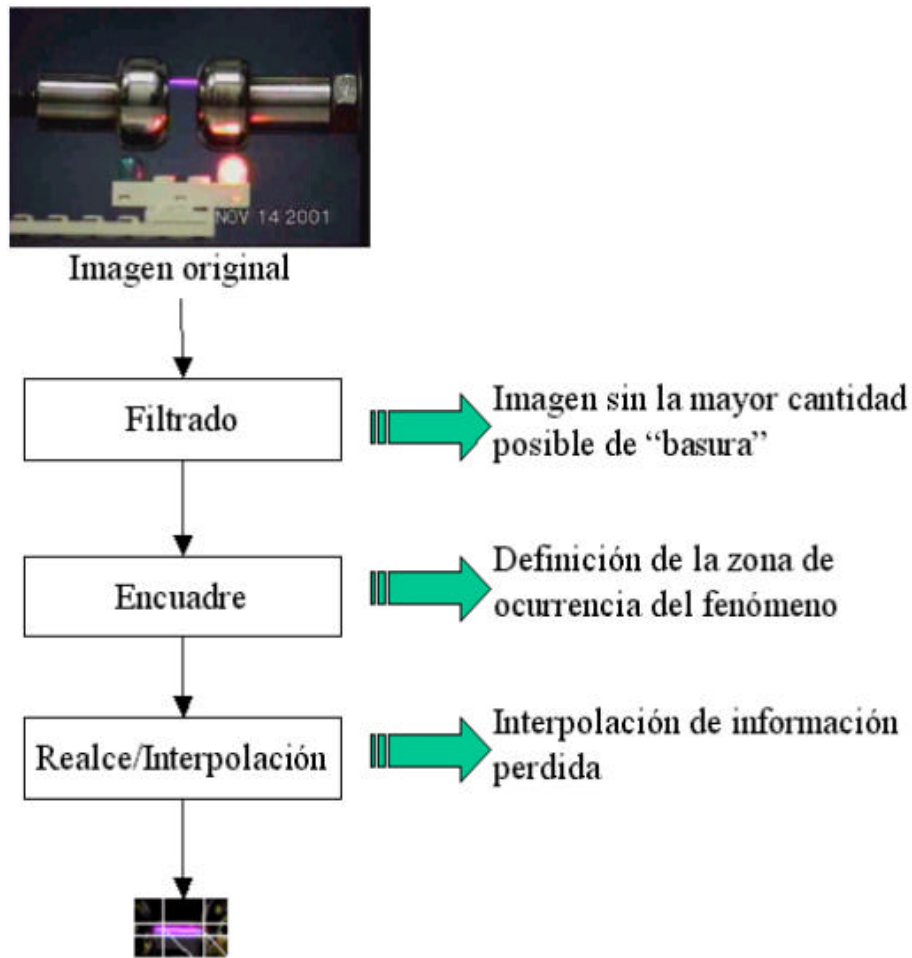


Figura 3-15 Etapas del procesamiento de imágenes para la reconstrucción tomográfica y sus resultados

La primera etapa, el filtrado, tiene como objetivo eliminar la mayor cantidad de información no relacionada con el fenómeno, y también así facilitar la identificación de la zona de ocurrencia del fenómeno.

Esto último se realiza por la etapa de encuadre, sin embargo, esta delimitación y la aplicación del filtrado origina una pérdida de información.

Para evitar lo anterior se realiza una interpolación final, que constituye la tercera etapa, la cual provee información espacial que no se puede definir a través dos planos de captura de imágenes y que ayuda a la reconstrucción tridimensional del fenómeno.

Otros ejemplos prácticos del procesamiento digital de imágenes lo encontramos en [12],[13],[21] y [22].

### 3.3.1 Proceso de filtrado

El empleo de mascarar espaciales para el procesamiento de las imágenes se denomina frecuentemente *filtrado espacial* (frente al *filtrado en el dominio de la frecuencia* empleando la transformada de Fourier), y las propias máscaras se denominan *filtros espaciales*. En esta sección se presentan los conceptos básicos de filtros espaciales lineales y no lineales para la mejora de la imagen.

Los filtros lineales se basan en conceptos que afirman que la función de transferencia y el impulso o función de distribución puntual de un sistema lineal son transformadas de Fourier inversas una de otra. Los filtros denominados de *paso bajo* atenúan o eliminan las componentes de alta frecuencia en el dominio de Fourier a la vez que dejan inalteradas las bajas frecuencias (es decir, el filtro "deja pasar" las frecuencias bajas). Las componentes de alta frecuencia caracterizan los bordes y los restantes detalles muy marcados de la imagen, y por ello el efecto de introducir un filtrado de paso bajo es el de hacer mas borrosa la imagen. De forma similar, los filtros de *paso alto* atenúan o eliminan las componentes de baja frecuencia. Como estas componentes son responsables de las características lentamente variables de la imagen, como el contraste global y la intensidad media, el resultado neto de un filtrado de paso alto es la reducción de estas características y, en correspondencia, una aparente agudización de los bordes y de los restantes detalles finos. Un tercer tipo de filtrado, denominado *filtrado de paso banda*, elimina unas regiones elegidas de frecuencias intermedias. Estos filtros se emplean para la restauración de imágenes y son de escaso interés para la mejora de imágenes.

La Figura 3-16 muestra las secciones transversales de filtros paso bajo, paso alto y paso banda con simetría circular, en el dominio de frecuencias y sus correspondientes filtros espaciales. Los ejes horizontales de las Figuras de la fila superior son frecuencias, y sus correspondientes en la fila inferior son coordenadas espaciales. Los perfiles de la fila inferior pueden ser empleados como indicación para especificar los filtros espaciales lineales.

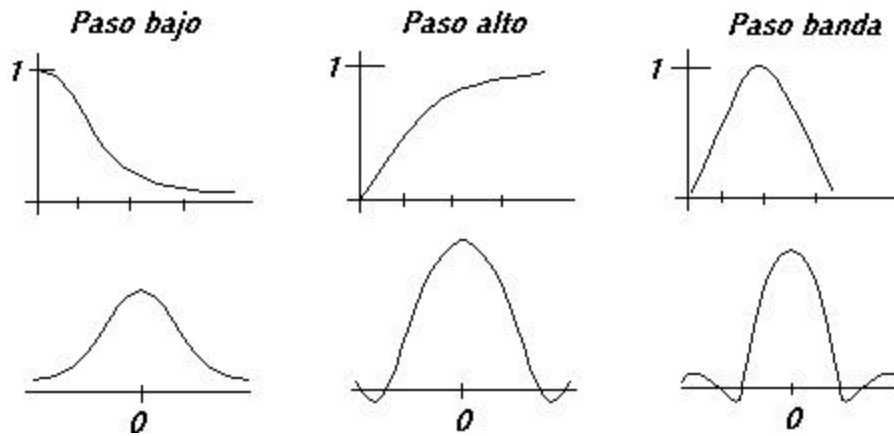


Figura 3-16 Arriba: Secciones transversales de perfiles básicos para filtros en el dominio de frecuencias con simetría circular. Abajo: secciones transversales de los filtros correspondientes en el dominio espacial

Sin embargo, con independencia del tipo de filtro lineal empleado, la aproximación básica consiste en sumar productos entre los coeficientes de la máscara y las intensidades de los píxeles bajo la máscara en un punto determinado de la imagen. La Figura 3-17 muestra una máscara 3x3 general. Denominando a los niveles de gris (ó las componentes de color en Rojo, Azul y Verde) de los píxeles bajo la máscara en un punto determinado por  $z_1, z_2, \dots, z_9$  la respuesta de una máscara lineal es:

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9$$

$w_1$	$w_2$	$w_3$
$w_4$	$w_5$	$w_6$
$w_7$	$w_8$	$w_9$

Figura 3-17 Una máscara 3x3 con coeficientes (pesos) arbitrarios

Los filtros espaciales no lineales operan también en entornos. Sin embargo, en general su operación se basa directamente en los valores de los píxeles en el entorno en consideración.

Más información y fundamento teórico sobre el filtrado de imágenes digitales, lo encontramos en [24], [25] y [26].

### 3.3.2 Algoritmo de filtrado

Para aislar el fenómeno de las descargas eléctricas y tener únicamente presente la información del fenómeno y así proceder a su reconstrucción tomográfica, se les aplica un proceso de filtrado por color a las imágenes de trabajo, el proceso de filtrado se explica a continuación.

El filtro de color que se aplica es el siguiente:

$I_f = fc(I)$ , donde  $I_f$  es la imagen posterior al filtrado, e  $I$ , la imagen previa. El filtro de color se define como:

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

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  $\partial_{R-} \leq \partial_{R+}, \partial_{G-} \leq \partial_{G+}, \partial_{B-} \leq \partial_{B+}$

La complejidad computacional del algoritmo de filtrado se ha estimado de orden "nm", para una imagen de n por m píxeles.

Otros ejemplos prácticos del filtrado de imágenes digitales los encontramos en [14],[17],[21] y [22].

### 3.3.3 Proceso de encuadre

El primer paso del análisis de imágenes consiste generalmente en segmentar ó hacer un encuadre de la imagen. La segmentación subdivide una imagen en sus partes constituyentes u objetos. El nivel al que se lleva a cabo esta subdivisión depende del problema a resolver. Esto es, la segmentación debería detenerse cuando los objetos de interés de una aplicación hayan sido aislados. Por ejemplo, en las aplicaciones autónomas de adquisición de blancos aire-tierra, el interés tiende, entre otras cosas, a la identificación de los vehículos de una carretera. El primer paso consiste en segmentar la carretera de la imagen y a continuación segmentar del contenido de la carretera los objetos cuya longitud o

tamaño corresponda a la de los potenciales vehículos. No tiene objeto llevar la segmentación por debajo de esta escala, ni tampoco hay ninguna necesidad de intentar segmentar componentes de la imagen situados fuera de los límites de la carretera.

En general, la segmentación autónoma es una de las tareas más difíciles del procesamiento de imágenes. Esta etapa del proceso determina el eventual éxito o fracaso del análisis. De hecho, la segmentación rara vez llega a alcanzar una solución satisfactoria. Por esta razón, se debe poner un considerable cuidado en aumentar la probabilidad de tener una segmentación robusta. En algunas situaciones, tales como las aplicaciones de inspección industrial, es posible que a veces se tome alguna medida de control sobre el entorno. Los diseñadores de sistemas de procesamiento de imágenes con experiencia prestan invariablemente una considerable atención a oportunidades de este tipo. En otras aplicaciones, como la adquisición de objetivos, el diseñador del sistema no tiene control sobre el entorno. Por consiguiente el método habitual se orienta a la selección del tipo de sensor más apropiado para realzar los objetos de interés mientras se disminuye la contribución de los componentes irrelevantes de la imagen. Un buen ejemplo es la utilización de imágenes infrarrojas para detectar objetos con una firma fuerte de calor tales como carros de combate en movimiento.

Los algoritmos de segmentación de imágenes generalmente se basan en una de las dos propiedades básicas de los valores de los píxeles: discontinuidad y similitud. En la primera categoría, el método consiste en dividir una imagen basándose en los cambios bruscos de los niveles de componentes de color. Las principales áreas de interés de esta categoría son la detección de puntos aislados y la detección de líneas y bordes de una imagen. Los principales métodos de la segunda categoría están basados en la umbralización, crecimiento de región, y división y fusión de regiones. El concepto de segmentación de una imagen basado en la discontinuidad o similitud de los valores del nivel de gris de sus píxeles es aplicable tanto a las imágenes estáticas como a las dinámicas (variantes en el tiempo). En el último caso, sin embargo, el movimiento puede utilizarse a menudo como un potente indicador para mejorar el rendimiento de los algoritmos de segmentación.

### **Detección de discontinuidades**

En esta sección se van a presentar varias técnicas para la detección de los tres tipos básicos de discontinuidades de una imagen digital: puntos, líneas y bordes. En la práctica, la forma más común de ver las discontinuidades es pasar una máscara a través de la imagen de la forma descrita en la



sección 3.3.1. Para una máscara 3x3 como la que se muestra en la Figura 3-18, este procedimiento implica calcular la suma de los productos de los coeficientes por los niveles de gris contenidos en la región encerrada por la máscara.

$w_1$	$w_2$	$w_3$
$w_4$	$w_5$	$w_6$
$w_7$	$w_8$	$w_9$

Figura 3-18 Una máscara general 3x3

Esto es, la respuesta de la máscara en un punto cualquiera de la imagen es:

$$R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9$$

$$= \sum_{i=1}^9 w_i z_i$$

donde  $z_i$  es el nivel de gris asociado con el coeficiente de la máscara  $w_i$ . Como habitualmente, la respuesta de la máscara está definida con respecto a la posición de su centro. Cuando la máscara está centrada en un píxel del límite, la respuesta se calcula utilizando el entorno parcial apropiado.

### Detección de puntos

La detección de puntos aislados de una imagen es directa. Utilizando la máscara que se muestra en la Figura 3-18, se sabe que se ha detectado un punto en la posición en la que está centrada la máscara si

$$|R| > T$$

donde  $T$  es un umbral no negativo, y  $R$  está dado por  $R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9$ . Básicamente, todo lo que hace esta formulación es medir las diferencias ponderadas entre el punto central y sus vecinos. Partiendo de la idea de que el nivel de color de un punto aislado será bastante diferente del de sus vecinos.

La máscara de la Figura 3.18 es la misma que la utilizada para el filtrado de alta frecuencia espacial (véase Figura 3-17). Sin embargo, aquí se hace hincapié estrictamente en la detección de puntos. Esto es, solamente son de interés las diferencias lo suficientemente grandes (como las

determinadas por  $T$ ) para que se consideren puntos aislados de una imagen.

### Detección de líneas

El siguiente nivel de complejidad implica la detección de líneas en una imagen. Considérense las mascarar que se muestran en la Figura 3-19. Si la primera mascara se trasladara por toda una imagen, podría responder con más fuerza a líneas (un píxel continuo) orientadas horizontalmente. Con un fondo constante, la respuesta máxima resultará cuando la línea pase por la fila central de la mascara. Esto se comprueba fácilmente esbozando una simple matriz de 1, con una línea de nivel de gris diferente (por ejemplo, 5) recorriendo horizontalmente la matriz. Un experimento similar podría revelar que la segunda mascara de la Figura 3-19 responde mejor a líneas orientadas a  $45^\circ$ ; la tercera a las líneas verticales y la cuarta a las líneas en la dirección de  $-45^\circ$ . Estas direcciones pueden también establecerse al observar que la dirección preferida de cada mascara esta ponderada con un coeficiente mayor (en este caso, 2) que las otras direcciones posibles.

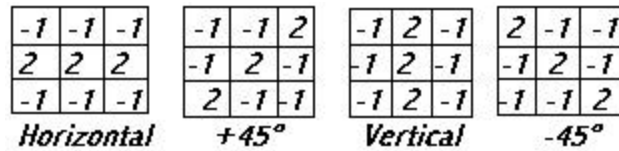


Figura 3-19 Máscaras de línea

Sean  $R_1, R_2, R_3$  y  $R_4$  las respuestas de las mascarar de la Figura 3-19, de izquierda a derecha, donde los  $R$  están dados por  $R = w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_9 z_9$ . Supóngase que todas las mascarar pasan sobre una imagen. Si en un cierto punto de la imagen  $|R_i| > |R_j|$ , para *todo*  $j \neq i$ , este punto será el que tenga la mayor probabilidad de estar asociado con una línea en la dirección de la mascara. Por ejemplo, si en un punto de la imagen,  $|R_1| > |R_j|$ , para  $j = 2, 3, 4$ , este punto en particular será el que tenga la mayor probabilidad de estar asociado con una línea horizontal.

### Segmentación orientada a regiones

El objetivo de la segmentación es dividir una imagen en regiones. En esta sección se presentan las técnicas de segmentación que están basadas en encontrar directamente las regiones.

Sea  $R$  la representación de la región completa de una imagen. Se puede contemplar la segmentación como un proceso que divide a  $R$  en  $n$  subregiones,  $R_1, R_2, \dots, R_n$  de tal forma que:

$$a) \bigcup_{i=1}^n R_i = R$$

b)  $R_i$  es una región conexca,  $i = 1, 2, \dots, n$

c)  $R_i \cap R_j = \text{vacío}$  para todo  $i$  y  $j, i \neq j$

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

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

donde  $P(R_i)$  es un predicado lógico sobre los puntos del conjunto  $R_i$ .

La condición a) indica que la segmentación debe ser completa; esto es, cada píxel debe estar en una región. La segunda condición requiere que los puntos de una región deben ser conexos. La condición c) indica que las regiones deben ser disjuntas. La condición d) trata de las propiedades que deben satisfacer los píxeles de una región segmentada —por ejemplo  $P(R_i) = \text{VERDADERO}$  si todos los píxeles de  $R_i$  tienen la misma intensidad—. Finalmente, la condición e) indica que las regiones  $R_i$  y  $R_j$  son diferentes en el sentido del predicado  $P$ .

### Crecimiento de regiones por agregación de píxeles

Como su nombre implica, *el crecimiento de regiones* es un procedimiento que agrupa píxeles o subregiones dentro de regiones mas grandes. La sencillez de este método radica en la *agregación de píxeles*, que comienza con un conjunto de puntos “generadores” a partir de los que van creciendo las regiones al agregar a cada uno de estos puntos los píxeles próximos que tienen propiedades similares (como nivel de gris, textura, color). Para ilustrar este procedimiento consideremos la Figura 3-20(a), en la que los números de dentro de las celdas representan valores de nivel de gris o de color. Vamos a utilizar como generadores los puntos de coordenadas (3, 2) y (3, 4). Empleando dos puntos de salida se obtiene una segmentación que consiste en, al menos, dos regiones:  $R_1$ , asociada con el generador (3, 2), y  $R_2$ , asociada con el generador (3, 4). La propiedad  $P$  que se utiliza para incluir un píxel en una de las regiones es que la diferencia absoluta entre el nivel de color de ese píxel y el del generador sea menor que un umbral  $T$ . Cualquier píxel que satisfaga esta

propiedad simultáneamente para ambos generadores se asigna (arbitrariamente) a la región  $R_i$ . La Figura 3-20(b) muestra el resultado que se obtiene al utilizar  $T = 3$ . En este caso, la segmentación consiste en dos regiones, en las que los puntos de  $R_1$  están señalados como  $a$  y los de  $R_2$  como  $b$ . Se observa que cualquier punto de salida de cualquiera de estas dos regiones resultantes podría proporcionar el mismo resultado. Sin embargo, eligiendo  $T = 8$ , se podría obtener una región única, como muestra la Figura 3-20(c).

	1	2	3	4	5
1	0	0	5	6	7
2	1	1	5	8	7
3	0	1	6	7	7
4	2	0	7	6	6
5	0	1	5	6	5

(a)

a	a	b	b	b
a	a	b	b	b
a	a	b	b	b
a	a	b	b	b
a	a	b	b	b

(b)

a	a	a	a	a
a	a	a	a	a
a	a	a	a	a
a	a	a	a	a
a	a	a	a	a

(c)

**Figura 3-20 Ejemplo de crecimiento de regiones utilizando puntos de salida conocidos: (a) matriz imagen original; (b) resultado de la segmentación al utilizar una diferencia absoluta entre los niveles de intensidad menor de 3; (c) al usar una diferencia menor de 8**

La Figura 3-20, aunque sencilla en si misma, muestra algunas de las dificultades fundamentales del crecimiento de regiones. Los dos problemas inmediatos son la selección de los generadores iniciales que representen correctamente a las regiones de interés y la selección de las propiedades adecuadas para la inclusión de puntos en las diversas regiones durante el proceso de crecimiento. La selección de un conjunto de uno o mas puntos de salida normalmente puede basarse en la naturaleza del problema. Por ejemplo, en las aplicaciones militares de imágenes infrarrojas, los objetivos de interés están generalmente mas calientes (y por ello aparecen mas brillantes) que el fondo. La elección de los píxeles de

mas brillo es, por tanto, el punto de salida natural para un algoritmo de crecimiento de regiones. Cuando no se dispone de información a priori el procedimiento consiste en calcular para cada píxel el mismo conjunto de propiedades que se utilizaran al final para asignar píxeles a las regiones durante el proceso de crecimiento. Si el resultado de estos cálculos muestra agrupaciones de valores, los píxeles cuyas propiedades los sitúan cerca del centro de estas agrupaciones se pueden utilizar como generadores. Por ejemplo, en la ilustración anterior, un histograma de nivel de color podría mostrar que los puntos con intensidad 1 y 7 son los mas predominantes.

La selección de criterios de similitud depende no solamente del problema que se esta considerando, sino también del tipo de datos de imagen de que se dispone. Por ejemplo, el análisis de las imágenes de satélite para trabajos terrestres depende mucho del empleo del color. Este problema puede ser significativamente mas difícil de tratar cuando solo se utilizan imágenes monocromas. Por desgracia, el disponer de imágenes multiespectrales o de algún tipo complementario es la excepción de la regla en el procesamiento de imágenes. Normalmente el análisis de la región debe realizarse con un conjunto de descriptores basados en la intensidad y en las propiedades espaciales (tales como momentos o texturas) de una imagen fuente única.

Los descriptores pueden proporcionar resultados falsos si no se utiliza la información de conectividad o adyacencia en el proceso de crecimiento de regiones. Por ejemplo, visualizar una distribución aleatoria de píxeles con solo tres valores de intensidad distintos. El reagrupar píxeles con la misma intensidad para formar una "región" sin prestar atención a la conectividad puede generar un resultado de segmentación que no tenga sentido en el contexto de esta presentación.

Otro problema del crecimiento de regiones es la formulación de una regla de parada. Básicamente, el crecimiento de una región debe detenerse cuando no hay mas píxeles que satisfagan el criterio de inclusión en esa región. Hemos indicado que criterios tales como la intensidad, textura y color son locales por naturaleza y no tienen en cuenta la "historia" del crecimiento de la región. Otros criterios adicionales que incrementan la potencia del algoritmo de crecimiento de regiones utilizan el concepto de tamaño, de la semejanza entre un píxel candidato y los píxeles del crecimiento anterior (como, por ejemplo, la comparación entre la intensidad de un candidato y la intensidad media de la región), y de la forma de la región que esta en fase de crecimiento. El empleo de este tipo de descriptores esta basado en la suposición de que se puede disponer por lo menos de un modelo de resultados esperados.

Más información y fundamento teórico sobre el encuadre ó definición de zonas en imágenes digitales, lo encontramos en [24], [25] y [26].

### 3.3.4 Algoritmo de encuadre

Aunque el filtrado elimina mucha información no deseada en la imagen (aquella que no esté relacionada con el fenómeno), en las pruebas, se apreció que resta información no deseada (ver Figura 3-21), por lo que se implementó un algoritmo de encuadre que aísla la zona del fenómeno.

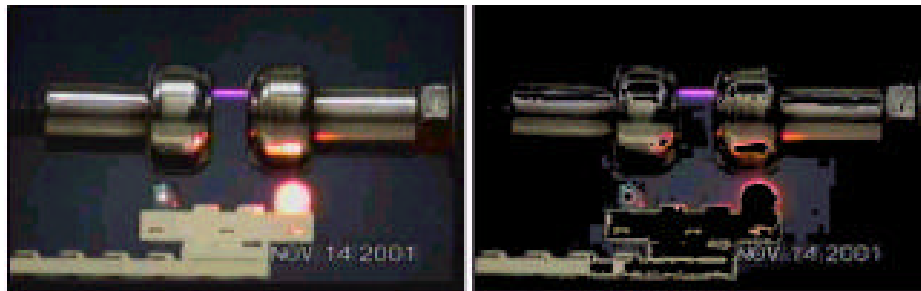


Figura 3-21 a) Imagen de trabajo. b) Imagen tras el filtrado de color - Capturado de la herramienta Retodeel.

El algoritmo de encuadre, se basa en encontrar un píxel que es muy característico del fenómeno (píxel 'raíz') en base a su color y posteriormente definir la zona de ocurrencia del fenómeno, alrededor del píxel característico.

La definición del píxel característico se da al limitar los rangos de posibles valores para sus componentes básicos, determinados experimentalmente. A este píxel, se le conoce como el píxel 'raíz' del algoritmo, el cual sirve para definir la zona del fenómeno.

Un píxel  $q$  que cumpla con el criterio de:

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

Donde  $\Delta r$  es un parámetro que restringe la "holgura" que se le permitió al filtro (ver 3.3.1).

Si  $q$  cumple las restricciones antes mencionadas, entonces  $q$  se le designa como el píxel 'raíz'.

La definición de la zona de ocurrencia del fenómeno se da al aislar de la imagen, sólo aquellos píxeles que sean colindantes en vertical, en horizontal ó en diagonal con el píxel 'raíz' ó un píxel previamente marcado como parte de la zona del fenómeno. Así sucesivamente hasta que ya no se puedan definir más píxeles como miembros de la zona donde ocurre el fenómeno.

$I_e = En(I_f)$ , donde  $I_e$  es la imagen posterior al encuadre, e  $I_f$ , la imagen previa (filtrada). El encuadre ( $En()$ ) se define como:

$$En(I_f) = \{p \in I_f \text{ SI existe una trayectoria de} \\ \text{píxeles } 8\_vecinos \text{ de 'raíz' a } p \text{ y } \partial_{R-} \leq R(t) \leq \partial_{R+} \text{ y} \\ \partial_{G-} \leq G(t) \leq \partial_{G+} \text{ y } \partial_{B-} \leq B(t) \leq \partial_{B+} \text{ y } \partial_{R-} \leq R(p) \leq \partial_{R+} \text{ y} \\ \partial_{G-} \leq G(p) \leq \partial_{G+} \text{ y } \partial_{B-} \leq B(p) \leq \partial_{B+} \}$$

Donde  $t$  es un elemento de la trayectoria que se va construyendo.

Se dice que un píxel  $q$  es 8\_vecino de un píxel  $r$  si  $q$  es adyacente horizontal, vertical ó diagonal de  $r$ .

Experimentalmente, se ha determinado:

$$\partial_{R-} = 52, \partial_{R+} = 255, \partial_{G-} = 6, \partial_{G+} = 170, \\ \partial_{B-} = 4, \partial_{B+} = 255, \Delta r = 5$$

La complejidad computacional del algoritmo de encuadre se ha estimado de orden "nm" para una imagen de n por m píxeles.

Otros ejemplos prácticos del encuadre ó definición de zonas en imágenes digitales los encontramos en [10], [12], [16], [17], [21].

### 3.3.5 Proceso de realce

Antes de empezar esta sección es importante recordarle al lector, que en este proyecto, el concepto de realce implica el completar la información existente para poder después generar la reconstrucción 3D. En la literatura común del procesamiento digital de imágenes, el realce se encuentra más vinculado con el incremento del contraste en la imagen [25], y no con la preparación de información para la reconstrucción tomográfica.

Es por esto, que no existe fundamento teórico previo para esta etapa, sino que es un desarrollo totalmente innovador, surgido por la necesidad del proyecto. Aclarado este punto, se procede a explicar el proceso de realce de este proyecto.

Una vez que se tienen definida la zona de ocurrencia del fenómeno así como eliminada la mayor cantidad de información redundante, se reconstruye tanta información real del fenómeno como se puede presuponer del mismo, en particular, la información relativa a la profundidad del fenómeno y sus dimensiones. Información que se puede obtener muy distorsionada desde las imágenes, pero que a través de una interpolación se ha refinado.

La información de profundidad que se debe de interpolar en base al conocimiento previo del fenómeno, se puede entender más fácilmente al analizar los siguientes esquemas.

Teniendo nuestras imágenes del fenómeno, donde cada una equivale a un plano de proyección (perpendiculares) del fenómeno sobre la imagen misma, podemos hacer el proceso inverso de la proyección, para poder reconstruir el fenómeno. Como se muestra en la Figura 3-22.

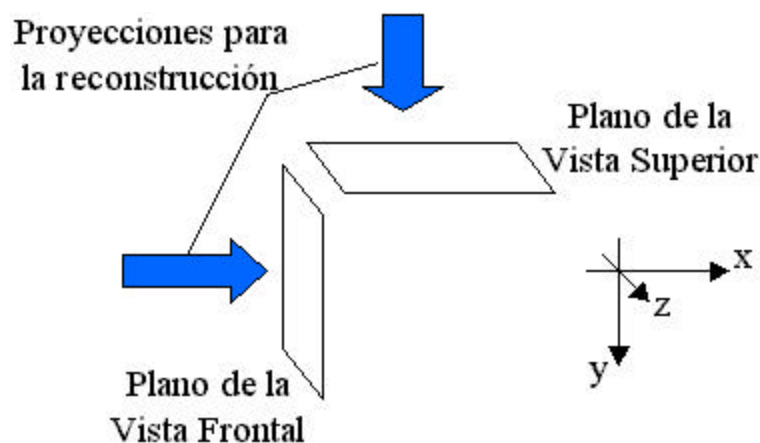


Figura 3-22 Proyecciones para la reconstrucción

Sin embargo, considerando únicamente la información de las imágenes y tomando en cuenta que las proyecciones son perpendiculares, el contorno del volumen reconstruido es rectangular, como se aprecia en la Figura 3-23.



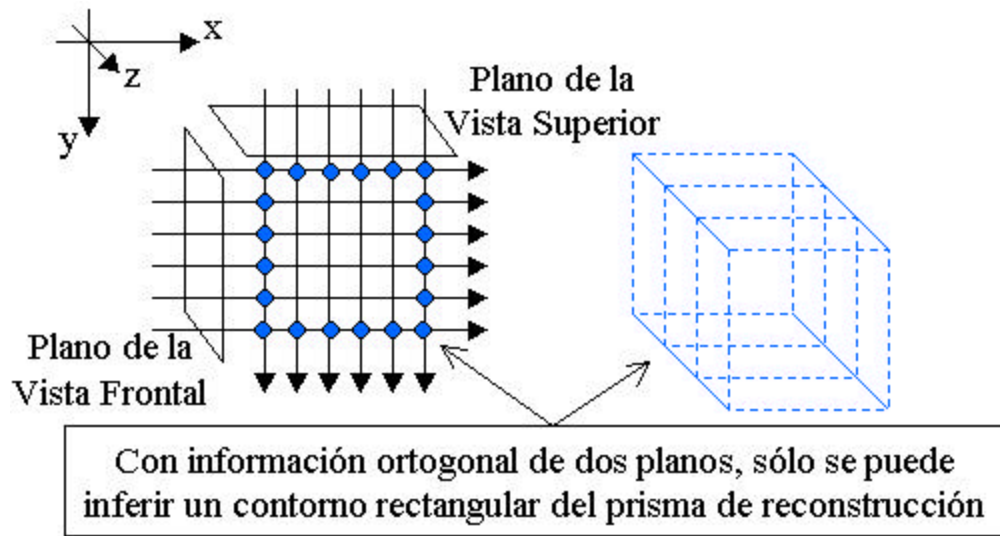


Figura 3-23 Contorno del prisma sin interpolar información

Es por esto, que para mejorar la calidad de la reconstrucción tomográfica, se ha hecho una interpolación sobre la información del contorno. Se presupone que el contorno del arco eléctrico tiene forma elipsoidal con posibles desviaciones en su periferia, como se aprecia en la Figura 3-24.

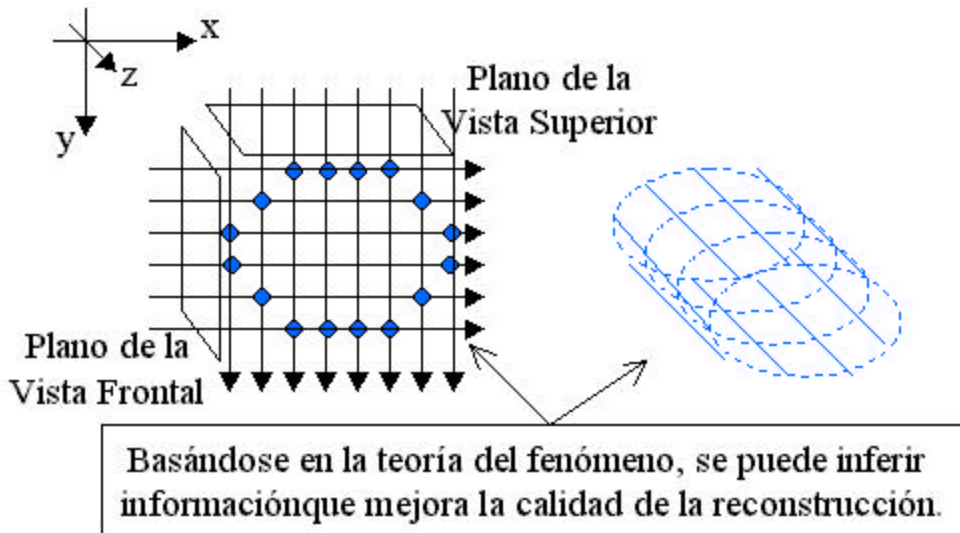


Figura 3-24 Contorno del prisma interpolando información

En el caso de este proyecto y dada la cantidad de información que se puede obtener del fenómeno, la mejor aproximación que se puede hacer es una aproximación elipsoidal, con un ancho y largo de la forma, proporcionales a las zonas donde se vislumbra el fenómeno en las

imágenes capturadas del mismo, como se muestra en la Figura de la izquierda.

Todo esto se realiza en el algoritmo de realce que se describe a continuación.

### 3.3.6 Algoritmo de realce

Sea  $V_r \in \mathfrak{R}^3$  el conjunto de vértices posterior al realce, nótese en particular, que es en esta etapa donde se empieza a trabajar con información tridimensional [20].

El proceso de realce se describe a continuación:

Sea  $\Delta x, i$  la cantidad de píxeles horizontales con información del fenómeno en la imagen de la vista frontal, para la columna  $i$  de píxeles. Y sea  $\Delta y, j$  la cantidad de píxeles verticales con información del fenómeno en la imagen de la vista frontal, para la columna  $j$  de píxeles. Como se muestra en la Figura 3-25.

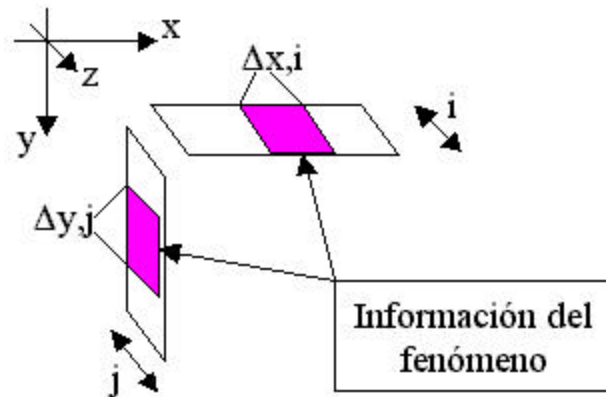


Figura 3-25 Parámetros de las proyecciones

Estos valores,  $\Delta x, i$  y  $\Delta y, j$ , nos permitirán definir las dimensiones para el radio mayor y menor de la elipse en la que se circunscriben los vértices que definen el contorno para cada "nivel" de vértices.

Ahora, sean  $P_{i,j}.x, P_{i,j}.y, P_{i,j}.z$  las componentes en X, Y y Z del punto espacial  $P \in \mathfrak{R}^3$ .

Entonces, basándose en estas definiciones, diremos que el conjunto de vértices  $V_r \in \mathfrak{R}^3$ , que se obtienen como resultado de la etapa de realce es:

$V_r = V_{hs} \cup V_{hi} \cup V_{li} \cup V_{ld}$ , donde;

$V_{hs} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid X(v) \text{ es la coordenada X de un píxel distinto de cero en la imagen superior, en la columna } i \text{ y } Y(v) \text{ es el max(todos los píxeles distintos de cero en la imagen frontal, en la columna } i), i=[0 \dots \text{largo de la imagen frontal}-1]\}$

$V_{hi} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid X(v) \text{ es la coordenada X de un píxel distinto de cero en la imagen superior, en la columna } i \text{ y } Y(v) \text{ es el min(todos los píxeles distintos de cero en la imagen frontal, en la columna } i), i=[0 \dots \text{largo de la imagen frontal}-1]\}$

$V_{li} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid Y(v) \text{ es la coordenada Y de un píxel distinto de cero en la imagen frontal, en la columna } j \text{ y } X(v) \text{ es el max(todos los píxeles distintos de cero en la imagen superior, en la columna } j), j=[0 \dots \text{largo de la imagen superior}-1]\}$

$V_{ld} = \{v \in \mathfrak{R}^3 \mid Y(v) \text{ es la coordenada Y de un píxel distinto de cero en la imagen frontal, en la columna } j \text{ y } X(v) \text{ es el min(todos los píxeles distintos de cero en la imagen superior, en la columna } j), j=[0 \dots \text{largo de la imagen superior}-1]\}$

Con estas definiciones tenemos en el conjunto  $V_r$  a los vértices que definen el volumen para la reconstrucción, sin embargo, se aprecia fácilmente que no reflejan ningún conocimiento previo del fenómeno, ver Figura 3-25. Por lo que para que se mejore la calidad de la reconstrucción se ajusta el prisma para que siga la forma elipsoidal con radio mayor y menor de igual tamaño a los anchos de las columnas con píxeles distintos de cero en las imágenes frontales y superior, respectivamente.

Definamos  $V_{ri} = \{v \in V_r \mid Z(v)=i\}$  como el subconjunto de vértices que tienen mismo "nivel" de profundidad dado por su componente en  $Z$  ( $Z(v)$  es la coordenada  $Z$  del vértice  $v$ ), que al aplicarle a cada elemento del conjunto su aproximación a la elipse circunscrita en el rectángulo definido por los elementos de  $V_{si}$ , de la forma siguiente:

Sea  $v_k \in V_{si}$  con  $k=[0,1,2,\dots,|V_{ri}|-1]$ , entonces

$$X(v_k) = 0.5 * \max(X(v_m) - X(v_n)) * \text{seno}(k * 360),$$

$$Y(v_k) = 0.5 * \max(Y(v_m) - Y(v_n)) * \text{coseno}(k * 360),$$

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

Quedando entonces  $V_{ri} = V_{s1} \cup V_{s2} \cup V_{s3} \cup \dots \cup V_{sn}$ , donde n es el largo (número de columnas) de las imágenes frontal y superior.

En la Figura 3-26 se aprecia de forma gráfica todos los elementos antes usados, para la generación de  $V_{ri}$ .

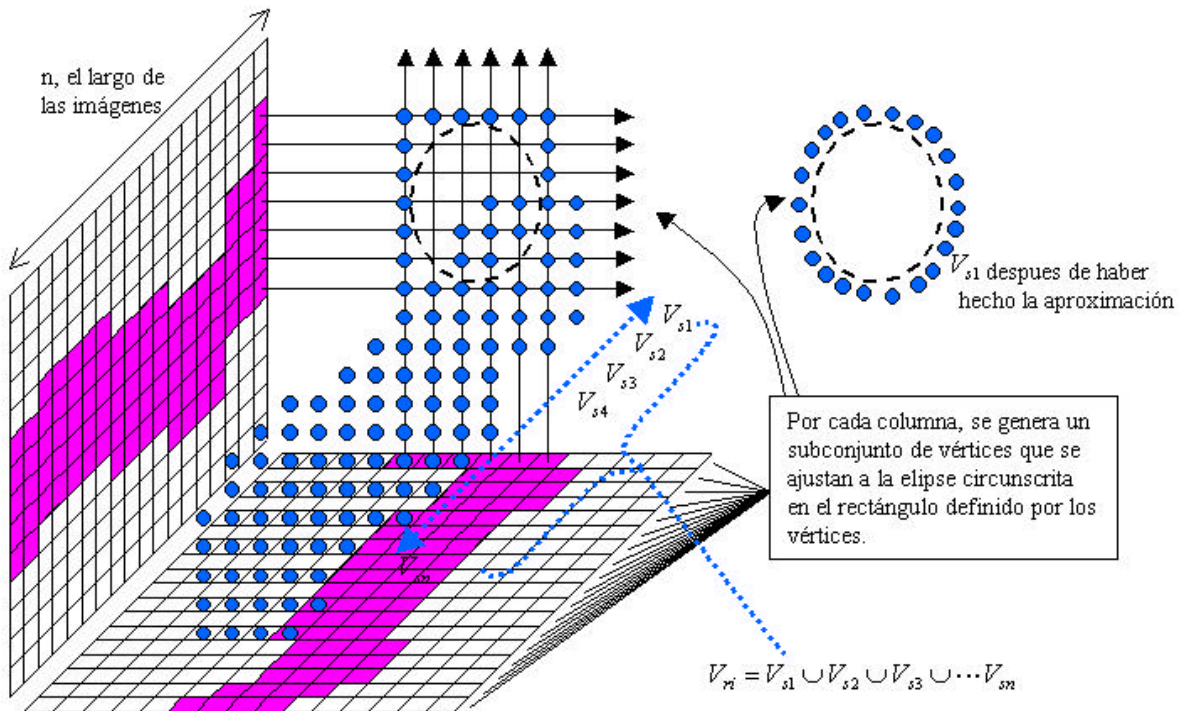


Figura 3-26 Conjunto de vértices creados para la reconstrucción

Y con esto obtenemos un conjunto de vértices que representan el contorno de un prisma que equivale aproximadamente al volumen espacial de ocurrencia del fenómeno. Sin embargo, todavía no termina el trabajo, ya que se requiere de definir las interconexiones de estos vértices, para que se defina perfectamente el prisma, lo cual se realiza en la etapa de reconstrucción tomográfica cuyo algoritmo [será descrito](#) en la [siguiente sección](#).

La complejidad computacional del algoritmo de realce se ha estimado de orden " $n^2m^2$ " para un par de imágenes de n por m píxeles cada una.

Otros ejemplos prácticos del realce de imágenes digitales los encontramos en [12], [16], [17], [21] y [22].

### 3.4 Reconstrucción Tomográfica

Desde los sistemas de escaneo por láser hasta la reconstrucción médica, el desarrollo de dispositivos de adquisición de imágenes/modelos ha dirigido las necesidades para el desarrollo de técnicas para la reconstrucción de objetos. La reconstrucción de objetos es una tarea que consiste en crear un modelo geométrico a partir de un conjunto de información tridimensional provisto por un dispositivo de escaneo. Tales conjuntos tridimensionales pueden variar substancialmente en términos de precisión, resolución ó estructura de los datos. En todos los casos, la tarea de reconstrucción debe crear un modelo geométrico correspondiente al objeto real. La naturaleza de este modelo reconstruido es dependiente del tipo de tarea de alto nivel, desarrollado a posteriori (ver Figura 1.5), como la visualización, reconocimiento de objetos, ó cómputo científico (análisis mecánico ó de flujo).

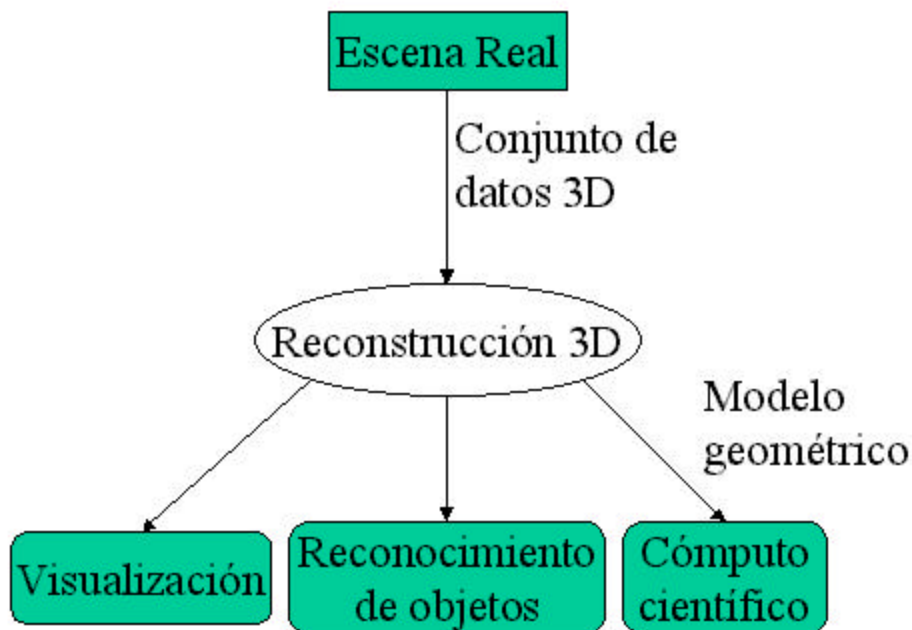


Figura 3-27 El esquema general de reconstrucción de objetos

Idealmente, un sistema para la reconstrucción en general, debería manejar tanto imágenes volumétricas como rangos de datos tridimensionales, ambos con diferentes niveles de ruido y resolución. Aun más, debería poder reconstruir objetos "suaves" así como objetos de caras poliédricas teniendo un control sobre la densidad de las mallas y la precisión de encaje sobre el objeto real.

Para todo modelo de mallas, en general, se requieren los siguientes puntos:

1) *Segmentación*: la escena descrita en el conjunto tridimensional, es usualmente constituido por varios objetos cercanos entre sí, espacialmente. La tarea de segmentación consiste en aislar los puntos de los objetos a partir de puntos de datos correspondientes a objetos vecinos ó colindantes.

2) *Filtrado*: Conjuntos reales de información tridimensional (conjuntos 3D), siempre incluyen alguna cantidad de ruido. Por lo tanto, normalmente se requiere el suavizar el modelo reconstruido para reducir el efecto del ruido, sin remover características salientes, tales como bordes afilados.

3) *Extrapolación de datos perdidos*: En muchos casos, los conjuntos 3D no describen en su totalidad un objeto dado. Por lo tanto, es necesario el manejar esos datos de puntos perdidos, extrapolando la superficie.

4) *Control de densidad de mallas*: Cuando un conjunto de datos densos son provistos, normalmente se requiere, especialmente para propósitos de visualización, el reducir enormemente la cantidad de información almacenada en el modelo geométrico. Por el contrario, cuando se provee información muy dispersa, es necesario el 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 una modelo, y que es precisamente uno de los objetivos de las mallas simplex.](#)

5) *Control de calidad de mallas*: Muchos algoritmos de computación científica (mecánicas, 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" [12]. Por ejemplo, el "isosuperficiamiento" es una técnica usada comúnmente para reconstruir superficies, a partir de imágenes volumétricas [13]. Como sea, al no manejar datos perdidos ó con ruido, no puede ser considerado como una técnica de reconstrucción general. Similarmente, la triangulación DeLaunay, es usada ampliamente para la reconstrucción serial, ó reconstrucción a partir de puntos desorganizados, pero no puede extrapolar puntos perdidos [13],[14].

El modelado deformable se ajusta bien para la reconstrucción de objetos en general ya que poco asume acerca de la silueta a recuperar y puede trabajar con datos perdidos ó ruidosos [15]. 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. Mucho 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 de ajustarse de manera adecuada para todas las superficies, independientemente de su geometría y topología.

### **El problema de parametrización**

La mayoría de los sistemas de reconstrucción se basan en representaciones paramétricas, tales como splines ó elementos finitos. Una representación paramétrica provee una transformación continua entre un espacio de parámetros  $\Omega$  incrustado en el plano Euclidiano  $\mathcal{R}^2$  y una superficie tridimensional. La existencia de una representación continua habilita la definición de cantidades geométricas, tales como un vector normal ó información de curvatura, en cualquier lado de la superficie del modelo. Esto normalmente es requerido para tareas de alto nivel tales como el diseño CAD (Diseño Asistido por Computadora).

Como sea, las representaciones paramétricas sufren de dos problemas. El primer problema está relacionado con la representación de Figuras complejas. Ya que el parametrizar una Figura es equivalente a mapear a un subconjunto del plano Euclidiano hacia la Figura, puede ocurrir un problema cuando el objeto no es plano, cilíndrico, o de topología toroidal. Para Figuras esféricas por ejemplo, al menos un polo o punto degenerativo es creado al mapear un plano en una esfera. Este punto lleva a muchos problemas en la deformación de la superficie ya que el vector normal y de curvatura no pueden ser calculados de manera estable en el vértice. Se ha hecho mucho trabajo en el campo de diseño geométrico asistido por computadora para sobrepasar estos problemas topológicos [16], [17]. Un acercamiento común consiste en "zurcir" varios parches paramétricos y asegurara así la adecuada continuidad geométrica con los parches.



El segundo problema recae en la naturaleza de la parametrización que influye grandemente al esquema de deformación. La influencia de la parametrización se origina a partir de la naturaleza de transparencia de los funcionales que son usualmente definidos en términos de cantidades paramétrico-dependientes, tales como las derivadas parciales. Este es el caso, por ejemplo, del funcional ampliamente usado: "plato delgado", que se basa en derivadas de primer orden. Cuando la deformación es encajonada por funcionales paramétrico-dependientes, el modelo geométrico reconstruido es dependiente de la naturaleza de la parametrización inicial.

En la mayoría de los artículos de investigación [3],[4],[5],[9],[11],[16], se pone poca atención a los errores introducidos por distorsiones métricas entre el espacio de parámetros y la superficie. Esto se debe principalmente a que se limitan a objetos con [topologías simples, como las topologías planares o cilíndricas](#).

Como una conclusión, el construir modelos deformables paramétricos de topología arbitraria es un problema difícil ya que encajona el problema de tener discontinuidades por los parches así como por mantener la parametrización con poca distorsión. No es muy factible para ser usado como un método general de reconstrucción debido a su costo computacional al realizar cambios topológicos tales como crear hoyos ó refinamientos locales.

Las mallas *simplex* se proponen como una representación de superficies, usadas en un sistema de reconstrucción [2]. 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 el definir en cada vértice, cantidades geométricas discretas tales como el promedio de curvatura ó vectores normales. Se ha definido fuerzas de regularización en las mallas simplex permitiendo una continuidad geométrica de alto orden, de manera simple y eficiente. Además, operadores de topología locales y globales se definen para refinar una malla simplex ó cambiar su orden, de manera sencilla. Ya que las mallas simplex no son modelos paramétricos, no es necesario el actualizar una matriz de rigidez o el mapeo de parametrización cuando se realizan transformaciones de topología.

[Más información y fundamento teórico sobre la reconstrucción tomográfica, lo encontramos en \[24\].](#)



### 3.4.2. Método de las 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 al lector revise la bibliografía relacionada [1].

Las definiciones de las mallas simplex y las mallas triangulares ó "triangulaciones" están muy relacionadas. Más precisamente, sus grafos subyacentes son duales entre si. 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  $\mathbf{R}^d$  de dimensión  $d$ . Luego, se consideran las mallas 1 y 2-simplex para  $\mathbf{R}^3$  como representaciones de contornos y superficies.

#### Definiciones de células y mallas simplex

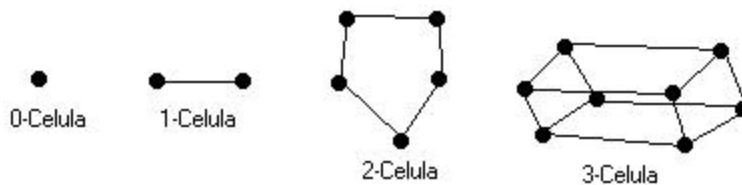


Figura 3-28 Ejemplos de  $p$ -células  $0 \leq p \leq 3$ .

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

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

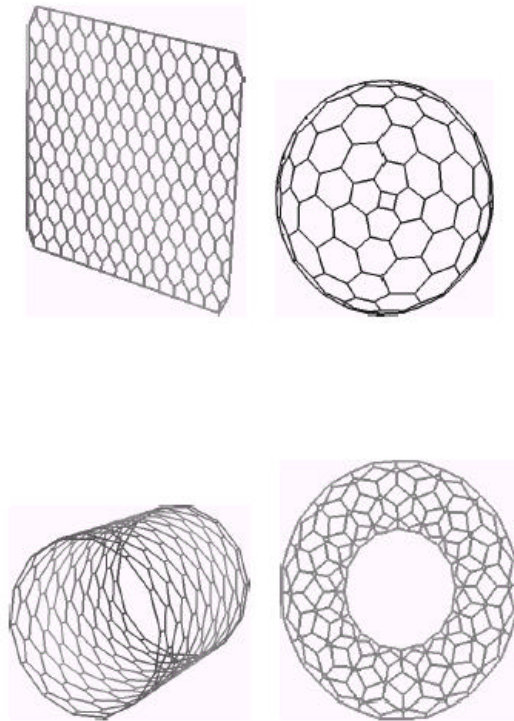
1. Cada vértice perteneciente a  $C$  pertenece a ' $p$ ' distintas  $(p-1)$ -células.
2. La intersección de dos  $(p-1)$ -células es vacío o es una  $(p-2)$ -células.

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  $\mathbf{R}^d$ . Ejemplos de  $p$ -células se muestran en la Figura 3-28. 0-células se llaman vértices, 1-células segmentos y 2-células caras.

Una malla simplex está definida simplemente como:

Definición 2.- Una malla  $k$ -simplex  $M$  de  $\mathbf{R}^d$  es una  $(k+1)$ -célula de  $\mathbf{R}^d$ .

Una malla  $k$ -simplex es por lo tanto una **unión de**  $k$ -células que siguen las propiedades de la definición 1. Ejemplos de mallas 2-simplex se muestran en la Figura 3-29.



**Figura 3-29** Cuatro mallas 2-simplex genéricas

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

La conectividad constantes entre vértices implica una relación simplex entre el número de vértices y el número de segmento. 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.

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

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

Escribimos el conjunto de  $n$  vértices de  $M$  como  $V(M)$  y su función de conectividad como  $N(M)$ . Si  $R$  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.

### Dualidad con las triangulaciones

Es importante el mencionar la naturaleza dual entre las mallas  $k$ -simplex y las  $k$ -triangulaciones. Las  $k$ -triangulaciones son conjuntos de  $p$ -simplicantes ( $0 < p \leq k$ ) que siguen reglas topológicas estrictas tales como la de la relación de Euler-Poincaré. De hecho, las  $k$ -triangulaciones son subconjuntos de conjuntos más generales de  $p$ -simplicantes, llamados  $k$ -simplicantes complejos.

Una  $k$ -triangulación está compuesta por  $p$ -simplicantes ( $0 \leq p \leq k$ ) que son  $p$ -caras de la triangulación. 0-caras son vértices, 1-caras los segmentos y 2-caras los triángulos.

Podemos definir una transformación topológica que asocia una malla  $k$ -simplex a una  $k$ -triangulación. Esta transformación es mostrada en la Figura 3-30 y considera de forma diferente los vértices y los segmentos localizados en el borde de la triangulación 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.

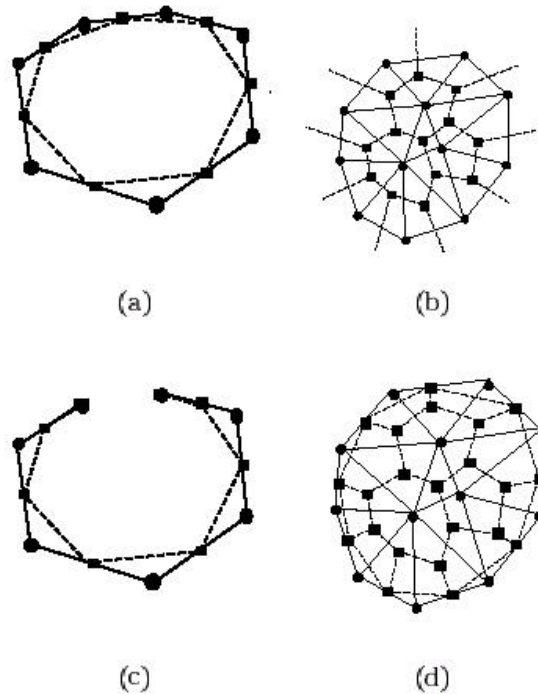


Figura 3-30 Dualidad entre  $k$ -triangulaciones ( $k=1,2$ ) dibujadas con líneas continuas y círculos sólidos, y mallas  $k$ -simplex dibujadas con líneas intermitentes y cuadrados como vértices. Dos primeras son triangulaciones sin fronteras y las otras dos tienen fronteras

La tabla 3-2 resume la transformación entre una  $p$ -cara de una  $k$ -triangulación y una  $(k-p)$ -célula de una malla  $k$ -simplex. Para células y caras pertenecientes a un borde de una triangulación o de una malla simplex, la transformación dual se aplica distinto. Vértices, segmentos y triángulos pertenecientes a una frontera de una  $k$ -triangulación son asociadas con dos células de una malla  $k$ -simplex: una  $(k-p)$ -célula y una  $(k-p-1)$ -célula ( $0 \leq p < k$ ) (ver tabla 3-3)

Tabla 3-2 Dualidad entre una  $k$ -triangulación y una malla  $k$ -simplex para caras internas

	1-Tr $\Leftrightarrow$ 1-MS	2-Tr $\Leftrightarrow$ MS
P=0	Vértice $\Leftrightarrow$ Segmento	Vértice $\Leftrightarrow$ Cara
P=1	Segmento $\Leftrightarrow$ Vértice	Segmento $\Leftrightarrow$ Segmento
P=2		Triángulo $\Leftrightarrow$ Vértice

Tabla 3-3 Dualidad entre una  $k$ -triangulación y una malla  $k$ -simplex para caras en la frontera

	1-Tr $\Rightarrow$ 1-MS	2-Tr $\Rightarrow$ 2-MS	1-MS $\Rightarrow$ 1-Tr	2-MS $\Rightarrow$ 2-Tr
P=0	Vértice $\Rightarrow$ Segmento	Vértice $\Rightarrow$ Cara	Vértice $\Rightarrow$ (nil)	Vértice $\Rightarrow$ (nil)
P=1	Vértice $\Rightarrow$ Segmento	Vértice $\Rightarrow$ Segmento		Segmento $\Rightarrow$ (nil)
		Segmento $\Rightarrow$ Segmento		
		Segmento $\Rightarrow$ Vértice		

En una malla compuesta por triángulos, es decir una triangulación, existe una noción real de frontera del modelo, mientras que un triángulo no esté rodeado por tres triángulos. Pero en una malla simplex, la noción de una frontera, de un hoyo es simplemente una célula "vacía", ya que cada vértice está rodeado por  $(k+1)$   $k$ -células.

Existen otras transformaciones duales que se han definido en las  $k$ -triangulaciones. Las más comúnmente estudiadas han sido las dualidades entre triangulaciones y complejos celulares a través de la dualidad de las triangulaciones de Delaunay y los diagramas de Voronoi. Los diagramas de Voronoi son complejos celulares y la relación de dualidad con la triangulación de Delaunay es geométrica ya que depende de la posición de sus vértices. Por el contrario, la dualidad entre las triangulaciones y las mallas simplex es puramente topológica ya que no hay ninguna biyección geométrica entre las mallas simplex y las triangulaciones.

La inexistencia de dualidad geométrica puede ser probada al considerar el número relativo de grados de libertad de las mallas simplex y las triangulaciones. La geometría de una malla  $k$ -simplex no degenerada o de una  $k$ -triangulación no degenerada es determinada por el conjunto de coordenadas de sus vértices. Como sea, para  $k > 1$  el número de vértices  $V_{sm}$  de una malla  $k$ -simplex es diferente del número de vértices  $V_{tr}$  de una  $k$ -triangulación. Para  $k=2$  por ejemplo, para una triangulación sin hoyos teniendo un orden  $g$ , la relación de Euler da:

$$V_{tr} - \frac{V_{sm}}{2} = 2(1 - g)$$

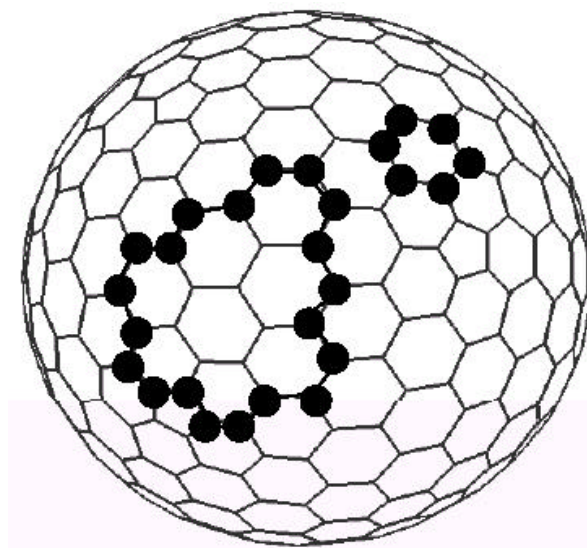
Por lo tanto, no podemos construir un homomorfismo geométrico entre las triangulaciones y las mallas simplex ya que el espacio vectorial representante de sus espacios de posibles configuraciones son de diferente dimensión. Sólo para mallas 1-simplex, es posible el construir una 1-triangulación que es su dual geométrico ya que tienen el mismo número de vértices. La equivalencia geométrica con las triangulaciones sólo puede existir si consideramos mallas  $k$ -simplex degeneradas, por ejemplo al restringir los politopos convexos (mallas simplex convexas con caras planares).

La inexistencia de una transformación geométrica entre las mallas simplex y las triangulaciones implica que la deformación geométrica de una malla simplex no es equivalente a la deformación geométrica de una

triangulación. Este es la razón por la cual las mallas simplex son una representación de superficies distinta a la de las triangulaciones.

### Contornos

Los contornos definidos en una malla 2-simplex son mallas 1-simplex, i.e. curvas poligonales cerradas. Son definidos como un conjunto de vértices vecinos tal que un vértice del contorno tiene dos y solamente dos vecinos que pertenecen al contorno (ver Figura 3-31). Los contornos pueden ser definidos alrededor de cualquier cara de la malla simplex, especialmente caras correspondientes a un hoyo.



**Figura 3-31** Dos contornos definidos en una malla 2-simplex. El de más a la derecha delimita una cara de la malla.

Los contornos son considerados como modelos deformables móviles independientemente de la malla. La superficie de la malla está por lo tanto vinculada a vértices de un contorno que establecen las condiciones de frontera para la deformación de la malla. La definición de los contornos permite un gran control sobre la forma de la malla simplex.

### Transformación de la malla

Las mallas simplex, al igual que las triangulaciones son malla sin estructura por lo que pueden ser refinadas ó diseminadas localmente. Adicionalmente, las mallas simplex pueden ser cortadas a lo largo de contornos y crear manejadores de superficies.

Se pueden definir cuatro operadores topológicos básicos en una malla simplex,  $T_1^2, T_2^2, T_3^2, T_4^2$ , descritos en la Figura 3-32. Los primeros dos operadores, son Eulerianos ya que no modifican el orden de la malla. Por otro lado,  $T_3^2$  y  $T_4^2$  son meta-operadores ya que pueden romper la malla en dos piezas, o cambiar su orden (el número de manejadores de superficies). Todas las transformaciones topológicas pueden ser descompuestas en un conjunto de estos 4 operadores.

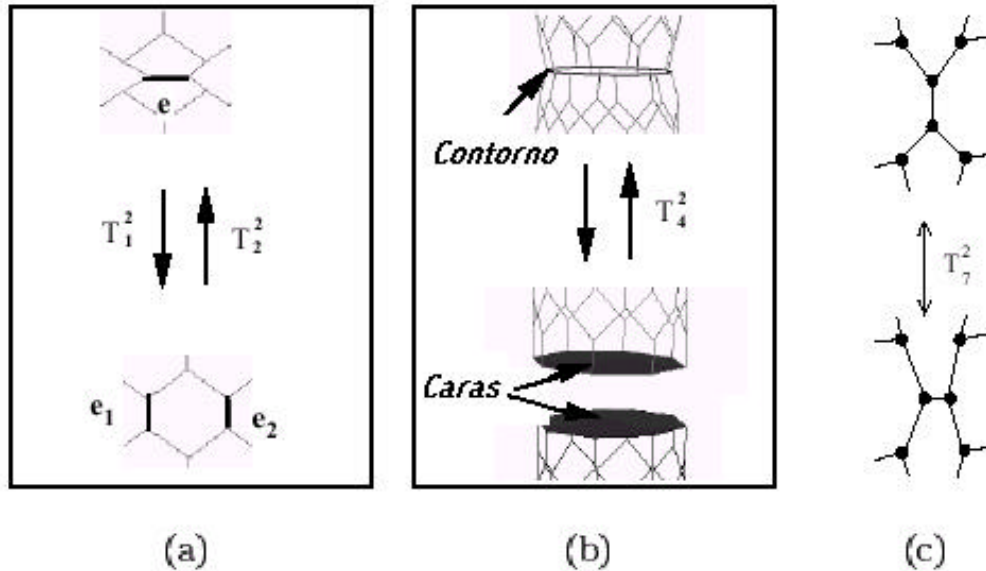


Figura 3-32 (a) los dos operadores Euleriano  $T_1^2, T_2^2$  definidos en mallas 2-simplex; (b) Los dos meta-operadores  $T_3^2$  y  $T_4^2$ ; (c) El operador de conmutación de segmento  $T_7^2$ .

### Geometría de las mallas simplex

En esta sección se presenta las principales relaciones geométricas que existen en una malla 2-simplex de  $\mathbf{R}^3$ . Existen resultados similares para mallas 1-simplex de  $\mathbf{R}^3$  (i.e. 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  $M \in \mathbf{R}^3$  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:

$$n_i = \frac{P_{N1(i)} \wedge P_{N2(i)} + P_{N2(i)} \wedge P_{N3(i)} + P_{N3(i)} \wedge P_{N1(i)}}{\|P_{N1(i)} \wedge P_{N2(i)} + P_{N2(i)} \wedge P_{N3(i)} + P_{N3(i)} \wedge P_{N1(i)}\|}$$

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  $(P_i, P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)})$ . El ángulo simplex  $\mathbf{a} = \angle(P_i, P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)})$  (un tipo de "ángulo promediado") en  $P_i$  está definido por dos ecuaciones:

$$\mathbf{a}_i \in [-\Pi, \Pi]:$$

$$\text{seno}(\mathbf{a}_i) = \frac{r_i}{R_i} \text{sign}((P_{N1(i)} - P_i) \cdot \mathbf{n}_i), \text{ sign es la función "signo"}$$

$$\text{coseno}(\mathbf{a}_i) = \frac{|C_i - O_i|}{R_i} \text{sign}((C_i - O_i) \cdot \mathbf{n}_i)$$

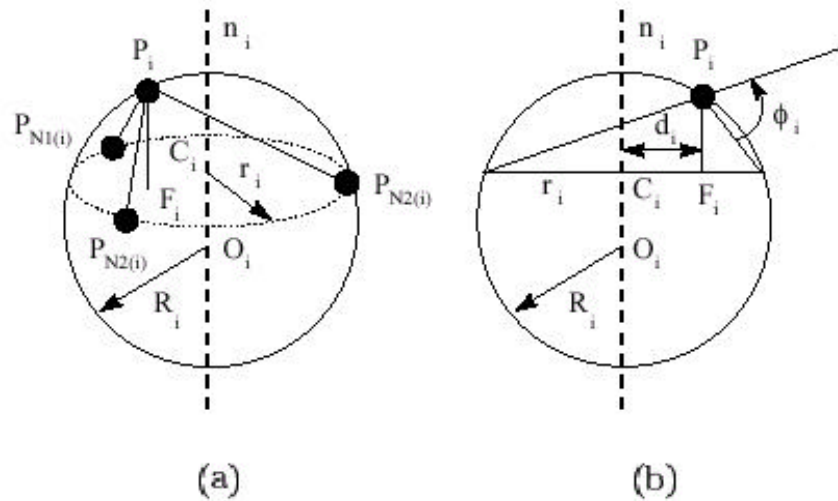


Figura 3-33 (a) La esfera circunscrita  $S_2$  de radio  $R_i$  y el círculo circunscrito  $S_1$  de radio  $R_i$ . b) Proyección de (a) en el plano  $(O_i, C_i, P_i)$ . El ángulo simplex puede ser interpretado como un ángulo de geometría planar.

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

$$H_i = \frac{\text{seno}(\mathbf{a}_i)}{r_i}$$



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  $(P_{N1(i)}, P_{N2(i)}, P_{N3(i)})$ :

$$F_i = \mathbf{e}_{1i} P_{N1(i)} + \mathbf{e}_{2i} P_{N2(i)} + \mathbf{e}_{3i} P_{N3(i)}$$

$$\mathbf{e}_{1i} + \mathbf{e}_{2i} + \mathbf{e}_{3i} = 1$$

El ángulo simplex con dos parámetros métricos  $\mathbf{e}$  (que se definen más adelante) representan la posición de  $P_i$  con respecto a sus tres vecinos:

$$P_i = \mathbf{e}_{1i} P_{N1(i)} + \mathbf{e}_{2i} P_{N2(i)} + \mathbf{e}_{3i} P_{N3(i)} + L(r_i, d_i, \mathbf{a}_i) \mathbf{n}_i$$

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  $F_i$  y el centro  $C_i$  del círculo circunscrito
- $L(r_i, d_i, \mathbf{a}_i)$  está definido como:

$$L(r_i, d_i, \mathbf{a}_i) = \frac{(r_i^2 - d_i^2) \tan(\mathbf{a}_i)}{\mathbf{e} \sqrt{r_i^2 + (r_i^2 - d_i^2) \tan^2(\mathbf{a}_i)} + r_i}$$

con:

$$\mathbf{e} = 1 \quad \text{si} \quad |\mathbf{a}_i| < \frac{\Pi}{2}$$

$$\mathbf{e} = -1 \quad \text{si} \quad |\mathbf{a}_i| > \frac{\Pi}{2}$$

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.

Más información y fundamento teórico sobre las mallas simplex, lo encontramos en [1].

### 3.4.2 Algoritmo de Reconstrucción 3D

Ahora que finalmente se tienen los vértices que describen el volumen del fenómeno, se tienen que definir sus interconexiones (aristas), para definir completamente el volumen del prisma que representa al fenómeno [21], [22], [23].

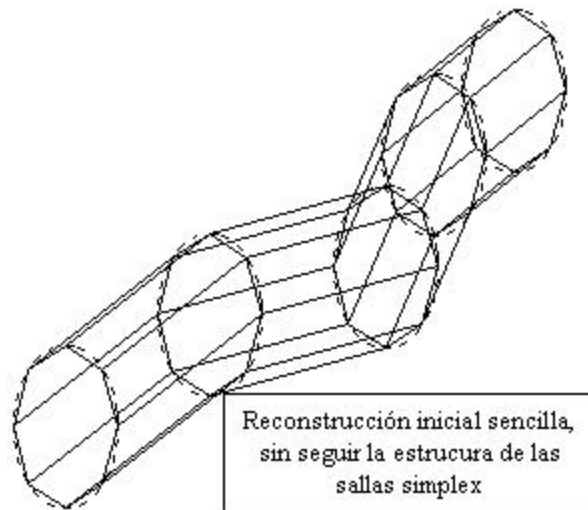


Figura 3-34 Prisma NO basado en mallas simplex

Una primera idea para generar este prisma es el de crear aristas que unan directamente los vértices de un "nivel", con los del siguiente, para definir una aproximación de las secciones elipsoidales (ver sección 2.2.3 – Algoritmo de realce). Como se muestra en la Figura de la izquierda.

Sin embargo, cabe mencionar que este tipo de reconstrucción terminaría siendo equivalente a una reconstrucción por triangulación, la cual, como se planteó en el capítulo uno, provee de menor información que una reconstrucción siguiendo el esquema de las mallas simplex.

En particular, el tipo de malla simplex que se ha decidido implementar es la malla 2-simplex, compuesta por 3-células, por ser la primer tipo de malla simplex que provee más información que una triangulación y que por lo tanto no es equivalente a alguna de estas.

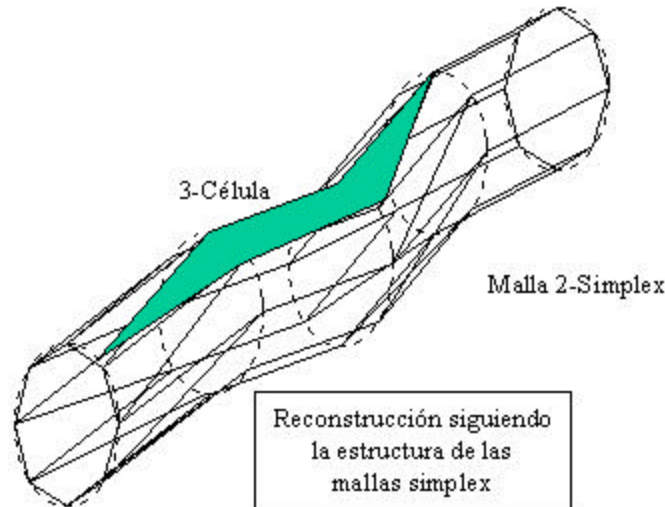


Figura 3-35 Prisma en base a mallas simplex.

Habiendo destacado este punto, a continuación se presenta el algoritmo para la reconstrucción 3D, y recordemos solamente que tras la etapa de realce se obtuvo un conjunto de vértices que definen el volumen de ocurrencia del fenómeno.

### Algoritmo de reconstrucción

Retomemos  $V_{si}$ , el conjunto de vértices obtenido de la etapa de realce, con la aproximación a prisma elíptico ya hecha. También retomemos los subconjuntos de vértices  $V_{si} = \{v \in V_r \mid Z(v)=i\}$ ,  $i=[1 \dots \text{largo de la imagen frontal}]$ , esto es válido ya que se definió un subconjunto por columna de las imágenes.

Crearemos aristas bajo las siguientes restricciones:

- De cada vértice  $v \in V_{sj}$ , se crea una arista al vértice  $w \in V_{sj+1}$ , tal que la distancia euclidiana de  $v$  a  $w$  es la mínima posible.  $J=[1,2,3 \dots \text{largo de las imágenes}]$ .
- De cada vértice  $x \in V_{sk}$ ,  $k$  es impar, se crea una arista al vértice  $y \in V_{sk+1}$  tal que la distancia euclidiana de  $x$  a  $y$  es la menor y que cumple que el vértice  $y$  no es extremo de más de dos aristas, si y solo si  $V_{sk+1}$  existe.

Con las condiciones anteriores garantizamos que se crea una red de aristas que van construyendo 3-células sobre los vértices, obteniendo al final una malla 2-simplex.

### Tratamiento de bordes

Adicional a la generación de la mallas 2-simplex, se ha decidido definir un tratamiento de bordes que permiten cerrar de mejor manera el prisma, lo cual permitirá hacer su caracterización de manera más sencilla en trabajo futuros.

En este caso, el tratamiento de bordes se realiza al seguir la creación de aristas bajo las siguientes restricciones:

- Para cada vértice  $v \in V_{s1}$ , se crean las aristas a  $v', v'' \in V_{s1}$ , tal que la distancias Euclidianas de  $v$  a  $v'$  y de  $v$  a  $v''$  sean las menores.
- Para cada vértice  $w \in V_{sk}$ ,  $k = \max(Z(x))$   $x \in V_{ri}$ , se crean las aristas a  $w', w'' \in V_{sk}$ , tal que la distancias Euclidianas de  $w$  a  $w'$  y de  $w$  a  $w''$  sean las menores.

Creadas estas aristas, junto con el conjunto de vértices, tenemos finalmente el prisma que reconstruye el fenómeno.

Como se mencionó al principio de este capítulo, al final hemos adquirido un par de conjuntos que definen un grafo, cuyos vértices tienen un mapeo al espacio  $\mathfrak{R}^3$ .

Otros ejemplos prácticos de la reconstrucción tomográfica los encontramos en [1], [7], [10], [14], [15] y [18].

Otros ejemplos prácticos del **uso de mallas en general, NO de las mallas simplex** para representar objetos de la vida real y su manejo, los encontramos en [5], [6], [7], [8], [9] y [11].

## 4. IMPLEMENTACIÓN

### 4.1 Introducción

En este capítulo se describe la implementación de los algoritmos vistos en el capítulo 3. El resultado de esta implementación ha sido la herramienta Retodeel..

En la Figura 4-1 se aprecia el diagrama general de la herramienta, de la que se aprecia que como un producto de software debe de proveer la facilidad de abrir las imágenes a partir de archivos en formatos gráficos (en particular, BMP's), presentar una funcionalidad para la proyección de información bidimensional (las imágenes por separado) y tridimensional para el modelo reconstruido.

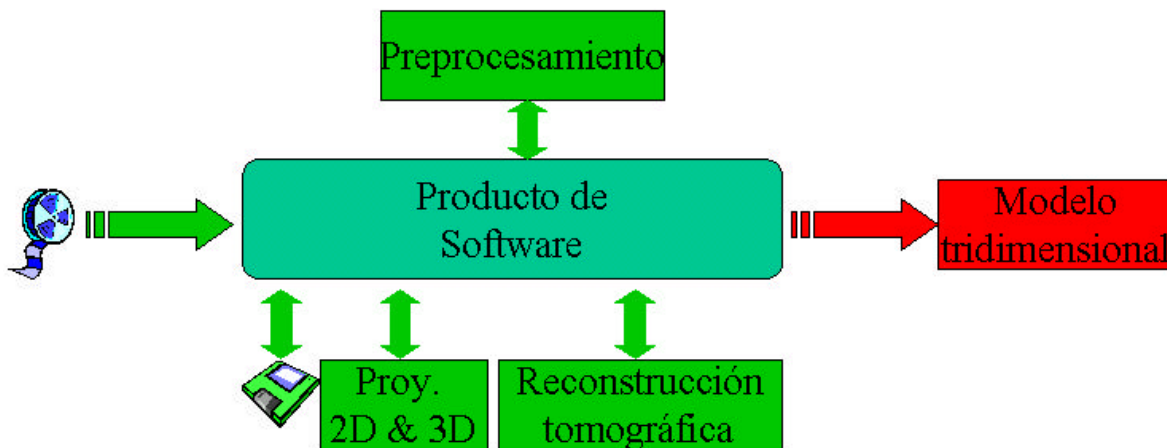


Figura 4-1 Diagrama a bloques de la herramienta Retodeel

Cabe mencionar que la herramienta Retodeel es el reflejo pragmático y comprobación de los algoritmos planteados para realizar la reconstrucción tomográfica de las descargas eléctricas, ha sido desarrollada a través de la herramienta Visual C++ 6.0 para la implementación de los algoritmos y el armazón principal. Para la visualización tridimensional, se creó un control ActiveX (ver apéndice B y C) con código en C++ y manejo de archivos programado en Visual Basic 6.0.

## Adquisición de imágenes

Las características técnicas de los componentes usados en las pruebas son:

### Computadora personal:

PC Pentium III 933 MHz  
128 MB RAM  
40 GB HDD  
Tarjeta de video Sis 300 AGP con 16 MB RAM

### Tarjeta de adquisición de imágenes:

Studio DC10 Plus, Motion JPEG Capture/CODEC Board

\* Se usa cable de video compuesto: "composite"

### Software de adquisición de imágenes:

Studio DC10 Plus V. 1.06.4

### Cámara de video 1:

SONY HandyCam Vision 220X  
CCD-TRV95 NTSC  
Hi-Fi Stereo  
Video Hi8 XR

### Cámara de video 2:

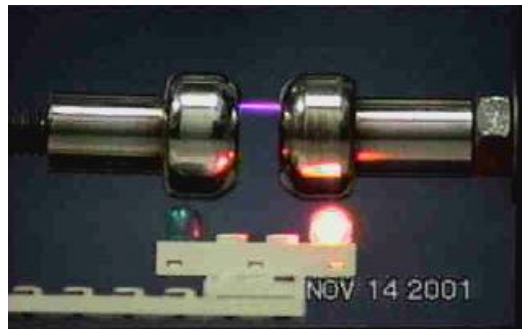
SONY HandyCam Vision 360X  
CCD-TRV87 NTSC  
Hi-Fi Stereo  
Video Hi8 XR

\* Tanto para la cámara de video 1 como la 2, se grabó las secuencias en modo SP (evitando la pérdida de información por compresión de video).

\* En el apéndice A, se encuentra los detalles y características técnicas del montaje eléctrico usado, no es explicado en esta sección ya que es un trabajo desarrollado previamente.

## Toma de videos y extracción de imágenes

Esta actividad se llevó a cabo sin problema alguno, tomando los videos necesarios, para posteriormente realizar la extracción de las imágenes; ejemplos de estas imágenes se muestran en la [Figura 4-2](#) y la [Figura 4-3](#).



**Figura 4-2** Ejemplo de imagen obtenida; Vista superior



**Figura 4-3** Ejemplo de imagen obtenida; Vista frontal.

El formato gráfico de los archivos de las imágenes es el de: BMP's, con 24 bits para la representación de color, en una resolución de 1500 x 1100 píxeles.

## 4.2 Manual del programador

En esta sección, se refleja los principales características de la implementación de los algoritmos en la herramienta Retodeel, empezando primero por el diagrama general de estados que se muestra en la Figura 4-4.

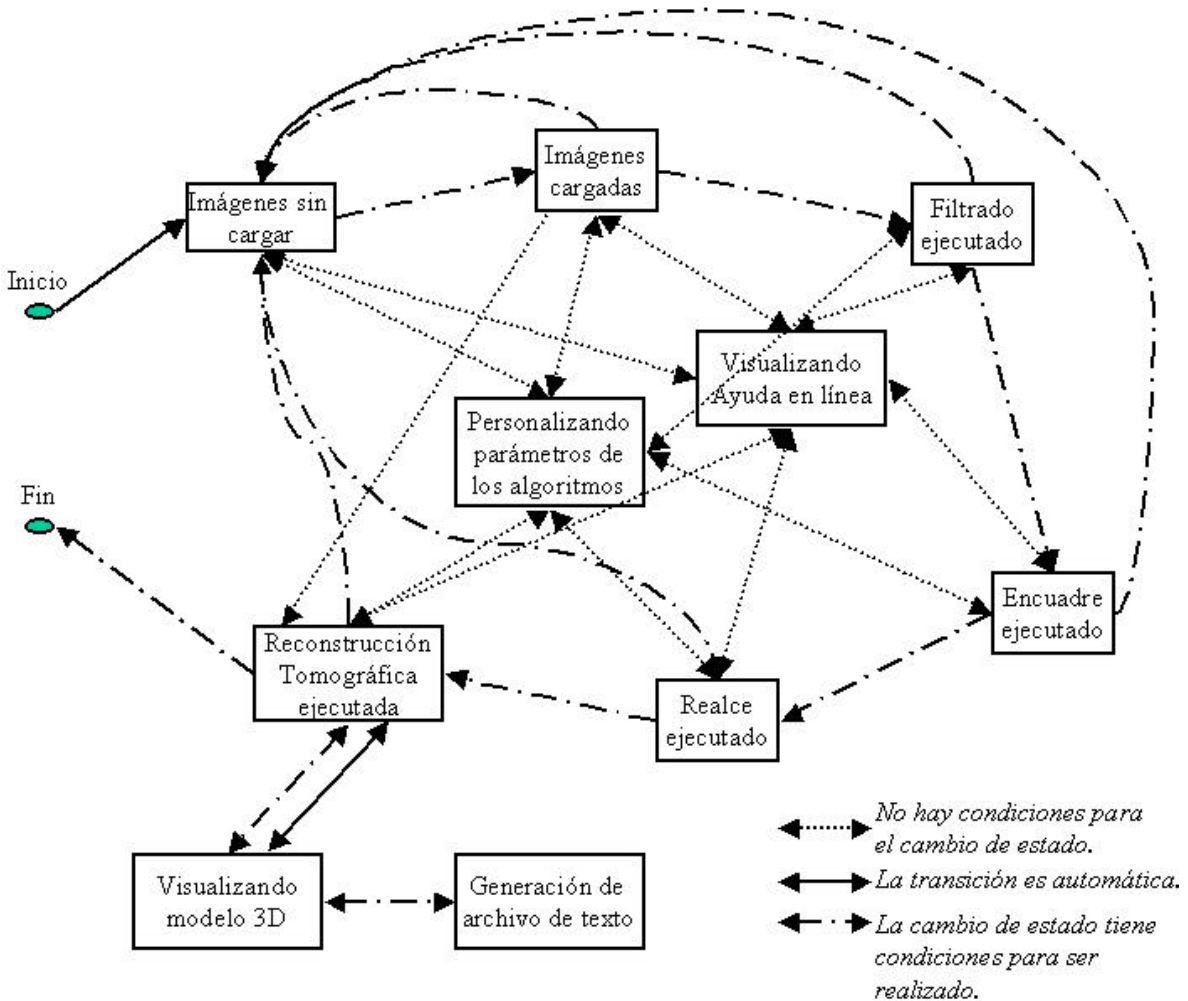


Figura 4-4 Diagrama de estados de la herramienta Retodeel

Donde las condiciones para el cambio de los estados, se presentan en la Figura 4-5.



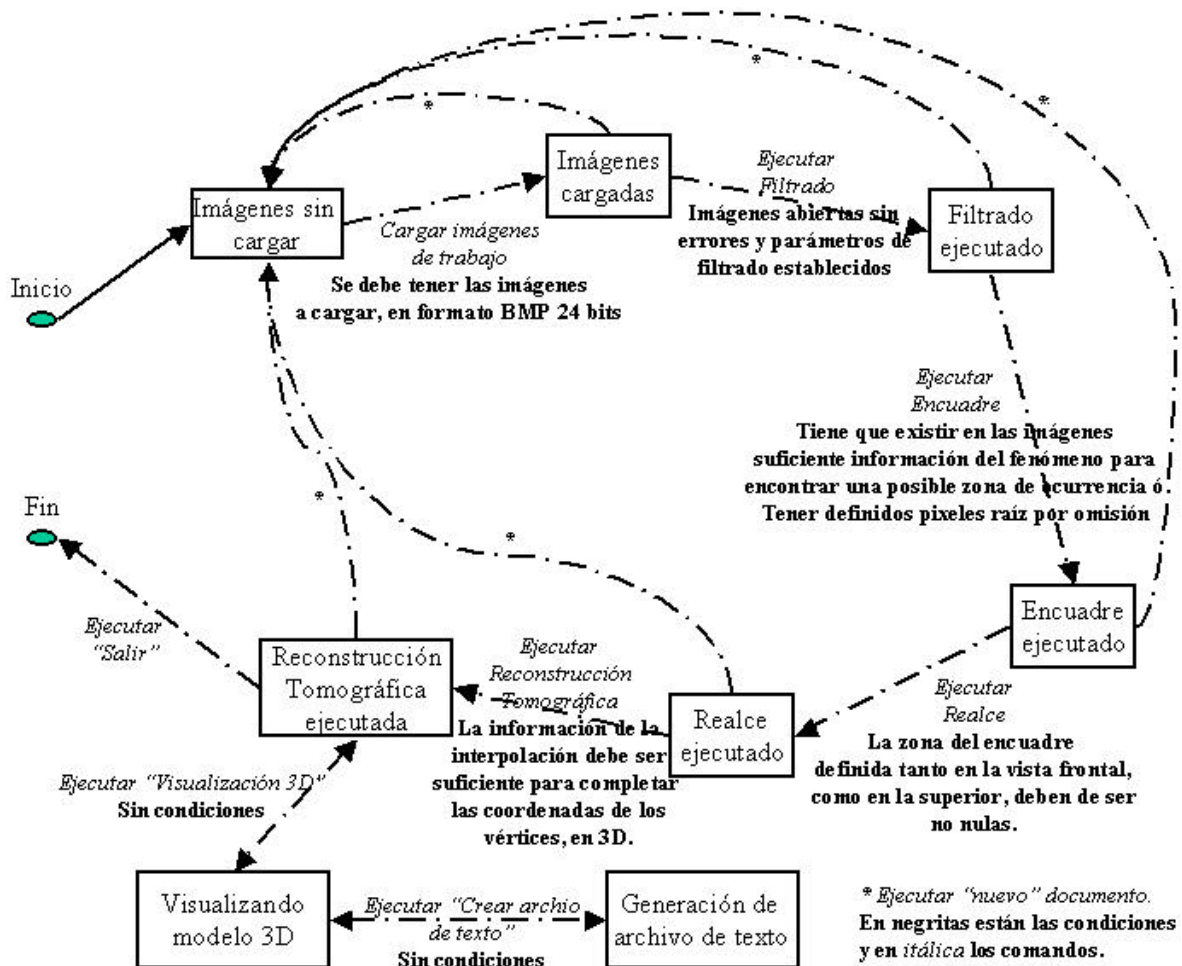


Figura 4-5 Diagrama de estados mostrando las condiciones de transición.

El comportamiento general de la aplicación, como se deduce del diagrama de estados, es muy sencillo, simplemente refleja los procesos y sus requerimientos por etapas (ver Figura 4-5) para poder procesar la información y realizar la reconstrucción tomográfica de las descargas eléctricas, adicionalmente la herramienta se implementó para que pudiera realizarse ejecutándose etapa por etapa ó de manera automática, adicionalmente el usuario puede establecer los parámetros de los algoritmos de filtrado y encuadre (ver sección 3.1 Manual del usuario).

La arquitectura que se siguió para esta herramienta es la conocida como "Documento-Vista", muy vinculada con el desarrollo de aplicaciones basadas en las Clases Fundamentales de Microsoft (MFC por sus siglas en inglés) generadas por la herramienta Visual C++. En sí misma, independientemente de las clases y objetos adicionales para el soporte de la herramienta, los procesos vinculados a los algoritmos necesarios para la reconstrucción tomográfica se implementaron en una sola clase

(recordemos que se está trabajando con C++ - orientado a objetos), a saber:

```
class CRRKRetodeel
{
public:
    bool EjecutaReconstruccionT(CDC * pDC);
    bool EjecutaInterpolacion(CDC * pDC);
    bool EjecutaFiltrado(CDC * pDC);
    bool EjecutaEncuadre(CDC * pDC);
    ESTADO_RECONSTRUCCION m_EdoReconstruccion;
    CFiltro m_filtro;
    CPoint m_raiz_propuesta_1;
    CPoint m_raiz_propuesta_2;
    BOOL m_bRaizManual;
    void AjustaZonasGraficas();
    bool CargalmagenTrabajo(CString ruta, CDC* pDC,long cual);
    void Reinicializa();
    CRRKRetodeel();
    virtual ~CRRKRetodeel();
    void Dibuja(CDC* pDC);
    CRRKSeccionGrafica * m_SeccionInicial;
    CRRKSeccionGrafica * m_SeccionEncuadre;
    CRRKSeccionGrafica * m_SeccionFiltrado;
    CRRKSeccionGrafica * m_SeccionRealce;
};
```

Las demás clases, las que soportan la arquitectura documento-vista, no son explicadas en este reporte ya que se enfocarían más a detalles técnicos del desarrollo de aplicaciones, que a los procesos de investigación/desarrollo que se siguieron para el buen término de este proyecto. Sin embargo, para el lector interesado en estos temas, se le invita a que realice un análisis del código de la aplicación, el cual se ha tratado de enriquecer con comentarios descriptivos de su funcionamiento.

Adicionalmente, para quien esté interesado en familiarizarse con la arquitectura documento-vista, se le invita a que revise la bibliografía de: "Programación Avanzada con Visual C++ 6.0" de Kruglinski, Shepherd y Wingo.

## La clase CRRKRetodeel

Como se aprecia en los diagramas de estado, la serie de procesos para llevar a cabo la reconstrucción tomográfica es lineal y sólo pueden avanzar a la siguiente etapa cuando la anterior se ha completado con éxito, es por esto que todos estos procesos se han implementado, para facilitar su manejo, en una sola clase: CRRKRetodeel.

Dentro de CRRKRetodeel apreciamos cuatro métodos miembros de la clase que en sí reflejan las cuatro etapas para llevar a cabo la reconstrucción tomográfica:

```
bool EjecutaReconstruccionT(CDC * pDC);  
bool EjecutaInterpolacion(CDC * pDC);  
bool EjecutaFiltrado(CDC * pDC);  
bool EjecutaEncuadre(CDC * pDC);
```

Pero antes de analizar cada uno de estos, se hace mención que comentarios respecto a la implementación de los mismos, se encuentran en el apéndice A – Detalles de la implementación. Estos comentarios sirven para introducir al lector que desee adentrarse en el código fuente de Retodeel.

Se procede a continuación a describir la implementación de los algoritmos de:

1. Filtrado
2. Encuadre
3. Interpolación
4. Reconstrucción Tomográfica

Le recordamos al lector de la presente que en esta sección se explica la forma de implementar los algoritmos, pero su justificación la encuentra en el capítulo 2- Desarrollo de la tesis.

## Implementación del Filtrado

El algoritmo de filtrado sigue los procesos descritos en la Figura 4-6.

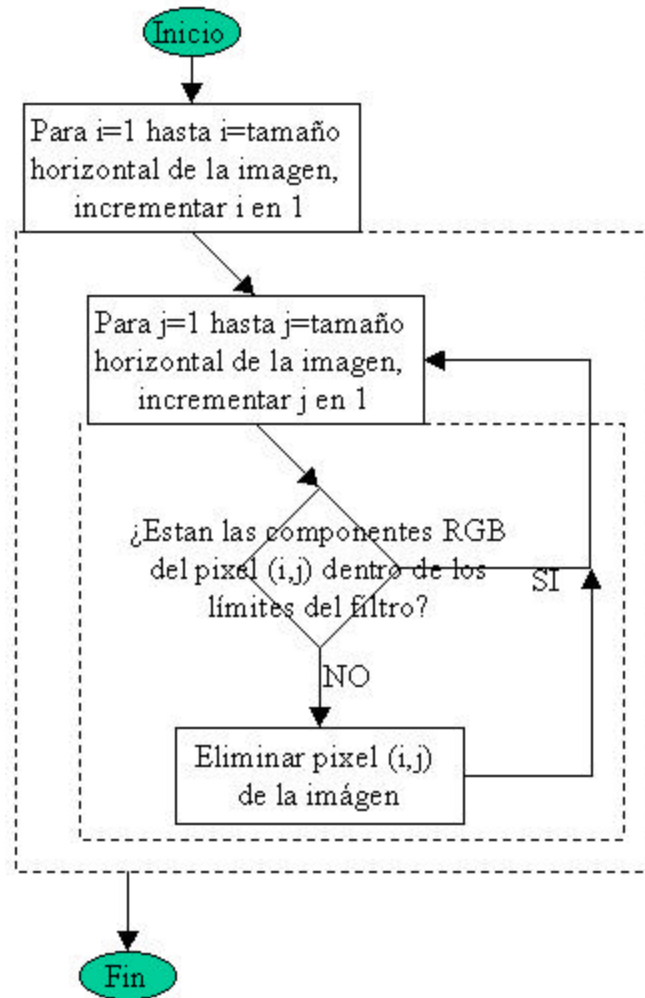


Figura 4-6 Diagrama de flujo del filtrado.

Este algoritmo es sumamente sencillo como se puede apreciar, simplemente elimina de las imágenes de trabajo, todos los píxeles que no estén definidos dentro de los rangos especificados para el filtro, ya sean los valores por omisión ó los valores personalizados por el usuario en tiempo de ejecución.

## Implementación del encuadre

El algoritmo de encuadre sigue los procesos descritos en la Figura 4-7.

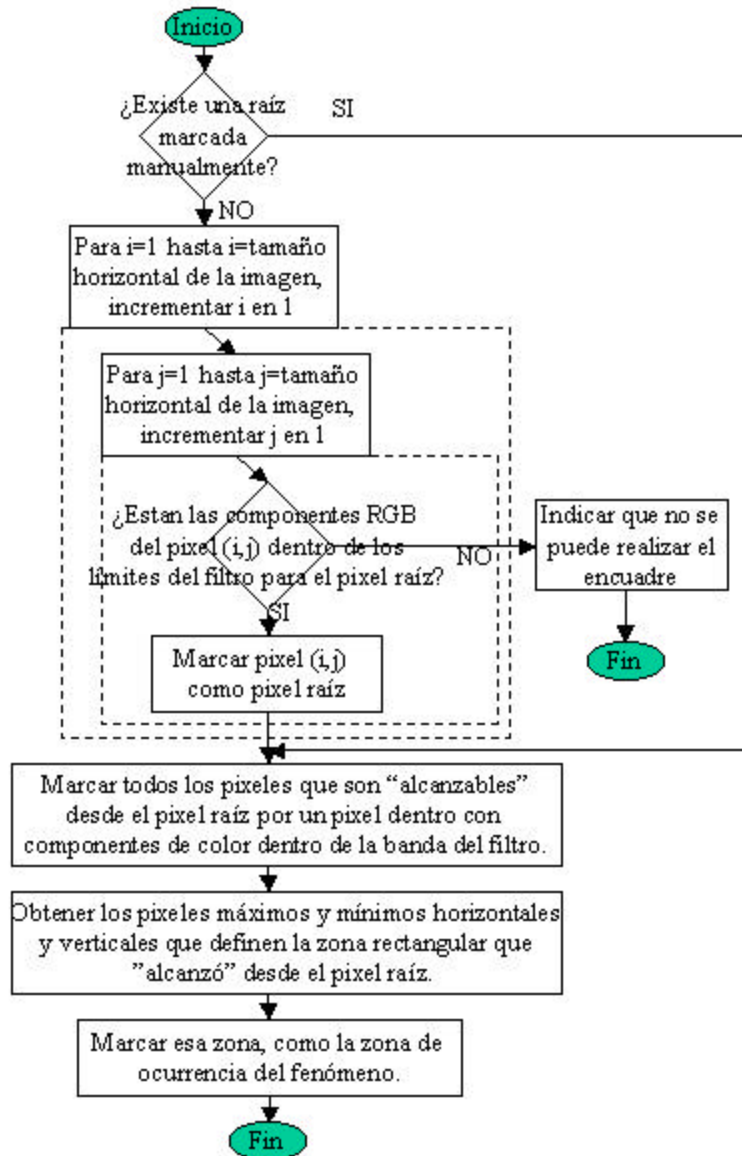


Figura 4-7 Diagrama de flujo del encuadre

Se ha evitado ampliar los últimos tres bloques en su definición explícita de los ciclos que los componen, esto se ha decidido así ya que de no hacerlo, el diagrama sería muy grande y difícil de seguir. En todo caso, se invita al lector interesado, en realizar una revisión del código de la herramienta para verificar todos los ciclos que componen a este algoritmo.

## Implementación del realce

El algoritmo de realce sigue los procesos descritos en la Figura 4-8.

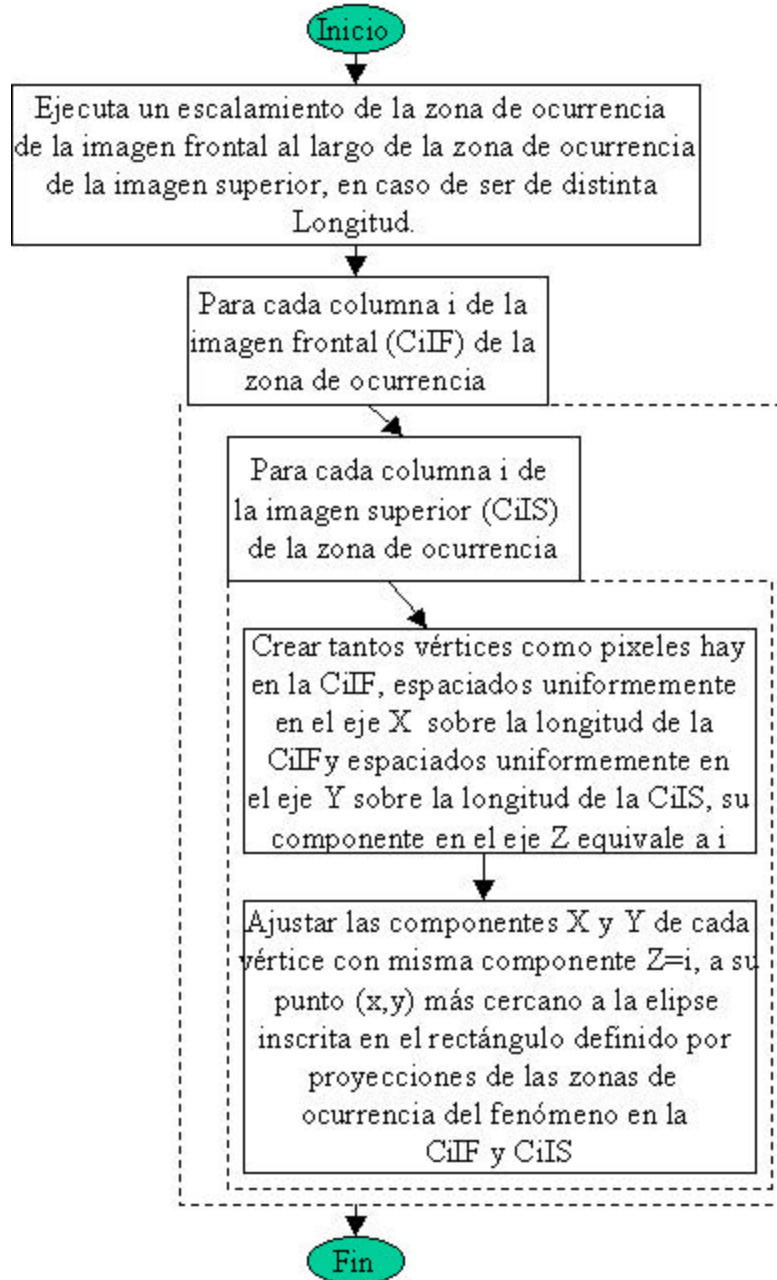


Figura 4-8 Diagrama de flujo del realce

Se aprecian los principales procesos que componen a la implementación del algoritmo de realce.

A grosso modo se puede ver como la generación de los vértices que describen el volumen de las proyecciones de las zonas de ocurrencia de las imágenes frontal y superior (ver sección 2.2.3 – Algoritmo de Realce) sobre los que se ensamblará la malla simplex, para definir el prisma en su totalidad.

También destaca el último bloque que representa la implementación de la mejora de la calidad del prisma reconstruido al ajustarlo a un “tubo” cilíndrico y no cuadrangular.

## Implementación de la reconstrucción tomográfica

El algoritmo de reconstrucción tomográfica sigue los procesos descritos en la Figura 4-9.

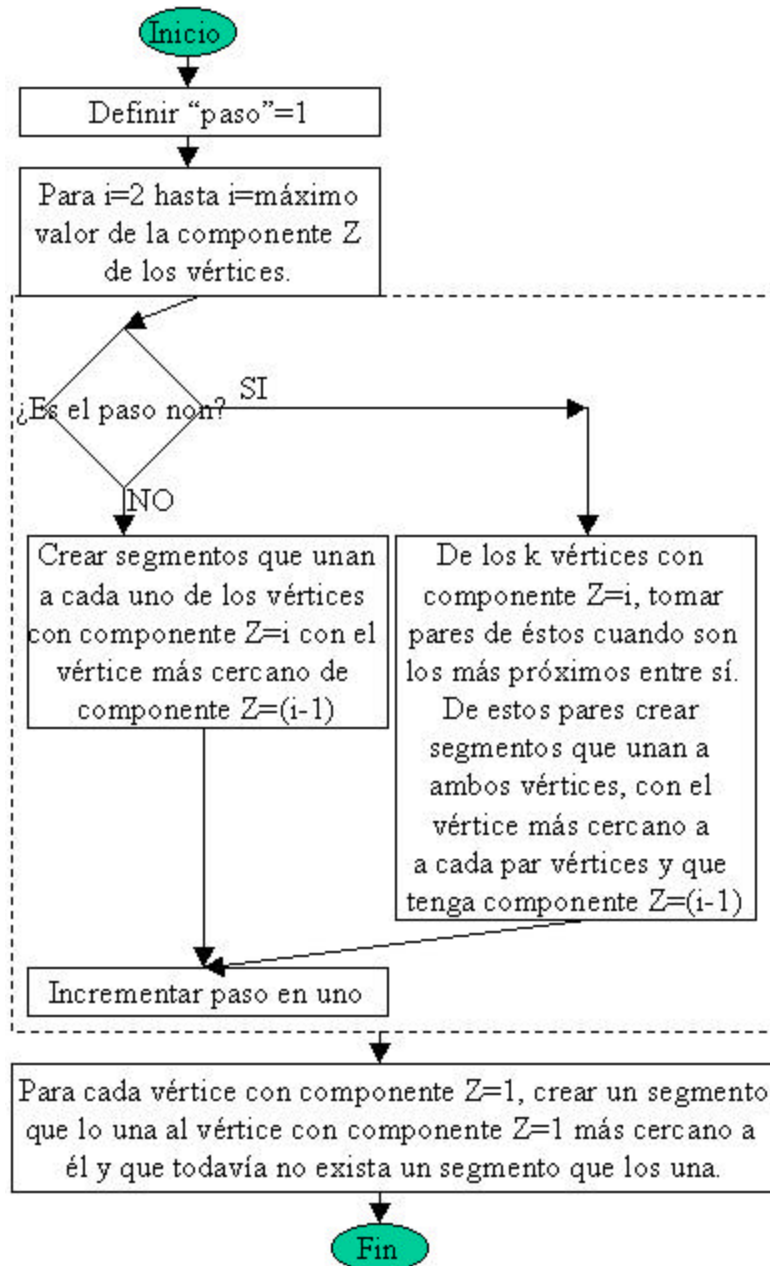


Figura 4-9 Diagrama de flujo de la reconstrucción tomográfica

Antes de discutir el diagrama de bloques de la Figura de la izquierda, cabe mencionar que en este punto, tras haber ejecutado el realce, ya se cuenta con un conjunto de vértices sobre los que se ensambla la malla simplex.



Otro punto relevante a mencionar es que cuando se habla del vértice más cercano a otro, se hace referencia a aquél que tenga la distancia Euclidiana menor.

La primera parte del diagrama a bloques (el ciclo), permite generar la malla Simplex que define el contorno del modelo reconstruido, sin embargo, no realiza un tratamiento de bordes, que como se vio en la sección 1.4.1 - Método de las mallas Simplex.

Resulta ser también de importancia, para la definición correcta del volumen del objeto que representa el modelo reconstruido.

En la Figura anterior, se aprecia que para llevar a cabo la generación de la malla simplex, a partir de los vértices creados en la etapa anterior, se sigue una regla sencilla, sin embargo, esta regla se puede ver sencilla, coloquialmente hablando (y leyéndola), pero su implementación, requiere más allá de unas cuantas líneas de texto, por lo que nuevamente invitamos al lector interesado en ello, haga referencia al código de la herramienta, para ahondar más en su implementación.

Nótese en particular la gran similitud (por su estructura) que tienen las reglas para la construcción de la malla simplex, con las reglas con que se definen las gráficas, en términos de nodos y arcos. Siendo precisamente por esto, que se ha preferido definir los algoritmos, en términos de conjuntos, ver capítulo 3 – Fundamentos Teóricos y Desarrollo.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Manual del usuario

En la Figura 5.1 se aprecia la vista principal de la herramienta Retodeel, es en esta vista donde se sitúa el usuario a la hora de iniciar la ejecución del programa.

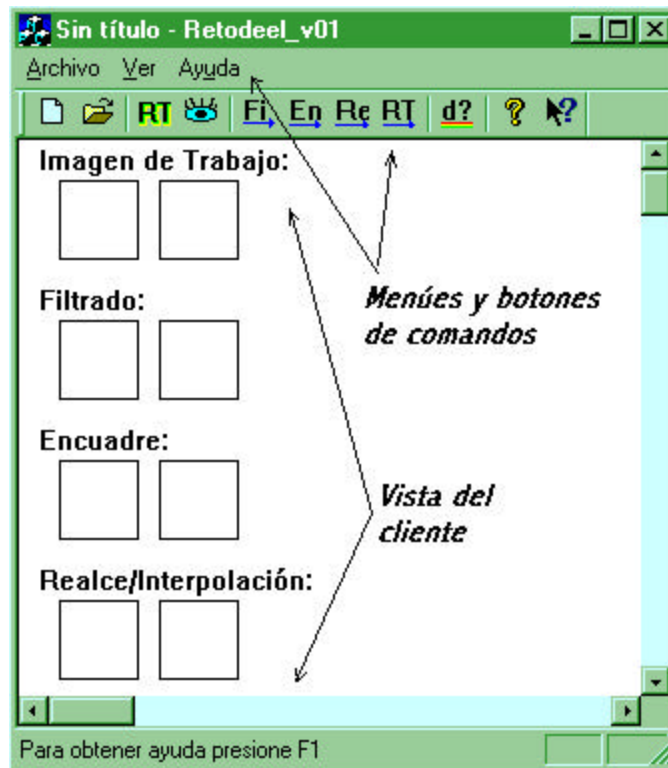
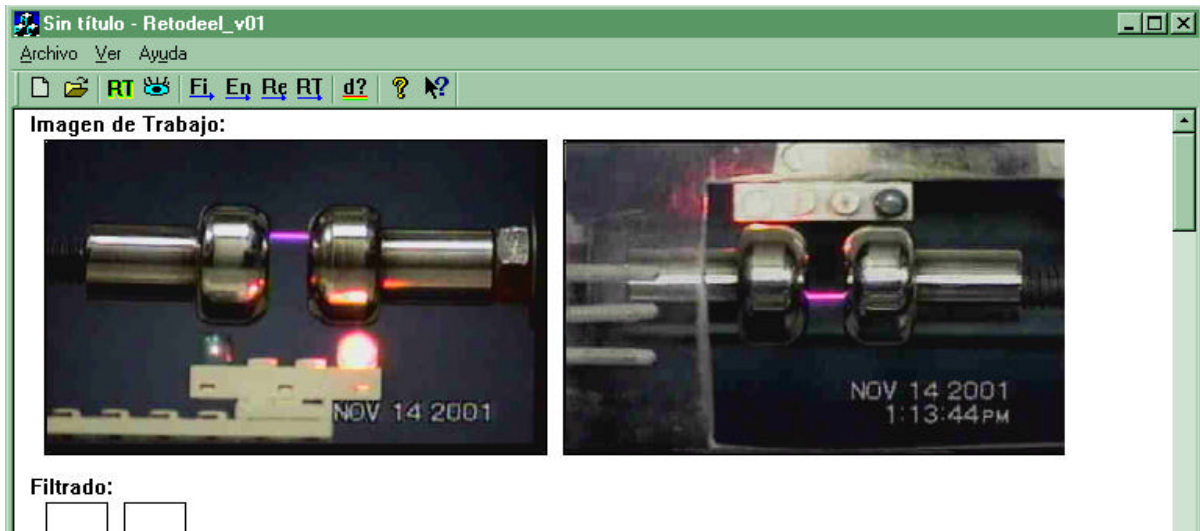


Figura 5-1 Vista de la herramienta Retodeel

El esquema que se siguió en el diseño de esta aplicación es el siguiente: A través de los menús y botones se invocan los comandos para la reconstrucción tomográfica y la carga de imágenes (BMP 24 bits) para su tratamiento.

El área de cliente, está dividida en secciones, donde se presentan las imágenes en tratamiento, así como la evolución de las mismas según la etapa en que se encuentren para alcanzar la reconstrucción tomográfica, a saber: Filtrado, Encuadre, Realce/Interpolación y Reconstrucción Tomográfica.

En la Figura 5-2 se aprecia la herramienta de software (bautizada como Retodeel), tras haber realizado la carga de un par de imágenes a tratar (vista frontal y superior del fenómeno)



**Figura 5-2 Retodeel tras haber cargado las imágenes de trabajo.**

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

En la Figura 5-3 se aprecia los distintos botones de comandos así como una breve explicación de su funcionalidad, esta misma funcionalidad puede ser ejecutada por los menús correspondientes.

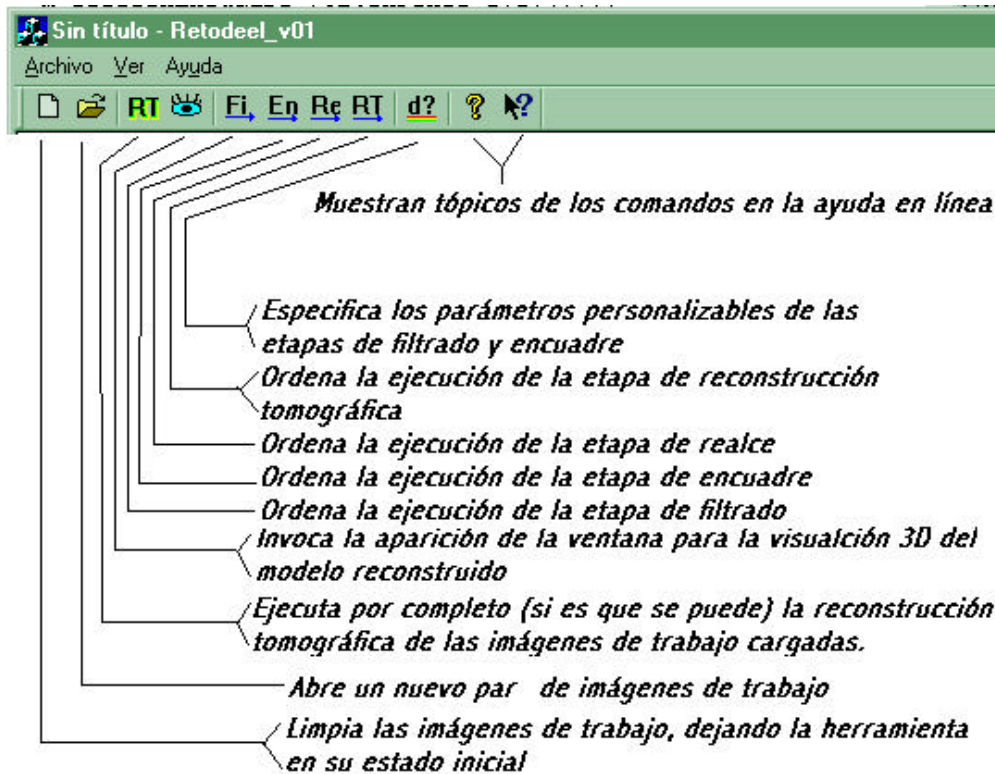


Figura 5-3 Botones de comandos y sus funcionalidades.


En la Tabla 5-1 se lista los comandos disponibles desde la ventana de trabajo de Retodeel.

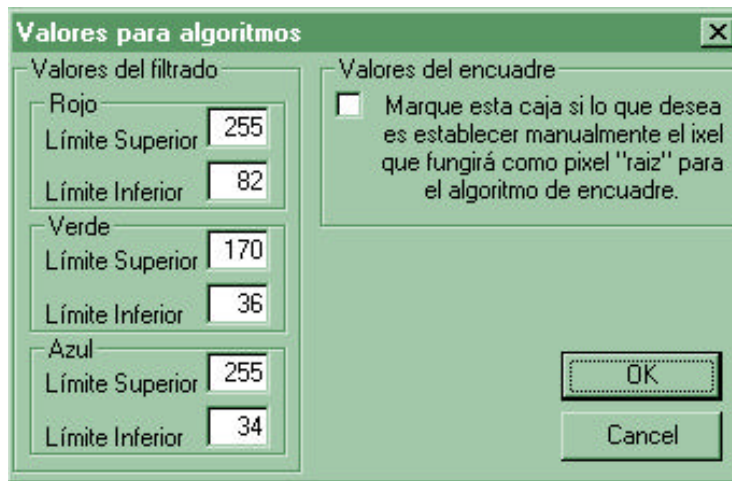
Tabla 5-1 Funcionalidad de los comandos de la herramienta Retodeel

Comando	Tipo	Función
Nuevo	Botón	Elimina toda imagen de trabajo y deja la herramienta como al inicio de la ejecución.
Abrir	Botón	Ordena la selección de dos archivos, para su apertura como nuevas imágenes de trabajo.
"RT"	Botón	Ordena la ejecución de todos los procesos hasta llegar a la reconstrucción tomográfica, de ser posible. Si la reconstrucción tomográfica se realizó con éxito, entonces abre la ventana de visualización 3D, con el modelo reconstruido.
"Ver"	Botón	Si la reconstrucción tomográfica se realizó con éxito, entonces abre la ventana de visualización 3D, con el modelo reconstruido.

Fi	Botón	Ordena la ejecución de la etapa de filtrado, si es que se han cargado imágenes de trabajo.
En	Botón	Ordena la ejecución de la etapa de encuadre, si es que el filtrado se realizó con éxito.
Re	Botón	Ordena la ejecución de la etapa de realce, si es que el encuadre se realizó con éxito.
Rt	Botón	Ordena la ejecución de la etapa de reconstrucción 3D, si es que el realce se realizó con éxito.
d?	Botón	Abre la ventana para establecer los datos personalizados para la etapa de filtrado y de encuadre.
?	Botón	Abre la ventana de ayuda.
"Flecha" ?	Botón	Despliega una ayuda especializada sobre el comando que se seleccione.
Archivo/Abrir	Menú	Lo mismo que el botón "Abrir".
Archivo/Nuevo	Menú	Lo mismo que el botón "Nuevo".
Archivo/Salir	Menú	Termina la ejecución de Retodeel.
Ver/Barra Htas	Menú	Permite que se vea o no la barra de herramientas de la aplicación.
Ver/Barra Edo	Menú	Permite que se vea o no la barra de estado de la aplicación.
Ayuda/Temas	Menú	Abre la ventana de ayuda.
Ayuda/Acerca	Menú	Abre una ventana con información relacionada al desarrollo de la herramienta.

El uso de esta herramienta es sumamente sencillo; tras haber cargado dos imágenes de trabajo (vistas frontal y superior) se puede ejecutar la reconstrucción tomográfica del fenómeno de la descarga eléctrica en la imagen ó ejecutar paso a paso cada etapa hasta llegar a la reconstrucción tomográfica.

En caso de no poder evolucionar de forma autónoma los algoritmos hasta alcanzar la reconstrucción tomográfica, se pueden especificar los parámetros de la etapa del filtrado y/o de la etapa de encuadre al definir los píxeles raíz para el algoritmo de definición de la zona de ocurrencia del fenómeno. Esto se hace al especificar los valores correspondientes en la ventana de configuración de parámetros, que se muestra a continuación y que se invoca por el botón de comando: 



**Figura 5-4** Ventana para configurar los parámetros de los algoritmos de filtrado y encuadre.

Una vez que se han especificado los parámetros (si es que fue necesario) para el correcto funcionamiento de los algoritmos, se llega a la presentación del modelo reconstruido, basado en las mallas simplex, del fenómeno. Como se aprecia en la Figura 5-5:

En la Tabla 5-2 se resume la funcionalidad de la ventana de la Figura 5-4.

**Tabla 5-2** Funcionalidad de la ventana para personalizar algoritmos.

Control	Función
Caja de texto "Rojo/Límite Superior"	Establece el límite superior de la componente rojo en el filtro.
Caja de texto "Rojo/Límite Inferior"	Establece el límite inferior de la componente rojo en el filtro.
Caja de texto "Verde/Límite Superior"	Establece el límite superior de la componente verde en el filtro.
Caja de texto "Verde/Límite Inferior"	Establece el límite inferior de la componente verde en el filtro.
Caja de texto "Azul/Límite Superior"	Establece el límite superior de la componente azul en el filtro.
Caja de texto "Azul /Límite Inferior"	Establece el límite inferior de la

	componente azul en el filtro.
Casilla de selección "Valores del encuadre"	Marcando esta casilla, establece que se use o no los píxeles raíz marcados por el usuario.
Botón "Ok" *	Cierra la ventana aceptando los cambios.
Botón "Cancel" *	Cierra la ventana sin aceptar los cambios.

\* Las etiquetas de estos botones, dependerá del idioma del sistema operativo.

Para establecer manualmente los píxeles raíz de las imágenes, basta con hacer clic con el botón derecho del ratón, sobre las imágenes de trabajo abiertas.

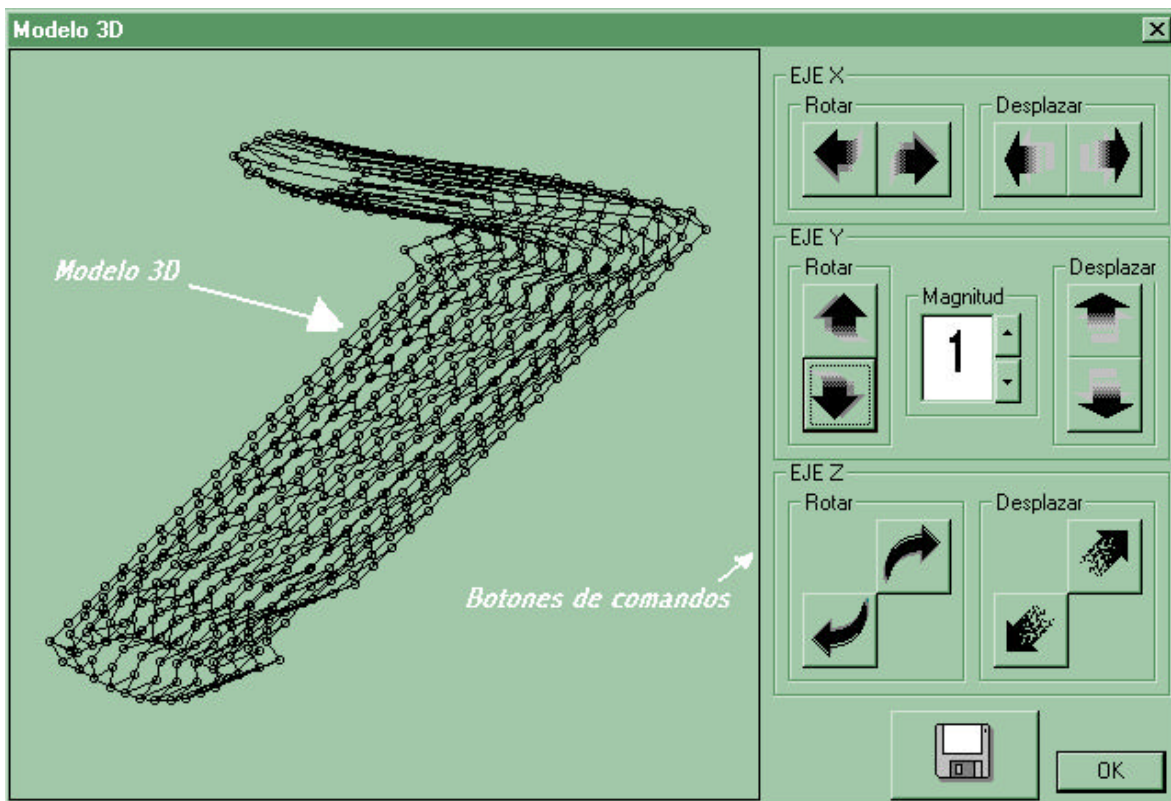


Figura 5-5 Ventana para la visualización del modelo 3D.

En la Tabla 5-3 se resume la funcionalidad de la ventana de la Figura 5-5.

Tabla 5-3 Funcionalidad de la ventana de visualización 3D

Control	Función
Botones "Eje X/Rotar"	Rota sobre el eje X el modelo 3D

Botones "Eje X/Desplazar"	Desplaza sobre el eje X el modelo 3D
Botones "Eje Y/Rotar"	Rota sobre el eje Y el modelo 3D
Botones "Eje Y/Desplazar"	Desplaza sobre el eje Y el modelo 3D
Botones "Eje Z/Rotar"	Rota sobre el eje Z el modelo 3D
Botones "Eje Z/Desplazar"	Desplaza sobre el eje Z el modelo 3D
Caja de texto "Magnitud"	Establece la magnitud para los desplazamientos y rotaciones. Las unidades son píxeles.
Botón "Disco"	Ordena la generación de un archivo de texto con información que define completamente al modelo 3D.
Botón "Ok"	Cierra la ventana de visualización 3D

Algo que vale la pena mencionar en esta parte es que como una funcionalidad adicional al programa, desde la ventana mostrada en la imagen 3.5, uno puede invocar la generación de un archivo de texto que tiene todas las coordenadas de los vértices y relación de segmentos que unen vértices, para su uso en otros programas como MatLab, Excel, AutoCAD, etc.

El formato de este archivo (de extensión ".d3d"), se describe a continuación:

```

<Inicio de archivo>
<n> vértices:
<vértice 1.X> <vértice 1.Y> <vértice 1.Z>
<vértice 2.X> <vértice 2.Y> <vértice 2.Z>
<vértice 3.X> <vértice 3.Y> <vértice 3.Z>
    •           •
    •           •
    •           •
<vértice (n-1).X> <vértice (n-1).Y> <vértice (n-1).Z>
<vértice n.X> <vértice n.Y> <vértice n.Z>
<m> arcos:
< vértice lado izquierdo arco 1> < vértice lado derecho arco 1>
< vértice lado izquierdo arco 2> < vértice lado derecho arco 2>
< vértice lado izquierdo arco 3> < vértice lado derecho arco 3>
    •           •
    •           •
    •           •
< vértice lado izquierdo arco (m-1)> < vértice lado derecho arco (m-1)>
< vértice lado izquierdo arco m> < vértice lado derecho arco m>
<Fin de archivo>

```

Donde <vértice i.X>, <vértice i.Y> y <vértice i.Z> representan las coordenadas X,Y,Z respectivamente del vértice 'i'. Y <vértice lado



izquierdo arco j> <vértice lado derecho arco j> representan los índices (números) de los vértices que una el arco 'j'.

Un ejemplo de este formato, se lista a continuación:

```
3 vértices:  
196.969686073217 -5.04479757055621 0  
205.108929299383 -9.68089564453555 0  
213.248172525549 -13.5327051279424 0  
3 arcos:  
1 3  
2 1  
2 3
```

Que representa a un modelo 3D compuesto de 3 vértices y 3 arcos, el vértice 1 tiene la coordenada X con valor de: 196.969686073217, la coordenada Y: -5.04479757055621 y su coordenada Z: 0. Y así sucesivamente para los vértices 2 y 3. El arco 1 une a los vértices 1 y 3, el 2 al 2 y 1 y el 3 al 2 y 3.

Otro aspecto interesante de la herramienta Retodeel es que ha sido implementada con un sistema de ayuda en línea que refleja todos los aspectos operativos de la herramienta así como algunos de los tópicos teóricos en los que se basa el proyecto mismo.

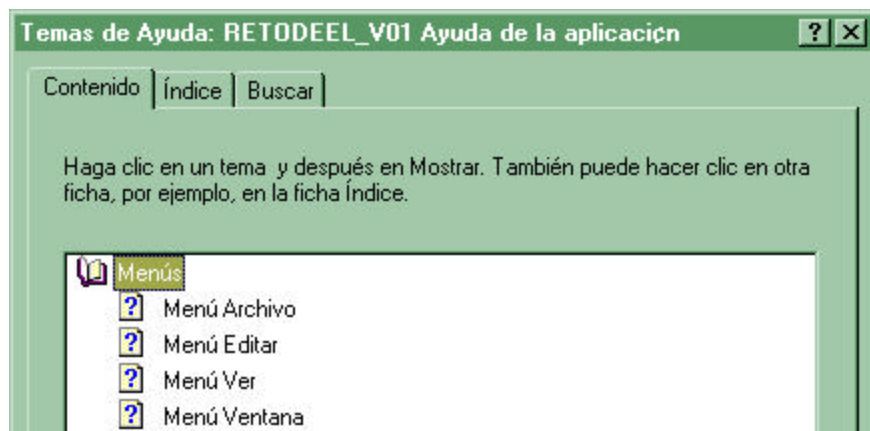


Figura 5-6 Vista de la ayuda en línea de la herramienta.

## 5.2 Retodeel en funcionamiento

En esta sección presentamos una serie de ejemplos del funcionamiento de Retodeel. Cabe mencionar que los ejemplos aquí mostrados, se crean de la misma forma en que después, en un trabajo posterior, se caracterizará las descargas eléctricas. Esta caracterización, por estar fuera del ámbito de este proyecto no se menciona en el actual escrito. Los ejemplos mostrados en esta sección, corroboran el haber satisfecho los principales dos objetivos del proyecto: 1) Diseñar e implementar los procesos de cómputo necesarios para llevar a cabo la reconstrucción tomográfica 3D, empleando el modelo de las mallas simplex. 2) Generar la base que permitirá realizar una caracterización de descargas eléctricas.

En la tabla 5-4, se resumen las características de los ejemplos mostrados en las subsecuentes figuras.

En la figura 5-7 se muestran las imágenes de trabajo con las que se generaron los ejemplos.

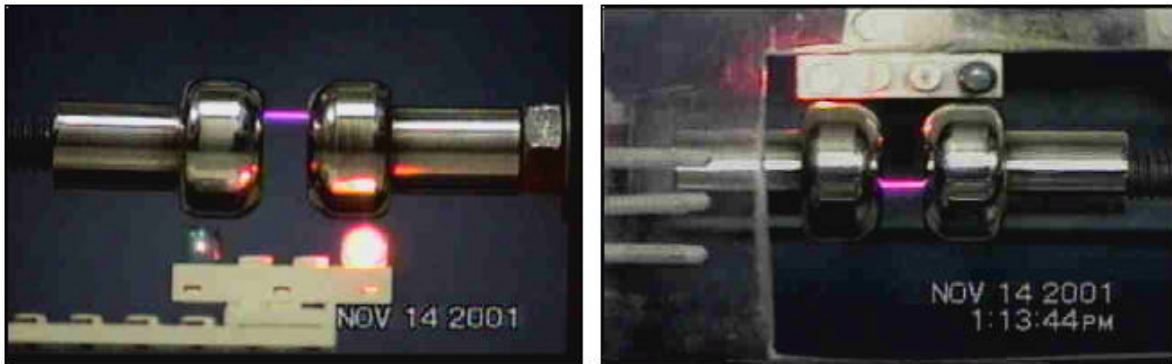


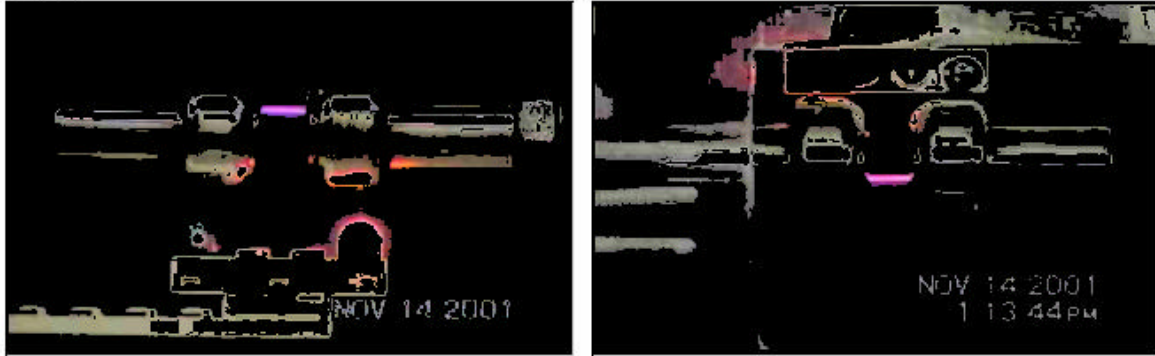
Figura 5-7 Imágenes de trabajo para los ejemplos de Retodeel

Tabla 5-4 Ejemplos de demostración de Retodeel

Ejemplo	Valores del filtro						Figuras
	Rojo Superior	Rojo Inferior	Verde Superior	Verde Inferior	Azul Superior	Azul Inferior	
1	255	<b>102</b>	170	36	255	34	5-9 y 5-10
2	255	<b>82</b>	170	36	255	34	5-11 y 5-12
3	255	<b>72</b>	170	36	255	34	5-13 y 5-14
4	255	72	170	<b>100</b>	255	34	5-15 y 5-16
5	255	72	170	<b>75</b>	255	34	5-17 y 5-18
6	255	72	170	<b>50</b>	255	34	5-19 y 5-20

Nota: Todos los ejemplos se crearon con una ubicación automática de los “píxeles raíz” para el algoritmo de encuadre.

Filtrado:



Encuadre:

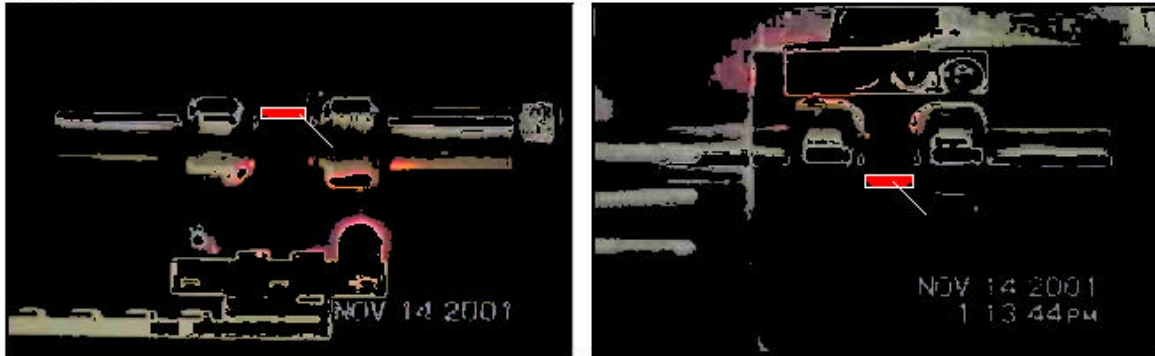


Figura 5-8 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 1

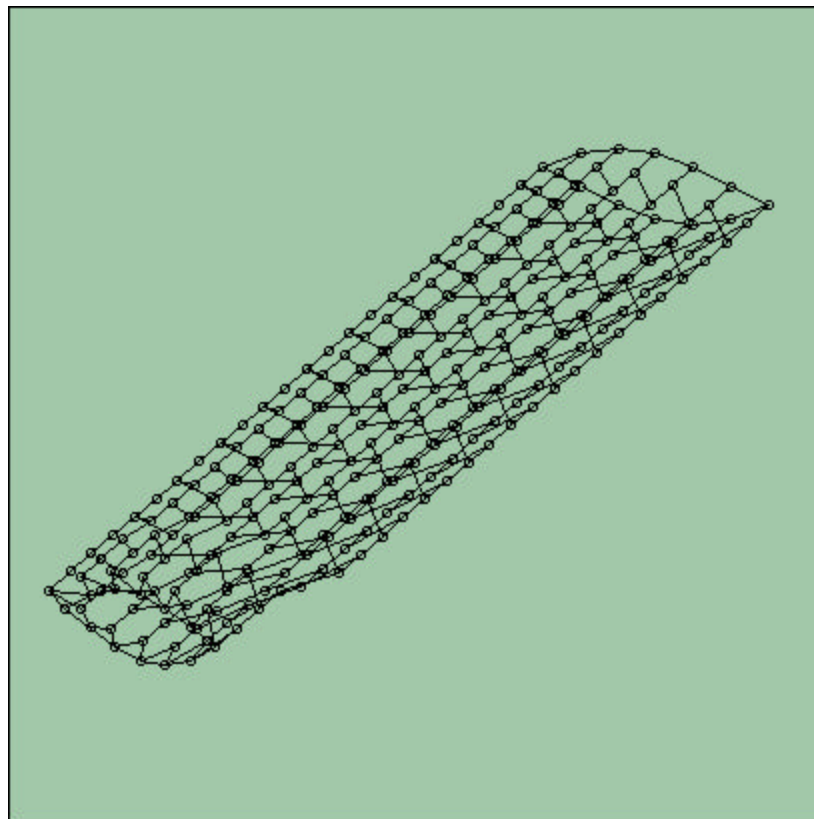
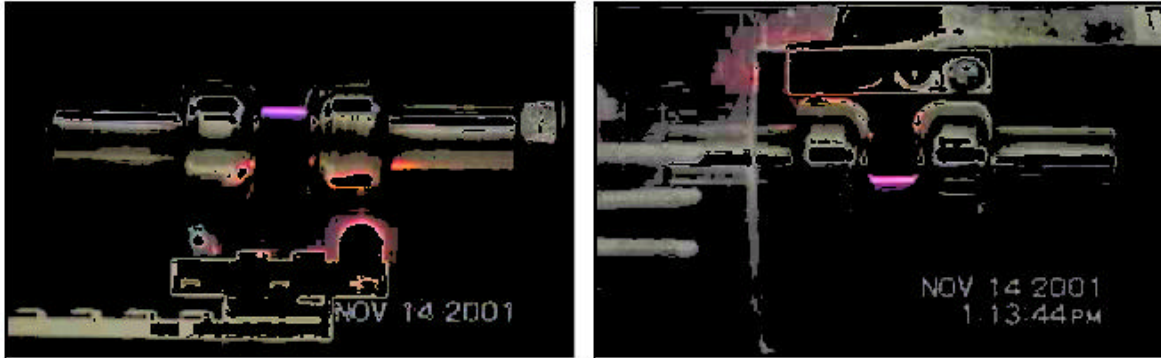


Figura 5-9 Imagen del modelo 3D del ejemplo 1

Filtrado:



Encuadre:

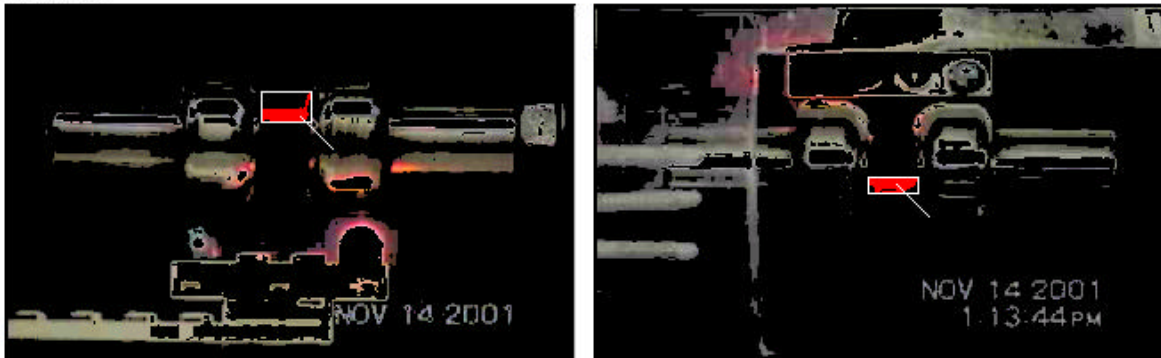


Figura 5-10 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 2

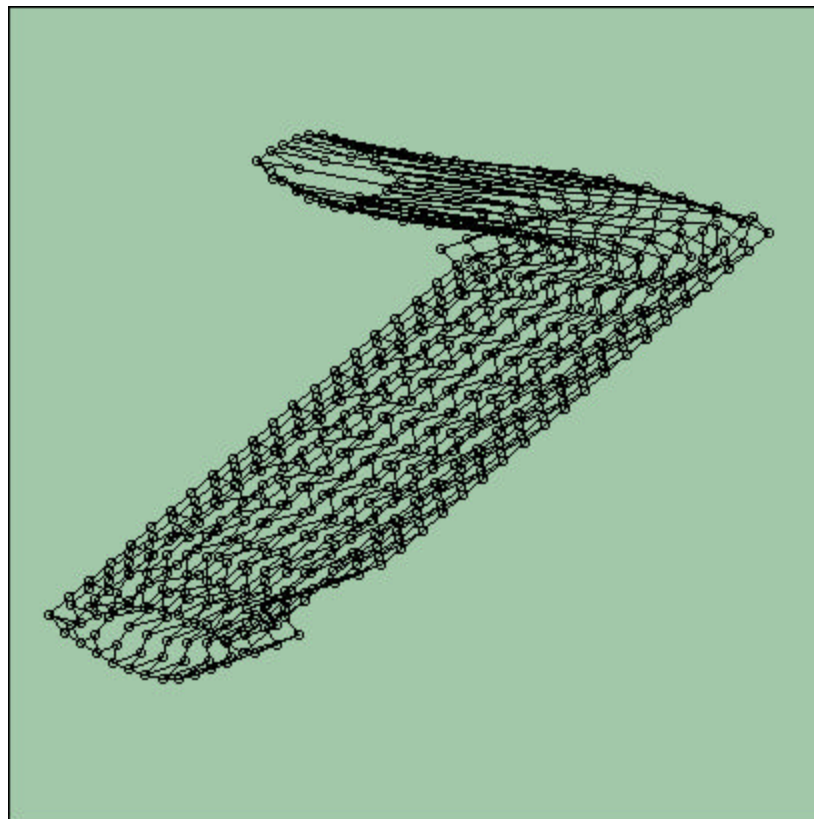
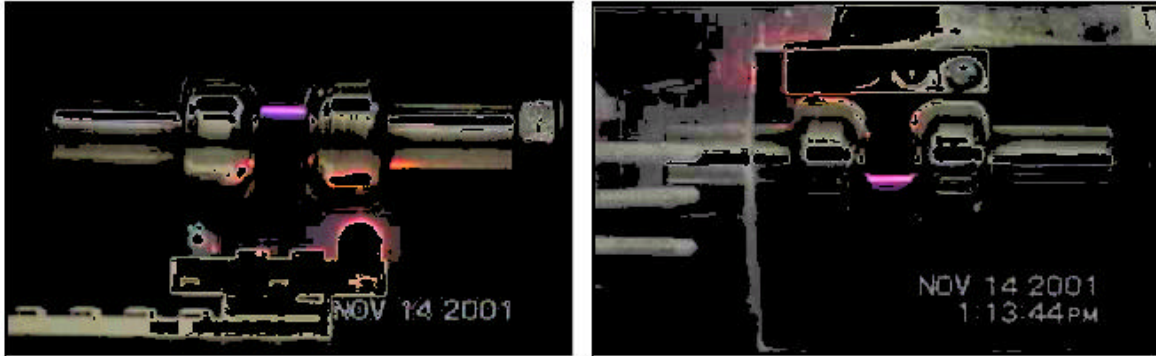


Figura 5-11 Imagen del modelo 3d del ejemplo 2

Filtrado:



Encuadre:

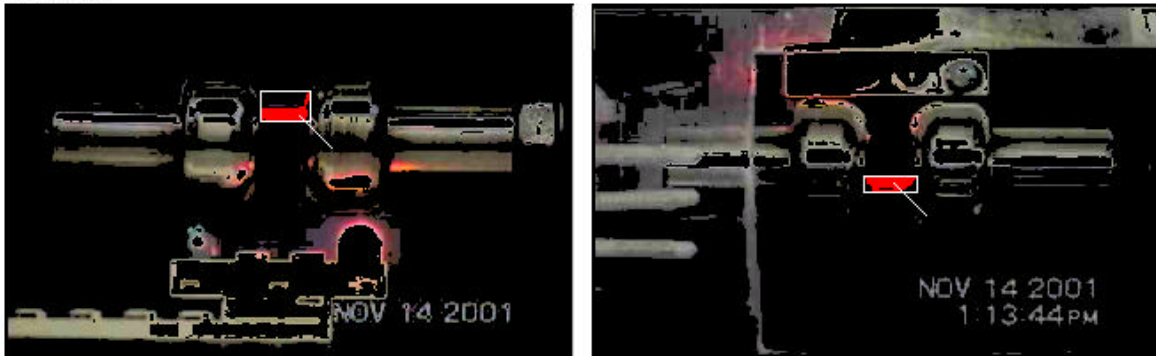


Figura 5-12 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 3

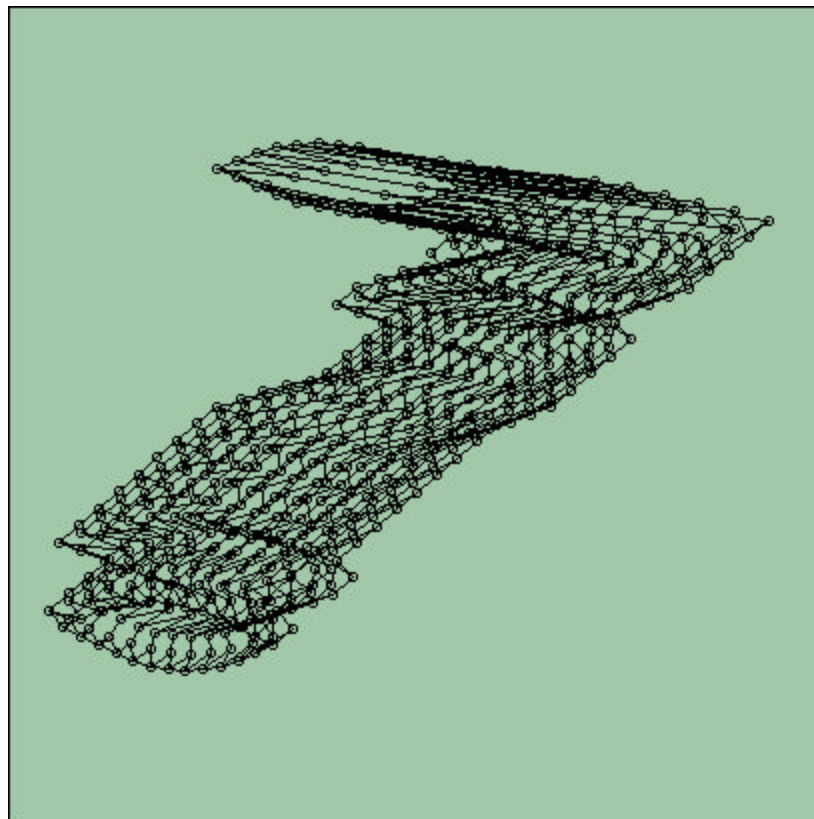
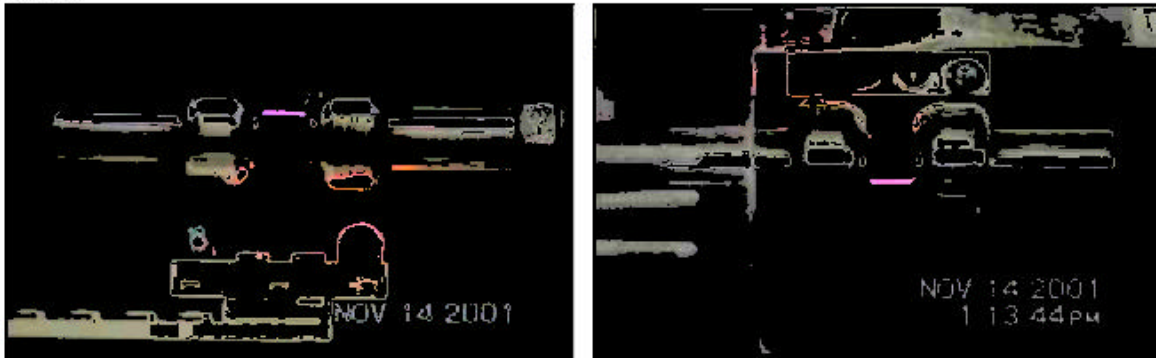


Figura 5-13 11 Imagen del modelo 3d del ejemplo 3



Filtrado:



Encuadre:

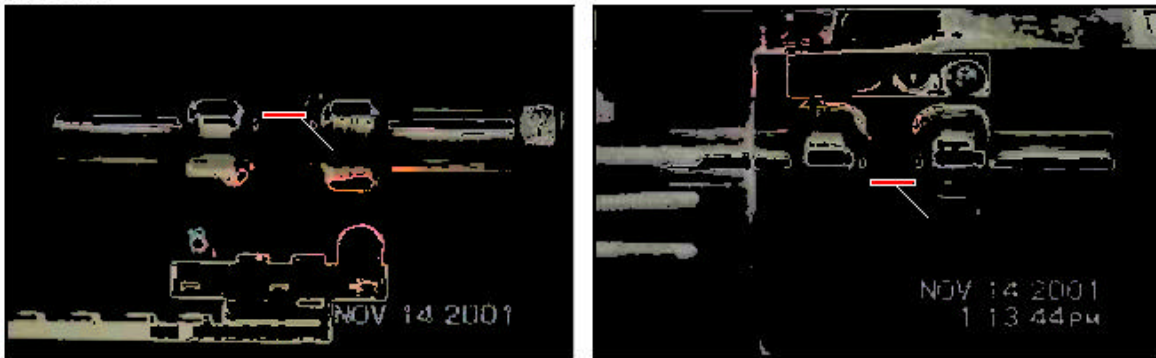


Figura 5-14 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 4

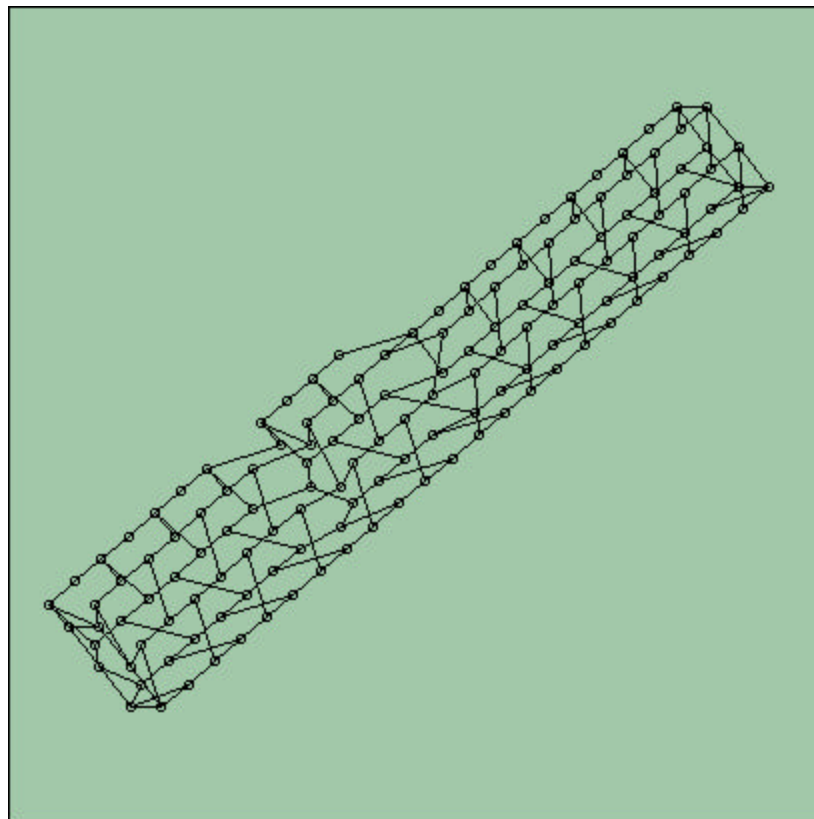
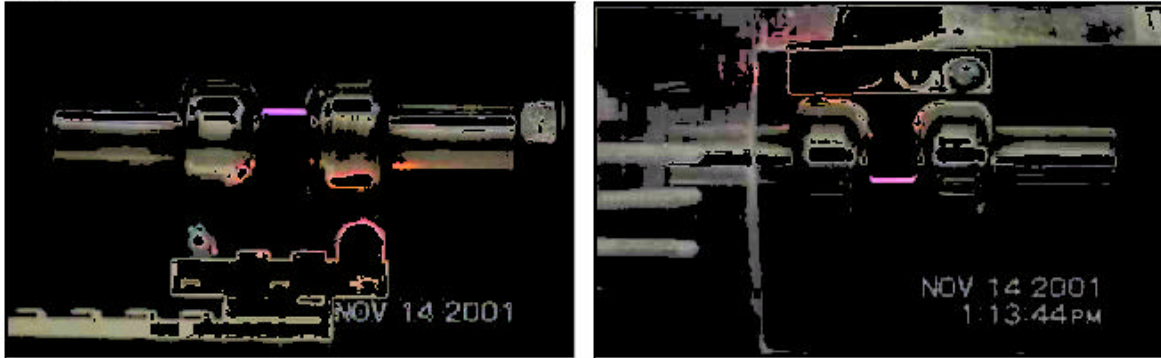


Figura 5-15 Imagen del modelo 3d del ejemplo 4

Filtrado:



Encuadre:

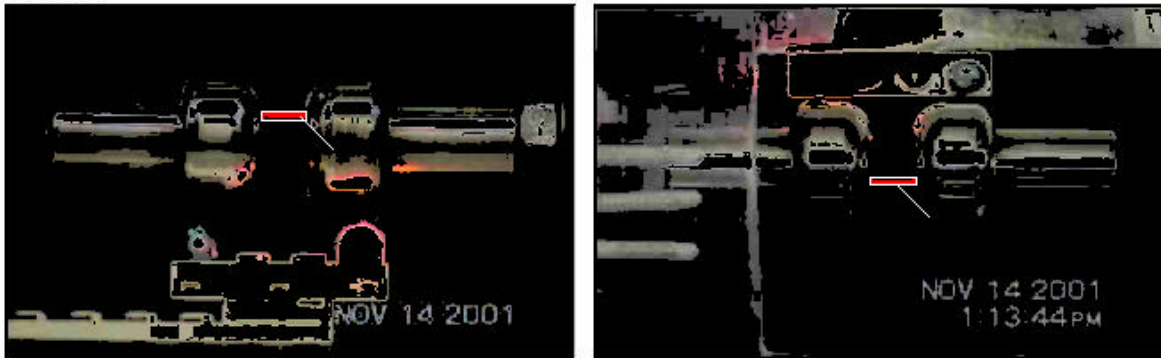


Figura 5-16 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 5

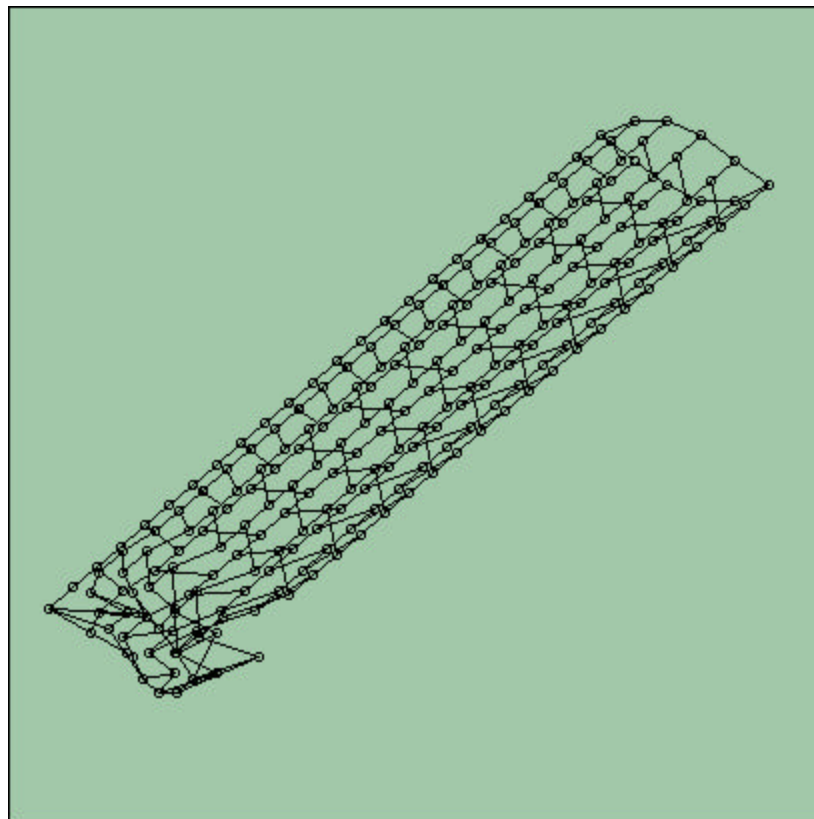
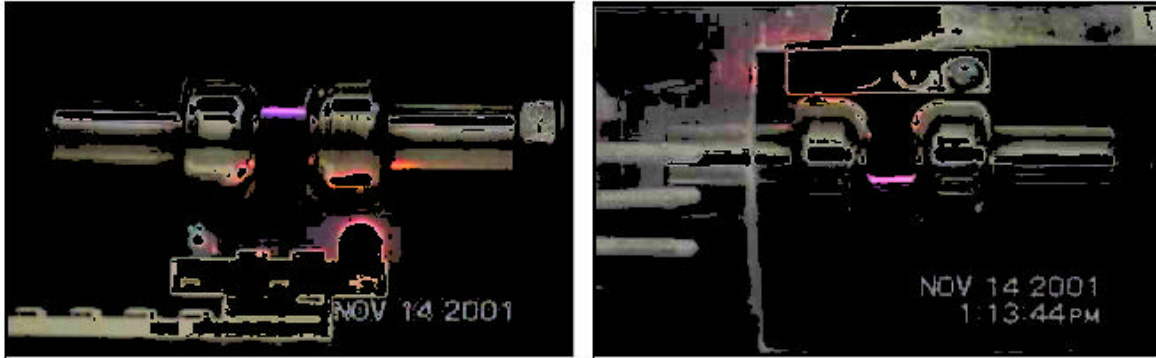


Figura 5-17 Imagen del modelo 3d del ejemplo 5

Filtrado:



Encuadre:

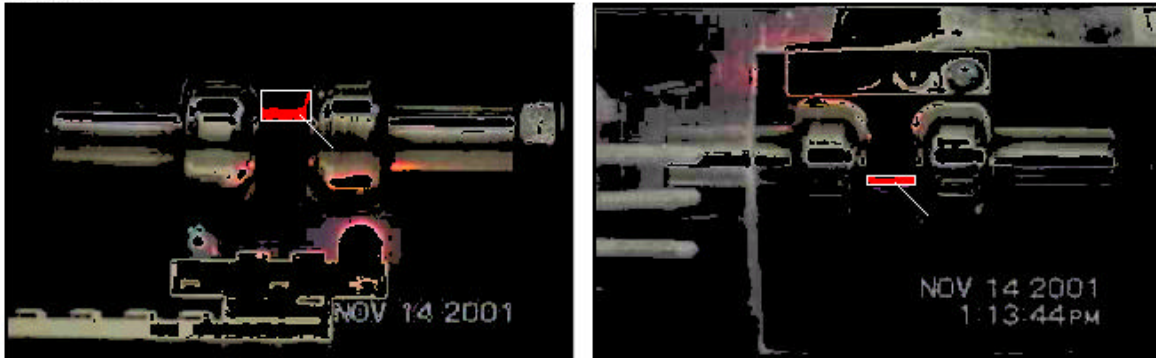


Figura 5-18 Imágenes del filtrado y encuadre del ejemplo 6

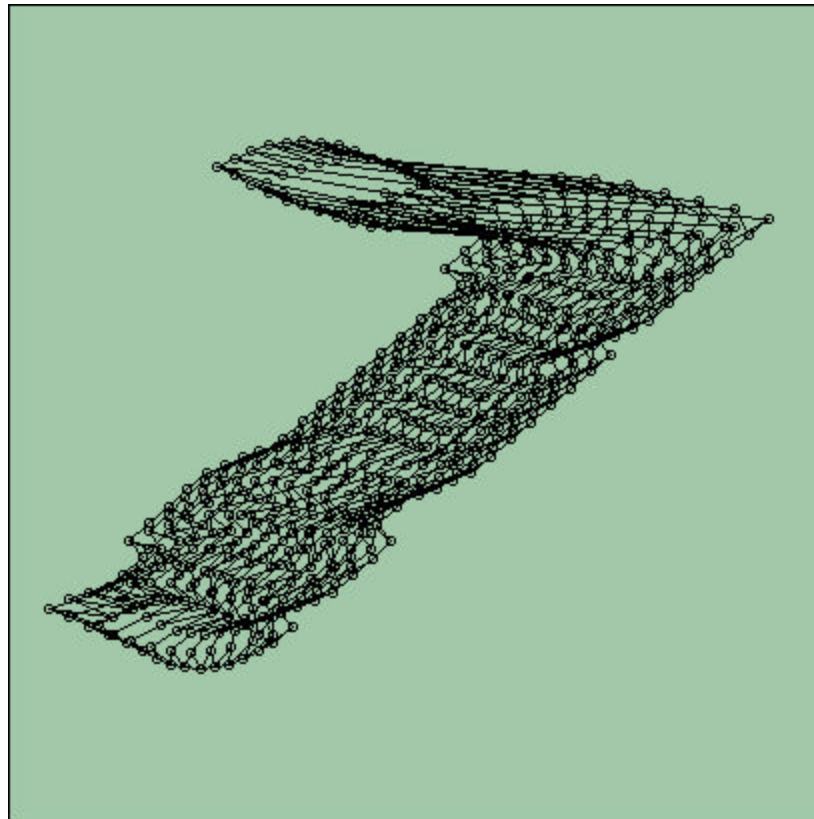


Figura 5-19 Imagen del modelo 3d del ejemplo 6



En las Figuras 5-8 a 5-19 se han mostrado las imágenes de filtrado, encuadre y de los modelos 3D, para los ejemplos 1 al 6. En este caso no se está obteniendo ninguna conclusión acerca de la topología del modelo 3D en función de los parámetros del filtro, que aunque es evidente la existencia de la relación (ver Tabla 5-4 y Figuras 5-8 a la 5-19) no es el objetivo de este proyecto. Y solamente se están exponiendo los ejemplos como una corroboración de los algoritmos diseñados e implementados.

La deducción de relaciones entre la topología del modelo 3D y los parámetros de los algoritmos, así como una caracterización de las descargas eléctricas con la información de estas relaciones, se ha dejado para un trabajo futuro.

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

### Observaciones sobre el desarrollo

Es mucha la experiencia que se ha generado en el desarrollo de este proyecto, en particular, para cada una de las etapas se puede hablar de sus características relevantes.

En la etapa del filtrado, destacamos dos características que nos llamaron la atención, la primera de ellas es que al ser el fenómeno de las descargas eléctricas un plasma autolumínico, nos encontramos con que el fenómeno se puede reflejar en los electrodos donde ocurre, lo que provocaría una mala interpretación de la información, afortunadamente, con un buen posicionamiento de las cámaras, las superficies que pudieran reflejar el fenómeno, no presentan un frente al foco de las video-cámaras. Además, ya que el fenómeno de la descarga se refleja en una superficie que también contribuye a sus componentes de color, al reflejar otras fuentes lumínicas del ambiente, con unos buenos parámetros de filtrado, se puede eliminar esta información falsa.

Otra característica dentro de la etapa de filtrado, es la cantidad de información que a pesar de no pertenecer al fenómeno, sus componentes de color sí les permiten aparecer posterior a la aplicación del filtro, dentro de esta información está, por ejemplo, algunas zonas de los electrodos, algunas zonas de la señal lumínica de sincronización y algunas zonas de la estructura donde se montaron los electrodos. Ahora bien, la aparición de estas zonas, y que no se pudieran eliminar meramente con la aplicación de filtros de color, nos plantea la imperante necesidad de ubicar la zona donde ocurre el fenómeno, ya que la reconstrucción tomográfica de toda la información posterior al filtrado, en la mayoría de los casos nos llevaría a reconstruir mas allá del fenómeno que se quiere reconstruir, aisladamente.

La primera observación sobre la etapa de encuadre es que para poder ubicar la zona de ocurrencia del fenómeno, de alguna forma se tenía que involucrar el color ya que cualquier referencia por forma, es decir, con algún reconocimiento morfológico, sería muy impreciso ó costoso de implementar (por la cantidad de "muestras" a seguir como patrón) ya que la forma de las descargas eléctricas es aleatoria, además de que un método que buscara sobre algún conjunto de descriptores que abarcaran varias formas "características" de las descargas, no garantizaría que realmente se encontrara y aislara únicamente el fenómeno. Por lo que se

decidió el buscar una ocurrencia muy particular del fenómeno, un color que fuese lo más exclusivo del fenómeno. Aquí, la primera pregunta que podría surgir, es el por qué no usar esta exclusividad para la etapa del filtrado, la respuesta es sencilla y se explica a continuación.

Al realizar distintas pruebas, se pudo apreciar claramente que al extremar los límites de la etapa de filtrado, si se logra aislar únicamente al fenómeno, pero parte del fenómeno también es mutilado, por lo que se necesita encontrar información exclusiva del fenómeno para ubicar una parte de él, y de ahí empezar a definir la zona hasta donde llega el fenómeno. Que es lo que finalmente se implementa en la etapa de encuadre, con un algoritmo de desbordamiento por zona.

Las observaciones de la etapa de encuadre, claramente están vinculadas con las observaciones de la etapa de filtrado, sin embargo, las siguientes observaciones, las de la etapa de realce, veremos que son más dependientes del fenómeno y su ambiente que de las etapas previas.

Otra observación relevante de la etapa de realce es la relacionada con el empalme de dos conjuntos de información bidimensional, para la formación de un conjunto de información tridimensional (la reconstrucción tomográfica). La preparación de esta información aunque pareciera sencilla, realmente es trascendente para la calidad de la reconstrucción tomográfica en la siguiente etapa. Esto se debe a que cuando se están ajustando los datos de la información, en caso de haber una mala calidad en la adquisición de información del fenómeno, seguramente se tendrá que realizar una interpolación ó un truncamiento de información, lo cual afectaría directamente a la calidad de la reconstrucción tomográfica. Obviamente, la valoración de esta influencia en la calidad de la reconstrucción tomográfica, no se puede realizar sino hasta tener una caracterización del fenómeno y poder comparar el modelo teórico con el generado por la reconstrucción tomográfica.

Obtenida una métrica de la calidad, se podrá regresar a evaluar las etapas (filtrado, encuadre, interpolación y reconstrucción tomográfica) y modificar sus parámetros reflejando su influencia en la calidad del proceso completo.

En la etapa de la reconstrucción tomográfica, nuestra observación principal estriba en que para poder realizar un ajuste de información bidimensional a un conjunto de vértices y segmentos (malla simplex) que definan a un modelo tridimensional, es necesario conocer bien las características del modelo, que en este caso fue el de las mallas simplex, y siempre que se intente empalmar esa información bidimensional a la

tridimensional, existirá un rango de ajuste, ya que difícilmente el empalme se da de forma natural. Además, los empalmes siempre se harán buscando minimizar cualquier discrepancia ó error, ya sea con técnicas bien definidas ó criterios subjetivos.

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 estamos hablando del fenómeno de las descargas eléctricas, nos encontramos que una de sus características, a saber; la autoluminosidad, nos pone en la precaria situación de no poder conocer la estructura interna ó 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.

Adicionalmente, y como cierre de esta sección comentamos que al haberse realizado este proyecto, no se encontró ninguna referencia de la aplicación del método de las mallas simplex a un problema de la vida real, de hecho, en comunicación con el creador del modelo de las mallas Simplex, el Dr. Hervé Delingette, se supo que no se ha realizado (o al menos documentado) ninguna aplicación y/o técnica de las mismas para una reconstrucción de un objeto de la vida real, teniendo puramente modelos teóricos. Por lo que este trabajo, es la primera aplicación real que se documenta de las mallas simplex y los procesos de cómputo involucrados, para una reconstrucción de un objeto de la vida real, en particular, usando mallas 2-simplex para la reconstrucción de descargas eléctricas.

## **Conclusiones**

De los objetivos planteados al principio, se ha logrado cumplir con la reconstrucción tomográfica 3D de las descargas eléctricas que se obtienen de un montaje eléctrico. Así también, se ha comprobado la aplicación de las mallas Simplex para la modelación de objetos de la vida real, al haber sido este modelo de mallas, el usado para la representación del modelo reconstruido.

En congruencia con los objetivos, también se comprobó el buen funcionamiento de la metodología para la captura de imágenes propuesta.

El trabajo se ha concluido teniendo ya implementadas las herramientas base que nos permiten presentar la reconstrucción 3D. Las tareas de

lectura de imagen, filtrado, encuadre y despliegue 3D son llevadas exitosamente, al igual que la interpolación y la reconstrucción 3D. Adicionalmente, esta herramienta se a enriquecido con la funcionalidad de generar archivos con información del modelo 3D, para ser usados por otras herramientas de software. Otra funcionalidad adicional es la de permitir la personalización de los parámetros en los algoritmos del procesamiento de imágenes.

Las limitantes de este proyecto se centran en tres:

- *Información de dos planos;* La información que se usa para la reconstrucción tomográfica, se basa en la obtenida de sólo dos planos, que se pueden considerar como al 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, sin embargo, la funcionalidad adicional de la herramienta permite sobrepasar esta limitante al permitir personalizar los parámetros de los algoritmos.

## Trabajo Posterior

La valoración de la reconstrucción tomográfica se dará hasta el momento en que se realice la caracterización de las descargas, mientras tanto, no se puede realizar sino a través de apreciaciones visuales, que terminan siendo apreciaciones subjetivas.

Uno de los primeros trabajos con los que se puede continuar este proyecto es realizar la valoración de la reconstrucción tomográfica al realizar una caracterización de la misma y compararla con la de los modelos generados teóricamente.

También consideramos que se puede sujetar a otro proceso (además del hecho en este proyecto) de mejora en la calidad de la adquisición de información y su transformación, pero con un ambiente experimental mucho más estricto donde se pudiera controlar con mayor precisión las variables ambientales del fenómeno y así poder valorar cada una de las etapas de la reconstrucción tomográfica y ajustarlas minimizando las discrepancias. Por ejemplo, realizar captura de imágenes con dispositivos de video de mayor precisión en velocidad y definición, también que el

montaje experimental sea más aislado y se puedan controlar características del ambiente, como presión, luz, temperatura, humedad, además de probar con equipo de cómputo con mayores capacidades en memoria para el trabajo con información más detallada.

Como se mencionó previamente, en caso de tener particularidades en la morfología de las descargas eléctricas, como podrían ser concavidades, y que éstas no se pudieran detectar a través de los algoritmos de procesamiento de imágenes planteados en este proyecto, bien se podría instrumentar un mecanismo para el "sondeo" de la superficie y volumen interior de la descarga, aunque claro está, este mecanismo no debería de perturbar el comportamiento "natural" de la descarga eléctrica.

Otro trabajo posterior es minimizar la información interpolada del fenómeno, adecuando el esquema de captura de imágenes y los procesos derivados, para que la información del contorno tubular de la descarga, se adquiera del fenómeno mismo y no de un ajuste teórico, nuestra primera idea para esto es implementar una tercera cámara de video que capture información, pero que aunque idealmente debería estar en un tercer eje, ortogonal al plano formado por los ejes de vista de las dos cámaras actuales, esto no se podría implementar ya que uno de los electrodos obstruiría la vista. Esto se podría remediar si la cámara tuviera un ángulo de inclinación, pero requeriría de una transformación de su información capturada, proyectándola sobre el supuesto ángulo de captura ideal.

## 7. REFERENCIAS

Artículos:

- [1] Hervé Delingette. General Object Reconstruction based on Simplex Meshes. En International Journal of Computer Vision, 32, 111-142 (1999) Kluwer Academic Publishers.[2] Edgar Bañuelos Velázquez y Raúl Jiménez Rojas. 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. En Proyecto terminal - UAM Azcapotzalco, Departamento de Energía. año: 2001 asesor: Dr. José Luis Hernández Ávila.
- [3] Isaac Weiss y Manjit Ray. Model-Based Recognition of 3D Objects from Single Images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, No. 2, February 2001.
- [4] Ming-Fang Wu y Hsin-Teng Sheu. Representation of 3D Surfaces by Two-Variable Fourier Descriptors. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 20, No. 8, August 1998.
- [5] Jen-Hui Chuang y Min-Chi Ko. Skeletonization of Three-Dimensional Object Using Generalized Potential Field. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, November 2000.
- [6] Renato Pajarola y Jarek Rossignac. Compressed Progressive Meshes. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 6, No. 1, January-March 2000.
- [7] Fausto Bernardini, Joshua Mittleman, Holly Rushmeier, Claudio Silva y Gabriel Taubin. The Ball-Pivoting Algorithm for Surface Reconstruction. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 4, October-December 2000.
- [8] Alan P. Mangari y Ross T. Whitaker. Partitioning 3D Surface Meshes Using Watershed Segmentation. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 6, No. 1, October-December 1999.
- [9] Yong Zhou y Arthur W. Toga. Efficient Skeletonization of Volumetric Objects. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 5, No. 3, July-September 1999.
- [10] M. Zerroug y R. Nevatia. Part-Based 3D Descriptions of Complex Objects from a Single Image. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 21, No. 9, September 1999.
- [11] Issac J. Trotts, Bernd Hamann y Kenneth I. Joy. Simplification of Tetrahedral Meshes with Error Bounds. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 5, No. 3, July-September 1999.

- [12] Christoph Bregler, Aaron Hertzmann, Henning Biermann. Recovering Non-Rigid 3D Shape from Image Streams. Proc. of IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition 2000
- [13] Nicolas J. Dusaussoy. VOIR: A Volumetric Image Reconstruction Algorithm Based on Fourier Techniques for Inversión of the 3-D Radon Transform. En IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 5, No. 1, January 1996.
- [14] Hagit Zabrodsky and Daphna Weinshall. Using Bilateral Symmetry To Improve 3D Reconstruction From Image Sequences. En Computer Vision and Image Understanding, 1997. 7
- [15] M. Bhatia, W. C. Karl, and A. S. Willsky. A wavelet-based method for multiscale tomographic reconstruction- En IEEE Trans. Med. Imaging, vol. 15, no. 1, 1996.
- [16] Wolfgang Niem, Marcus Steinmetz. Camera Viewpoint Control for the Automatic Reconstruction of 3D Objects. SPIE Proceedings, Vol. 2182, 1996.
- [17] Kia Ng, Vitor Sequeira, Stuart Butterfield, David Hogg and Joao G.M. Goncalves. An Integrated Multi-sensory System for Photo-realistic 3D scene Reconstruction. En Proc. ISPRS Comm. V, Hakodate, Japan, 1998.
- [18] P. Metherall, R.H. Smallwood, D.C. Barber. Three Dimensional Electrical Impedance Tomography of the Human Thorax. 18<sup>th</sup> Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Amsterdam 1996 3.4.1: Electrical Impedance Tomography-Reconstruction Algorithms
- [19] David Yañez Mendoza. Dimension Fractal de Trayectorias de Descargas Eléctricas en Aire. En Tesis MC. - INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
- [20] Frank Natterer. Algorithms in Tomography. En The State of the Art in Numerical Analysis, I.S. Du (ed.) et al., Oxford, Clarendon Press, Inst. Math. Appl. Conf. Ser., New Ser. 63, 1997.
- [21] Zhengyou Zhang. Image-Based Geometrically-Correct Photorealistic Scene/Object Modeling (IBPhM): A Review. En Third Asian Conf. Comp. Vision, Hong Kong, volume II, Springer Verlag, January 8--10 1998.
- [22] Schmid, C., Mohr, R. and Bauckhage, C.. Comparing and Evaluating Interest Points. En Proc. Int. Conf. on Computer Vision (ICCV98), 1998.
- [23] Philip F. McLauchlan. Gauge Invariance in Projective 3D Reconstruction. En IEEE Workshop on Multi-View Modeling and Analysis of Visual Scenes (MVIEW'99), , 1999.



Libros:

- [24] Bernd Jähne. Digital Image Processing - Concepts, Algorithms and Scientific Applications. Third Edition. Ed. Springer. pP. 77-155.
- [25] Rafael C. González y Richard E. Woods. Digital Image Processing E. Addison Wesley. pP. 81-156.
- [26] Kenneth R. Castleman. Digital Image Processing. Ed. Prentice Hall. pP. 563-599

## Apéndice A MONTAJE ELÉCTRICO

El montaje eléctrico presentado por Bañuelos *et al*[2] (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 tomográfica 3D.

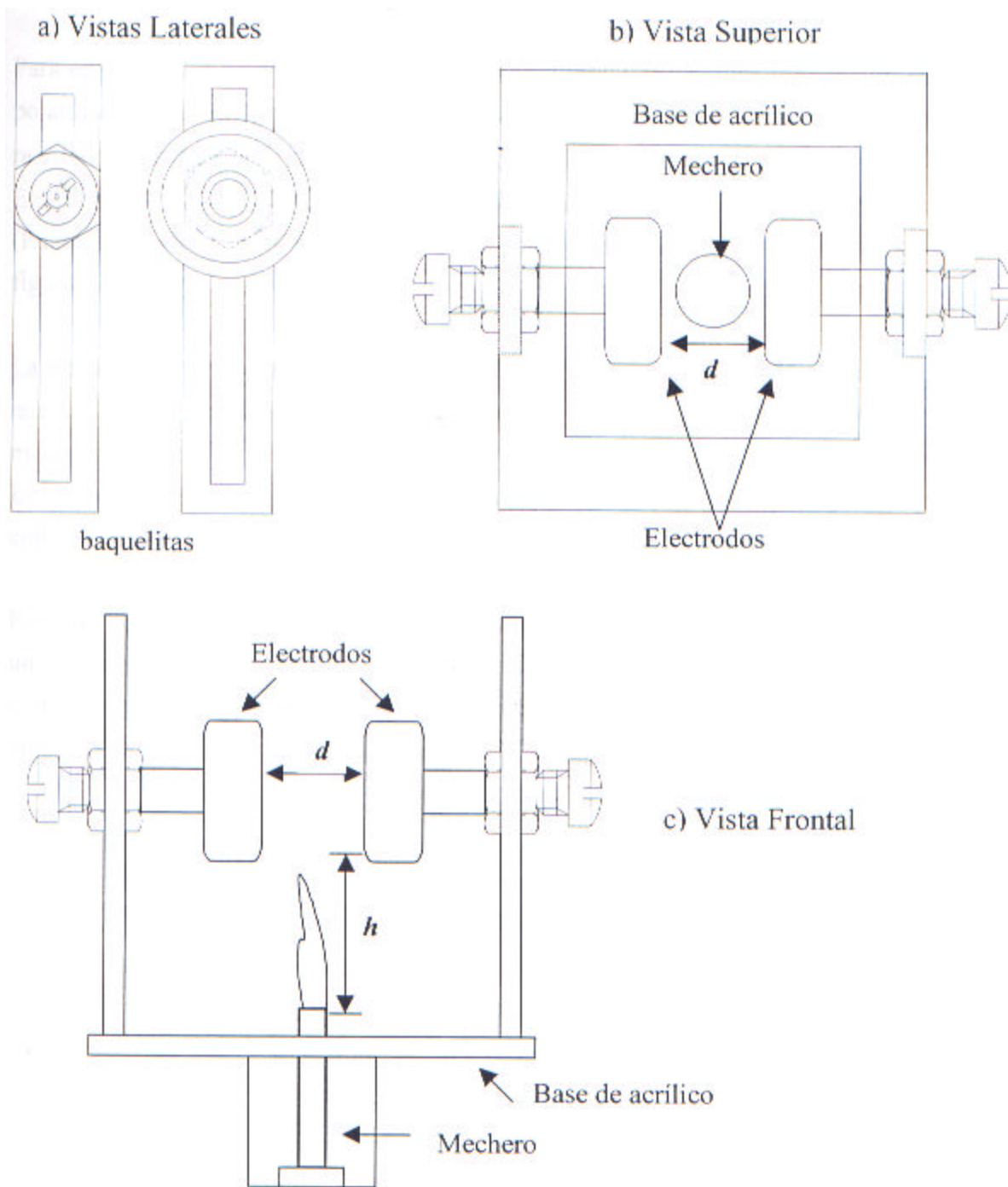
### Descripción del montaje eléctrico

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 planos y paralelos con un perfil tipo Borda. Bajo esta geometría se tienen las siguientes ventajas:

- Uniformidad del campo eléctrico.
- En el borde del electrodo, se minimizan los efectos de concentración de campo eléctrico.
- En esquemas de planos paralelos se puede calcular la magnitud del campo eléctrico reducido. (E/P) (E-campo eléctrico, P-presión ambiente)

### Montaje de los electrodos

Se empleó un par de electrodos planos y paralelos, 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, mostrada en la Figura 1.1.



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

La altura relativa de los electrodos respecto a la boquilla del mechero ( $h$ .)

El parámetro de altura,  $h$ , se define como la distancia de la parte inferior del electrodo activo a la boquilla del mechero, tal como se muestra en los esquema de la Figura A-1. Las alturas empleadas fueron de 6.2, 7.0, 7.7, 9.2 y 12.0 cm.

Los electrodos anteriormente descritos están montados sobre dos placas paralelas de baquelita (Figura 1.1(a)) y son sujetos por medio de un juego de tornillos y tuercas. El par de baquelitas tienen un corte por el centro y a lo largo de ellas de tal forma que el tornillo que sujeta al electrodo pueda pasar entre la baquelita y desplazarse a lo largo de esta teniendo así libertad de ajuste de las alturas  $h$  requeridas (Figura 1.1.(b)).

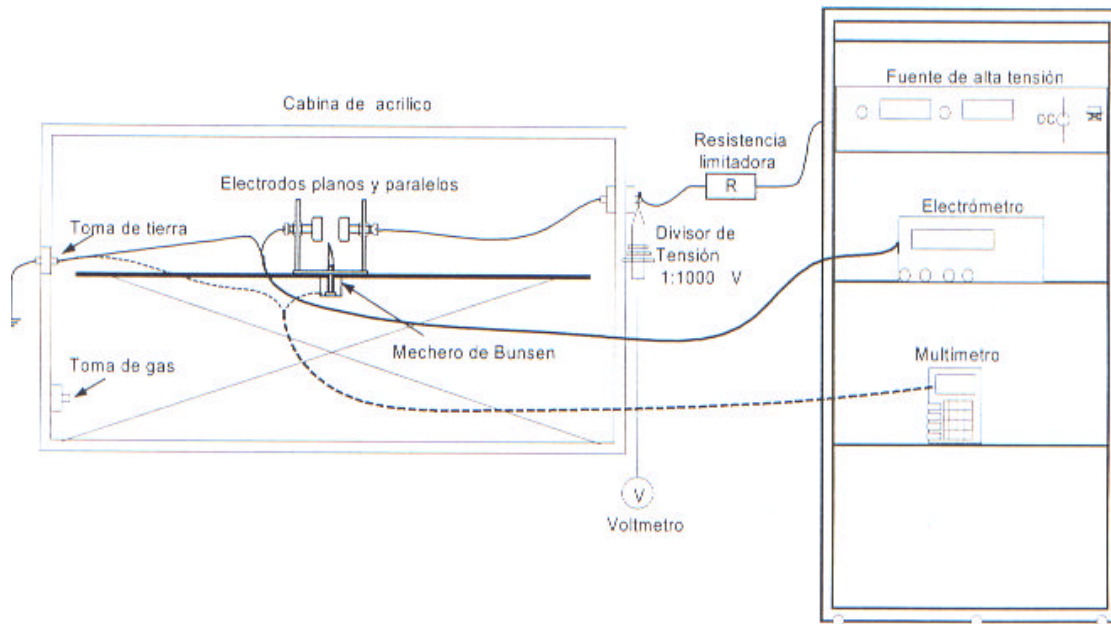
Para realizar los ajustes de separación  $d$  se utiliza la cuerda que tiene los tornillos y con la ayuda de un juego de tuercas se pueden fijar los electrodos a los requerimientos de separación  $d$  y altura  $h$ . Dichos montajes se ilustran en la Figura A-1.

Las baquelitas están sujetadas por una placa de lámina metálica, en la cual se tiene un corte en el centro de tal forma que permite el libre paso de la flama del mechero. El esquema electrodos-mechero está aislado por una cabina de acrílico, la cual sirve para evitar perturbaciones sobre la flama 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  $57\text{ M}\Omega$ , como protección de la fuente de voltaje.

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

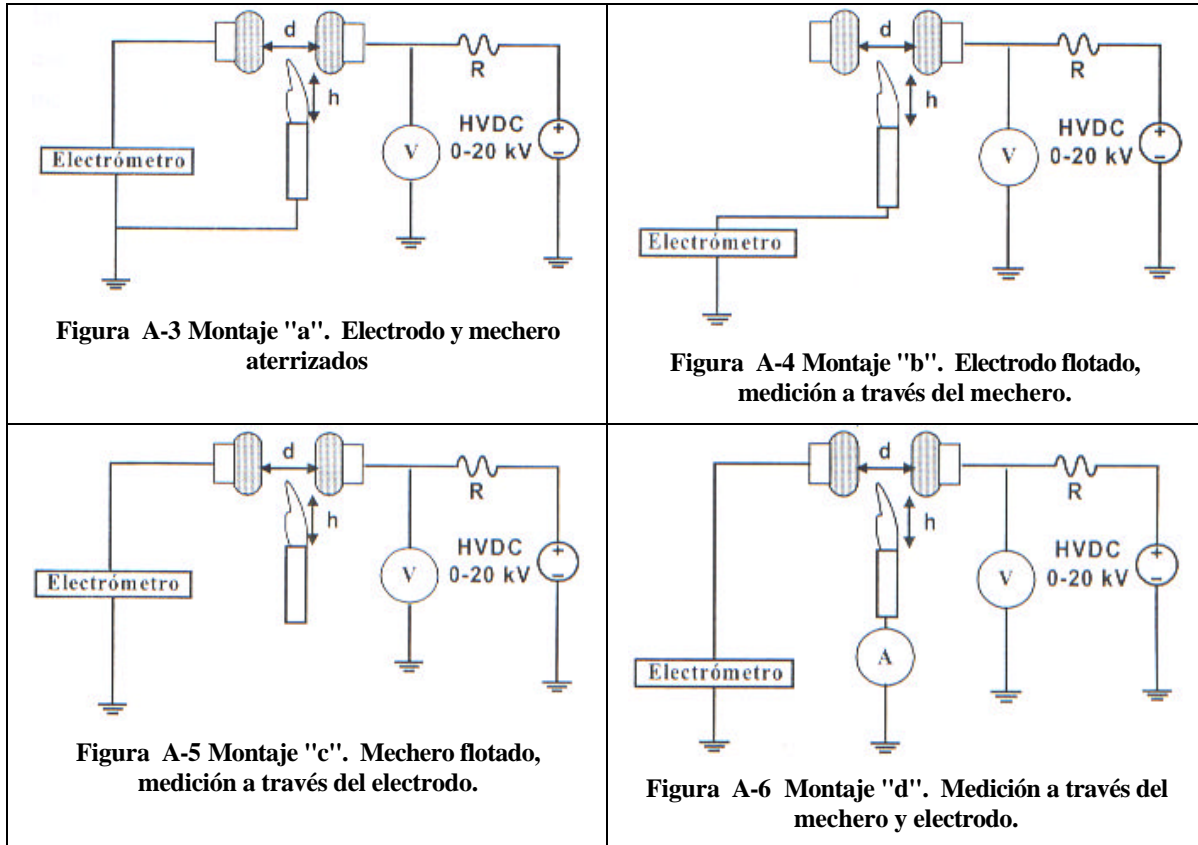


**Figura A-2 Esquema ilustrativo del montaje eléctrico**

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. En los casos en que se monitorea la corriente por el mechero, se intercambia la terminal que está conectada al electrodo de baja tensión a la parte metálica del mechero.

Por otro lado, cuando se monitorea, la corriente por el electrodo como en el mechero, se utiliza un multímetro Fluke en modalidad de miliamperímetro con el cual se registran los valores de corriente que pasan por el mechero, mientras el electrómetro registra la corriente que circula entre los electrodos.

Se presentan cuatro arreglos diferentes, mostrados en los incisos a, b, c y d de la Figura A-3 los cuales fueron utilizados para la determinación de curvas características corriente-voltaje (I-V). A continuación se describen los arreglos experimentales para la medición de corriente de descarga:



En el montaje "a" (ver Figura A-3) se analizan los efectos presentes al aterrizar tanto el electrodo como el mechero, para lo cual se monitorea la corriente que circula a través de los electrodos asociada a los niveles de tensión aplicada en el electrodo de alta tensión.

En el montaje "b" (ver Figura A-2) se analiza el efecto que se tiene al hacer circular la corriente por el mechero a través de la flama, esto para diferentes condiciones de separación  $d$  y altura  $h$ .

En el montaje "c" (ver Figura A-3) se analiza con mayor profundidad las mediciones eléctricas registradas, ya que en esta configuración no se tienen perturbaciones de campo eléctrico por elementos externos. De este montaje se desprende la mayor parte de los resultados.

Con el montaje "d" (ver Figura A-4) se analiza en forma cualitativa y cuantitativa los efectos de mantener aterrizado el mechero y para ello se realizaron mediciones simultáneas de corriente por el mechero y por el electrodo.

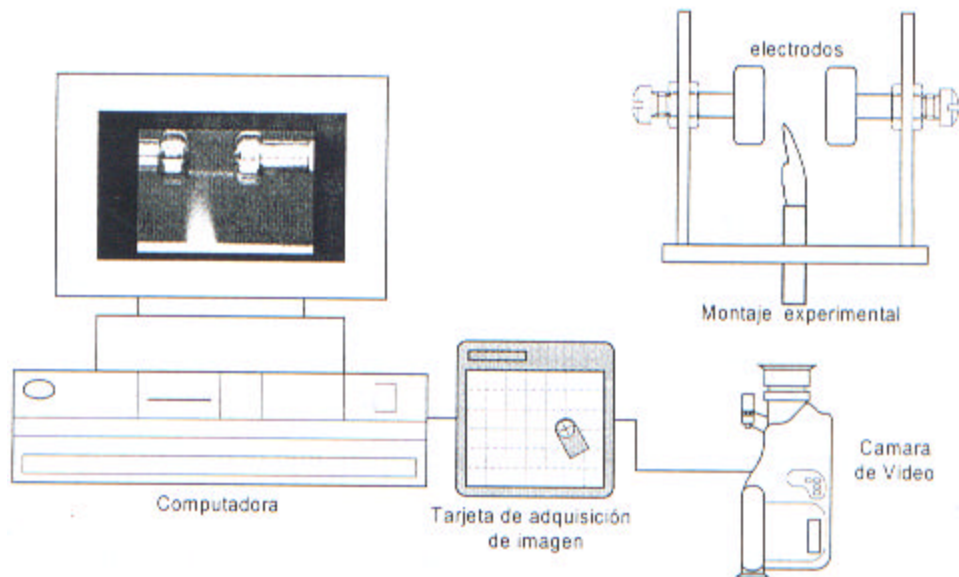
### Montaje para la adquisición de imágenes

Como un recurso adicional para el estudio del problema se utiliza un esquema de adquisición de imágenes, mostrado en la Figura A-4. Con esto es posible conseguir una serie de tomas estáticas de la descarga eléctrica (hasta 30 cuadros de imagen por segundo).

El sistema para la adquisición de imágenes consta de: (ver Figura A-4)

- Una videocámara
- Una tarjeta de adquisición de imagen
- Una computadora personal

El sistema opera de la siguiente manera. Primero se graba el evento de interés por medio de la cámara de video en cinta 8 mm. Para el tratamiento de vídeo se utilizó una tarjeta de adquisición de imagen, que digitaliza los fragmentos de vídeo más importantes empleando el software computacional Adobe premiere 4.2 y Adobe Photoshop 4.0, después se convierte la secuencia a un archivo de tipo film strip. En este nuevo archivo se encuentran los cuadros de imagen generados y de los cuales se pueden seleccionar las imágenes estáticas de mayor interés.



**Figura A-7 Esquema para la adquisición de imagen.**

Esta nueva información sirve para observar y analizar la trayectoria de la descarga eléctrica es decir, identificar parámetros de ocurrencia a incidencia de la descarga en las diferentes configuraciones eléctricas y asociar estos fenómenos a la teoría de la física de descargas.

Es esta configuración de adquisición la que será modificad para obtener dos planos de imágenes y tener así información suficiente para la reconstrucción 3D.



## Apéndice B CONTROLES ACTIVEX

### Introducción

Mientras que en el World Wide Web actualmente provee una forma de ver documentos a través del mundo, sus capacidades van a una distancia mas allá de una función. El compromiso de la red como un mecanismo para distribuir software va a conducir la creación de nuevas categorías de aplicaciones para el entretenimiento, auto-perfeccionamiento y todo tipos de comercio.

Los empresarios están persiguiendo estas oportunidades, estructurando los sitios de Internet que proveen a los usuarios finales una experiencia interactiva que atrae y retiene su "interés".

Muchas compañías también están explorando el uso de tecnologías basadas en red que proveen información interna y aplicaciones en software a sus empleados. Los empresarios pueden usar redes internas, también conocidas como *intranets*, para aplicaciones en áreas tales como, distribución de software, atención a clientes, recursos humanos y finanzas.

Microsoft ActiveX es un conjunto tecnologías que permite construir una aplicación de negocios para el Internet e intranets que corren a través de múltiples plataformas. Los desarrolladores pueden escribir tales aplicaciones usando lenguajes de programación como: C, C++ y Java™ y correr estas aplicaciones a través de plataformas, tales como la familia Microsoft Windows®, Macintosh® y UNIX. Adoptando Java y la tecnología de objetos OLE, ActiveX provee nuevas capacidades prometedoras de Internet e intranet mientras extiende y capitaliza en las inversiones de clientes existentes. Por ejemplo, un desarrollador corporativo puede crear una aplicación para recuperar información de sus clientes, escribiendo un applet en Java para la interfaz de usuario y usando funcionalmente de un componente de software ya existente que se conecte con una base de datos back-end.

Con ActiveX, los desarrolladores y programadores de redes pueden crear contenido interactivo con una amplia variedad de herramientas de docenas de vendedores de herramientas. ActiveX provee interacción sobre el cliente y el servidor entre el desarrollo de herramientas, herramientas autorizadas, productos de bases de datos y tecnologías de red. ActiveX adopta estándares de Internet y mueve el Internet mas allá de los documentos estáticos para proveer a los usuarios una mas

interactiva, excitante y provechosa experiencia. ActiveX da a los desarrolladores y programadores de red una poderosa plataforma para aplicaciones innovadoras sobre Internet, mientras mantiene sus inversiones en aplicaciones, herramientas y código fuente.

Con ActiveX, se obtienen los siguientes beneficios:

- **Los usuarios finales** aumentan las poderosas aplicaciones para el Internet e intranets con Internet Explorer
- **Los desarrolladores** pueden crear poderosas aplicaciones usando nuevas herramientas y lenguajes ya existentes.
- **Los programadores de red** pueden crear contenido importante para el Internet e intranets, usando herramientas sencillas y garantizando que sus contenidos alcanzan la audiencia completamente.

### ¿Que es ActiveX?

En los pasados años se ha visto un rápido crecimiento del Internet con un aumento en los números de personas que usan el World Wide Web para recuperar documentos. Al mismo tiempo, el costo de el servios personal de computadoras ha llegado a ser menos y menos caro, tendiendo a una revolución en productividad para empresarios y particulares.

ActiveX combina los beneficios de el World Wide Web y la computadora personal para habilitar las aplicaciones interactivas distribuidas y las poderosas comunicaciones entre los usuarios

ActiveX también dirige los problemas de los empresarios que están buscando cada vez mas, el uso de tecnologías basadas en Internet para aplicaciones internas en áreas, tales como: distribución de software, atención a clientes, recursos humanos y finanzas. Estas aplicaciones requieren una "plataforma" que provea a los desarrolladores de aplicaciones un conjunto de herramientas interoperacionales y componentes conectados con una capacidad de red robusta para habilitar la comunicación fluida con los recursos de Internet.

Microsoft ActiveX es una integración de plataforma abierta, que provee a los desarrolladores y productores de red la mas rápida y fácil forma de crear aplicaciones interactivas y contenido para el Internet e intranets.

### Controles ActiveX

Los controladores ActiveX, anteriormente llamados controladores OLE, son elementos estándares para la interfaz de usuario que reúne formas y cuadros de dialogo rápidamente. Los controladores ActiveX también brindan un Internet viviente, agregando un compendio de nueva funcionalidad para las paginas de Internet.

Visual Basic se ha destacado por su variedad de controladores que pueden ser usados en las aplicaciones. Ahora se pueden crear los propios controladores, por el uso de Visual Basic y otras herramientas de desarrollo.

Diseñar un controlador de ActiveX puede ser tan fácil como diseñar una forma de Visual Basic, se puede usar los comandos gráficos de Visual Basic para crear un grupo de controladores usando los controladores ya existentes.

Los controladores ActiveX pueden ser depurados en el proceso, por lo que se puede pasar directamente desde el código de la forma de prueba en el código de el controlador de proyecto de ActiveX.

Se puede agregar la unión de datos a el controlador de Visual Basic ActiveX, de tal forma que se pueden fácilmente unir los campos individuales adentro del controlador de los campos de propiedades en una base de datos o otros datos fuente. También se puede usar la unión de datos para crear un controlador ActiveX que otros controladores pueden unirlo, similar a el controlador de datos de Visual Basic.

Con Visual Basic es fácil crear paquetes de controladores ActiveX perfeccionados por medio de paginas de propiedad, nombre de constantes y eventos de los controladores.

Se pueden compilar los controladores de ActiveX directamente de los ejecutables de la aplicación o de los archivos .ocx que pueden ser usados con el desarrollo de herramientas tales como Visual Basic y Microsoft Visual C++, con productos de usuario final tales como Microsoft Office, y sobre el Internet.

Para más información ver tópicos y tutoriales para el desarrollo de controles ActiveX, en la biblioteca de la red de desarrollo de Microsoft (MSDN, por sus siglas en inglés)

## Apéndice C GRAFICACIÓN 3D

### Sistemas de Coordenadas

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 muestra los dos sistemas de coordenadas.

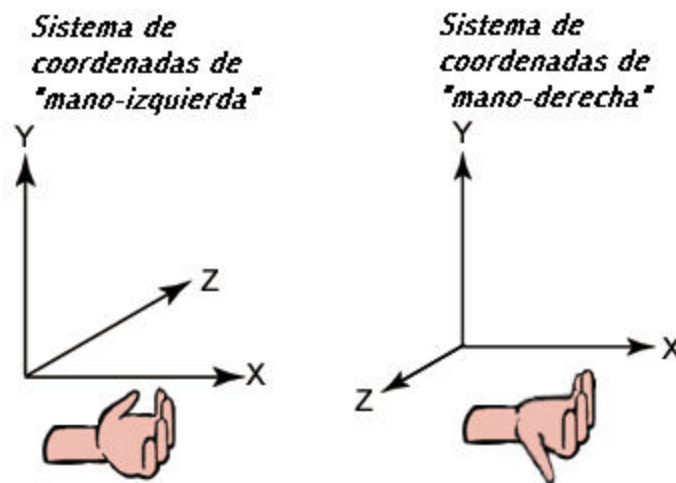


Figura C-1 Tipos de sistemas de coordenadas

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 está definido como positivo a cualquier eje ( $x$ ,  $y$  o  $z$ ) que vaya en dirección hacia el observador. El sistema coordenado de la mano izquierda está definido como positivo a cualquier eje ( $x$ ,  $y$  o  $z$ ) que vaya en dirección opuesta al observador. Si se está 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.

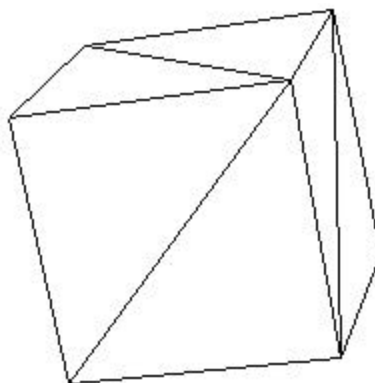
Cuando se combinan estas operaciones, los resultados no son conmutativos, el orden en que se multiplican las matrices es muy importante.

### **Primitivas 3-D**

Una primitiva 3-D es un conjunto de vértices que forma una entidad 3-D simple. La primitiva más simple es un conjunto de puntos en un sistema de coordenadas 3-D, el cual es llamado un punto de lista.

Frecuentemente, las primitivas 3-D son polígonos. Un polígono es una Figura 3-D cerrada delineada por al menos tres vértices. El polígono más simple es un triángulo. Microsoft® Direct3D® usa triángulos para componer muchos de los polígonos porque todos los vértices en un triángulo son garantizados a ser coplanares. Tener vértices no coplanares es ineficiente. Se pueden combinar triángulos para formar polígonos grandes y complejos así como mallas.

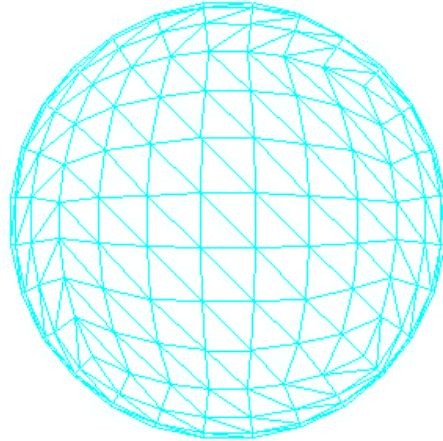
La siguiente ilustración muestra un cubo. Dos triángulos forman cada cara del cubo. El conjunto de las formas de los triángulos forman un cubo primitivo. Se pueden aplicar texturas y materiales para las superficies de las primitivas para hacer parecer una única forma de sólido.



**Figura C-2 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-3 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').

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

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

$$\begin{aligned}x' &= (x \times M_{11}) + (y \times M_{21}) + (z \times M_{31}) + (1 \times M_{41}) \\y' &= (x \times M_{12}) + (y \times M_{22}) + (z \times M_{32}) + (1 \times M_{42}) \\z' &= (x \times M_{13}) + (y \times M_{23}) + (z \times M_{33}) + (1 \times M_{43})\end{aligned}$$

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 ejemplo de matrices, la letra griega theta ( $\theta$ ) 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 si. 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 M1 hasta Mn 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, Ry es una matriz para rotación sobre el eje y, y Tw 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.

Transformación de mundo

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.



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

### **Configurando una matriz de mundo**

Al que con cualquier otra transformación, uno puede crea 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 efecto. 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 básico de la transformación de vista y provee los detalles de cómo configura una matriz de transformación de vista.

#### **¿Qué es una transformación de vista?**

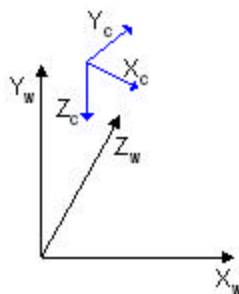
La transformación de vista posiciona al observador en el espacio del mundo, transformando los vértices en el espacio de la cámara. En el espacio de cámara, la cámara, u observador, está en el origen, viendo en la dirección de z positivamente. La matriz de vista reposicionar los objetos

en el mundo alrededor de la posición y orientación de la cámara (el origen del espacio de cámara).

Hay muchas formas de crea la matriz de vista. En todos casos, la cámara tiene alguna posición lógica y orientación en el espacio del mundo que es usada como posición de inicio para crea 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.

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

En esta formula, V es la matriz de vista a ser cread. T es la matriz de traslación que reposicionar 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.



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- $n$  describen la orientación de los ejes de coordenadas para el espacio de la cámara in 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- $n$ , 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 el ladearse.

## Apéndice D DETALLES DE LA IMPLEMENTACIÓN

Como se aprecia del capítulo 2, en las secciones 2.2 y 2.3, "Procesamiento de Imágenes" y "Reconstrucción Tomográfica", respectivamente, los algoritmos se han expresado, en su mayoría, como reglas de pertenencia a conjuntos. Esto ha sido así, ya que el producto final, el modelo de la reconstrucción tomográfica, es en sí una "gráfica" y mucha de la teoría de gráficas se encuentra definida en terminología de conjuntos.

Ahora bien, la definición de los algoritmos en términos de conjuntos no se obtuvo de ningún libro, sino que por el contrario, durante el desarrollo de la tesis, y una vez que se implementaron los algoritmos se buscó una forma de definirlos de forma resumida y que reflejara toda su funcionalidad, por lo que se optó en representarlos a través de conjuntos.

Sin embargo, las definiciones en conjuntos no se traducen directamente a un lenguaje de programación como C++, ya que un conjunto al ser una agrupación de elementos no ordenados, no se puede implementar directamente en el lenguaje de programación, y cuando se hace a través de una estructura de datos, aún cuando intente reflejar elementos no ordenados siempre habrá un ordenamiento implícito (por el simple hecho de que los bloques de memoria son accedidos secuencialmente).

Este ordenamiento implícito bien puede ser una ventaja ó una desventaja, dependiendo de la operación que se intente realizar sobre el "conjunto", sin embargo, toda operación requiere cierta cantidad de cómputo ya que el simple hecho de encontrar un elemento en el conjunto, equivale a realizar una búsqueda sobre todos sus elementos.

En el caso de Retodeel, los conjuntos principales que son usados para la implementación de los algoritmos son:

1. Conjunto para cada imagen de trabajo que representa los píxeles de la misma, con su coordenada (X,Y) y su valor RGB (componentes Rojo, Verde y Azul).
2. Conjunto para cada imagen resultante de cada una de las etapas del procesamiento de las imágenes.
3. Conjunto de vértices para el modelo 3D, cada vértices tiene su valor de coordenada X, Y y Z.
4. Conjunto de segmentos que unen los vértices en el modelo 3D, cada segmento tiene una referencia a los vértices de sus extremos.

Nota: Estos conjuntos, se han implementado como estructuras de datos orientadas a objetos del tipo de listas dinámicas sencillamente ligadas. Para más detalles, favor de consultar el código ó cualquier bibliografía relacionada con "Estructuras de Datos" y "Programación Orientada a Objetos"

# **Artículo 1 “Reconstrucción Tomográfica 3D de Descargas Eléctricas”**

## Artículo 2 “3D Reconstruction of a Spark Discharge”