

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROCESAMIENTO DE IMAGEN DEL ESPECTRO DE DIFRACCIÓN DE
ELECTRONES

POR

EDSON EDGARDO SAMANIEGO PANTOJA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

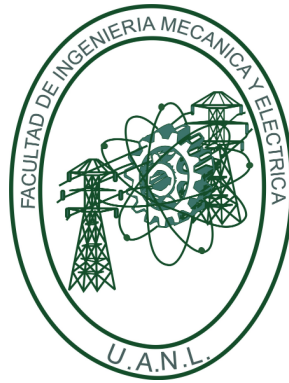
CON ORIENTACIÓN EN NANOTECNOLOGÍA

AGOSTO 2022

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



PROCESAMIENTO DE IMAGEN DEL ESPECTRO DE DIFRACCIÓN
DE ELECTRONES

POR

EDSON EDGARDO SAMANIEGO PANTOJA

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CON ORIENTACIÓN EN NANOTECNOLOGÍA

AGOSTO 2022

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis “PROCESAMIENTO DE IMAGEN DEL ESPECTRO DE DIFRACCIÓN DE ELECTRONES”, realizada por el alumno Edson Edgardo Samaniego Pantoja, con número de matrícula 2081741, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Nanotecnología.

El Comité de Tesis

Dr. Virgilio Ángel González González

Co-Asesor

Dra. Satu Elisa Schaeffer

Co-Asesora

M. C. Nombre Apellido1 Apellido2

Revisora

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, agosto 2022

escribir aquí la dedicatoria

RESUMEN

Edson Edgardo Samaniego Pantoja.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Nanotecnología.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: PROCESAMIENTO DE IMAGEN DEL ESPECTRO DE DIFRACCIÓN DE ELECTRONES.

Número de páginas: 29.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de este trabajo es el desarrollar un programa en Python que pueda analizar automáticamente muestras de difracción de electrones ubicando los spots y sus distancias interplanares para determinar los índices de Miller comparándolo con tarjetas obtenidas del difractor de rayos x y evaluar su precisión.

Firma de los asesores:

RESULTADOS:

Dr. Virgilio Ángel González González

Asesor

Dra. Satu Elisa Schaeffer

Co-asesora

ABSTRACT

Fulano de Tal.

Candidate for obtaining the degree of Master in Engineering with Specialization in
Systems Engineering.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Title of the study: INCREDIBLE STUDY.

Number of pages: 29.

OBJECTIVES AND METHODS:

Signature of supervisors:

RESULTS:

Dr. Virgilio Ángel González González

Asesor

Dra. Satu Elisa Schaeffer

Co-asesora

ÍNDICE GENERAL

Resumen	v
Abstract	vii
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	3
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivos específicos	3
1.3. Estructura de la tesis	4
2. Marco teórico	6
2.1. Interacción del electrón con materia	7
2.2. Difracción y ley de Bragg	9
2.3. Espacio recíproco	9
2.3.1. Red recíproca	9
2.4. Índices de Miller	9

2.5. Muestras en TEM	9
2.5.1. Plata (Ag)	9
2.5.2. Oro (Au)	9
2.5.3. Oxido de hierro 3	9
2.6. Transformada de Hough	9
2.7. Regresión polinomial	9
2.8. Gradiente	9
2.9. Herramientas computacionales	9
3. Antecedentes	10
3.1. Determinación del patrón de difracción	10
3.2. Eliminación ruido por gradiente	12
3.3. Hough para detección en difracciones	12
4. Metodología	13
4.1. Preparación de muestras	14
4.1.1. Tem condiciones	14
4.1.2. Obtención de nanoparticulas	14
4.2. Código	14
4.2.1. Detección de centro del haz	14

ÍNDICE GENERAL	x
4.2.2. Caja bigote y anomalías	21
4.2.3. Ruido por gradiente	21
4.2.4. Análisis de spots	22
4.2.5. Reconocimiento de caracteres y escala	22
4.3. Tarjetas de difracción de rayos X	22
5. Resultados	23
6. Conclusiones	24
6.1. Contribuciones	24
6.2. Trabajo a futuro	24
Bibliografía	25
A. Información complementaria	27
B. Otro apéndice complementario	28

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Difracción de plata	2
3.1. Secuencia patrón de difracción	11
4.3. Ruido gaussiano	17
4.4. Detección de bordes	18
4.5. Filtro dilatación aplicado	19
4.6. Detección de contornos	19
4.7. Circunferencia analizada	20

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el campo de la nanotecnología y ciencia en materiales es muy común y necesario realizar trabajos con el microscopio electrónico de transmisión (*TEM* por sus siglas en inglés) y uno de sus modos es el de difracción el cual estudia la estructura cristalina de los solidos haciéndolo uno de los métodos más importantes para la obtención de información cristalográfica acerca de los materiales [2].

La difracción de electrones consiste en un haz de electrones que atraviesa una muestra delgada del material a estudiar, los electrones tendrán interacción mediante fuerza eléctrica con los átomos de la muestra produciéndoles una dispersión, en la estructura periódica de un solido cristalino tiene la función como una rejilla de difracción haciendo que los electrones sean dispersados de forma predecible [1]. Los haces difractados son enfocados y forman un patrón de difracción resultante que puede ser observado en una pantalla fluorescente o en forma digital como lo muestra la figura 1.1.

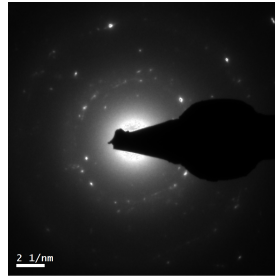


Figura 1.1: Muestra de difracción tomada por Ángel Virgilio en el CIIDIT [3]

Las imágenes de patrones de difracción son interpretadas de manera que se miden los haces difractados a el centro del haz obstruido por un paro de haz, obteniendo un radio que es necesario para determinar a que plano cristalográfico pertenece y así determinar cada plano para poder formar la red cristalina del material.

Para eso Python resulta una herramienta de programación adecuada de manera que facilita el análisis de imágenes en las que se pueden obtener datos importantes, histogramas de intensidad, contornos, etc. Para eso es desarrollado un programa con cualidades como poder leer la imagen de difracción de electrones extraída del microscopio electrónico de transmisión y primeramente ubicar de manera automática el centro donde impacta el haz de electrones ya que este es cubierto por una punta que tiene como objetivo cubrir que la muestra sea irradiada en exceso y no sea posible visualizar los puntos difractados, lo cual dificulta en la actualidad ubicar el centro del haz para centrar los puntos y anillos difractados de manera manual.

Se facilita la manera en que se hacen las mediciones del centro del haz a cada punto difractado debido a que comúnmente al hacerlo manual existe un desfase del centro lo cual a esa escala nanométrica provoca una diferencia de la medida esperada, el software analiza mediante análisis de histogramas, intensidades y búsqueda de contornos que tiene como objetivo el encontrar en instancias imperfectas de objetos, una clase de formas o figuras mediante un procedimiento, con esto resulta fácil detectar líneas, elipses y círculos.

1.1 HIPÓTESIS

Es posible mediante un procesamiento de imagen utilizando el software Python [6], obtener contornos por intensidades del haz de electrones, círculos y centros por la transformada de Hough (capítulo 2) y distancias precisas a nivel píxel (capítulo 2), aunado a esto estadísticamente posible comprobar una mejor exactitud y precisión para analizar imágenes de muestras de la difracción de electrones y realizar más rápido el proceso.

1.2 OBJETIVOS

Se busca el desarrollo de un programa automático capaz de analizar las imágenes de difracción de electrones de materiales con estructura cristalina, enfocado en la rapidez y mejor precisión para la medición de las distancias entre cada spot difractado mejorando la manera de analizar, a diferencia otros programas utilizados comúnmente para la determinación de los índices hkl.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener muestras del TEM para tener variantes de muestras y ver el proceso.
- Utilizar el histograma (capítulo 2.9) de la imagen para trabajar con datos de intensidad que arroje dicho gráfico.
- Determinar estadísticamente el centro del haz de electrones (obstruido) variando el rango de intensidad.
- Eliminar el ruido de fondo de la imagen.

- Ubicación de la red periódica (capítulo 2.3.1) que forman los spots difractados para su posterior análisis y obtención de su coordenada central
- Determinación de spots difractados contorno y centro.
- Medir la distancia entre el centro del haz núcleo y el centro de cada spot difractado como distancia euclidiana y guardar en una lista.
- Ubicar la zona donde aparece la escala e identificar caracteres mediante reconocimiento automático.
- Realizar la conversión de cada distancia euclidiana a la escala real.
- Consultar las tarjetas (JCPDS) ya reportadas (capítulo 4.3) para comparar la precisión y obtener los índices hkl.
- comparacion y obtención del rango de error que se tiene.

1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis se conforma inicialmente por el primer capítulo el cual trata en términos generales de en donde se aplica la difracción de electrones, qué aporta de conocimiento en nanotecnología, funcionamiento e interpretación de las imágenes, así como por parte del software Python [6], lo que se realizo a grandes rasgos.

En el capítulo dos el marco teórico trata de la explicación del fenómeno, la ley que lo fundamenta y todo concepto teórico, así como el tipo de microscopio utilizado y las nanoparticulas que se emplean para las difracciones tomadas. Por parte del software se explican las funciones mas importantes en detección y métodos que se utilizaron para solucionar criterios de la imagen.

Para el tercer capítulo se hablan de los antecedentes ya reportados o mencionados que son desarrollados en programas similares y se enfoca en el procesamiento que se utilizara mas adelante.

El cuarto capítulo contiene la secuencia de como se realizo el estudio y análisis computacional de este trabajo, desde la obtención de las muestras hasta la explicación de cómo se realizó el código y sus funciones.

Los resultados son mencionados en el capítulo cinco donde se reporta lo obtenido en base al código y la comparativa entre los datos de la información ya reportada por muestras de un difractometro de rayos x.

Y para finalizar el capítulo seis se tratan las conclusiones a las que se llevo tanto si el código resulta como herramienta para analizar estas muestras y que contribuciones aporta.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

El tema de difracción se fundamenta principalmente en la teoría de la mecánica cuántica respecto a los electrones que pueden considerarse como partículas u ondas. Los electrones se usan en TEM por su longitud de onda que es más corta que la luz visible, debido a esto se alcanza mayor magnificación con este microscopio. La longitud de onda esta dada por la ecuación de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (2.1)$$

donde h refiere a la constante de Plank y para p el momento del electrón, dichos electrones que son emitidos en el TEM se aceleran variando el voltaje y se enfocan mediante lentes a el objetivo (muestra). La muestra en la que son enfocados los electrones suele tener espesores entre cien y trescientos nanómetros para posteriormente ser magnificado por una lente electromagnética. La aceleración del electrón depende del voltaje aplicado que por lo regular son entre 100000 eV y 400000 eV [2].

2.1 INTERACCIÓN DEL ELECTRÓN CON MATERIA

Cuando el haz acelerado de electrones es transmitido a través de la muestra, se generan interacciones tales como ionización, emisión secundaria y excitación con pérdida de energía [2], pero una interacción importante para este fenómeno que ocurre en el TEM es la fuerza eléctrica o interacciones electrostáticas por la ley de Coulomb, debido a que un electrón tiene carga negativa al pasar por la muestra estos sufren interacción por la carga positiva del núcleo del átomo por el cual pase cercano y también efecto por la nube de electrones que rodean al átomo. Las interacciones que se dan entre electrón muestra producen una gama de señales secundarias y muchas de estas se utilizan para analizar información química y otros detalles de la muestra [7].



2.2 DIFRACCIÓN Y LEY DE BRAGG

2.3 ESPACIO RECÍPROCO

2.3.1 RED RECÍPROCA

2.4 ÍNDICES DE MILLER

2.5 MUESTRAS EN TEM

2.5.1 PLATA (Ag)

2.5.2 ORO (Au)

2.5.3 ÓXIDO DE HIERRO 3

2.6 TRANSFORMADA DE HOUGH

2.7 REGRESIÓN POLINOMIAL

2.8 GRADIENTE

2.9 HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

CAPÍTULO 3

ANTECEDENTES

Programas para el análisis de los patrones de difracciones ya existen y se siguen reportando, donde utilizan distintas maneras de abordar el tema el cual es encontrar como indexar cada spot u anillo encontrado solo que sigue siendo de manera no automática ya que se siguen ingresando muchos datos manualmente o dando modelos ya reportados para describir el patrón del material a revisar.

3.1 DETERMINACIÓN DEL PATRÓN DE DIFRACCIÓN

Tal es el caso reportado por Shenck y Philippsen [8] donde se crea una plataforma con módulos independientes implementados en Python donde la mejora es en velocidad de procesamiento ya que los algoritmos de imágenes de bajo nivel se implementan en C++. Al programa se accede desde una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés), para primeramente de forma manual definir una forma poligonal de contorno del paro de haz utilizado para no irradiar la muestra, la forma se describe seleccionando uno de los patrones que se tiene de plantilla, posteriormente se hace la búsqueda de la red para cada patrón de difracción en función de picos dados por las intensidades de cada punto de la red. En cuanto a mejorar la veloci-

dad del análisis de datos los autores emplean para los algoritmos que consumen más tiempo (revisión de todo el patrón y ajuste) la paralelización obteniendo un mejor rendimiento [8].

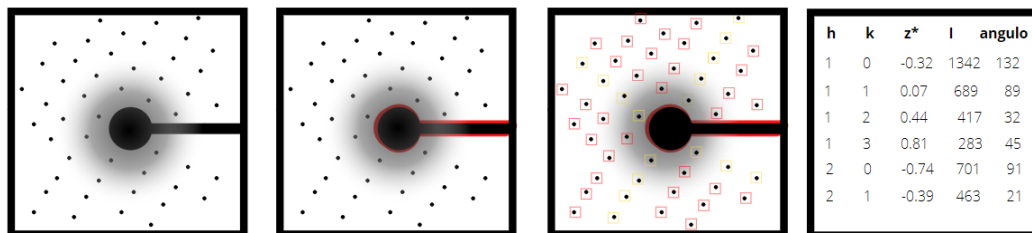


Figura 3.1: Secuencia de obtención de patrón de difracción.

Por otro lado un complemento del programa **ImageJ** llamado **EXTRAX** se desarrolla como un código de dominio publico basado en **Java** para procesar y analizar estas imágenes y medición de intensidades de patrones de difracción con una ubicación de pico semiautomática basada en una red bidimensional proporcionada por el usuario lo cual favorece la facilidad del análisis pero a su vez sigue siendo retroalimentada por el usuario. Para la interfaz presentada se le necesitan acceder datos para su funcionamiento tales como el área de selección de cada punto de difracción, la resta del fondo en caso de mucho ruido en la imagen, la conversión manual de la distancia entre píxeles a ángstroms (\AA). La ubicación de los puntos difractados para redes periódicas se hace seleccionando con el cursor dando clic sobre tres puntos no alineados que pertenezcan a spots, y en base a ellos en cada sección de la red se analiza y ajusta la posición de estos puntos seleccionados para que coincidan con el máximo ponderado calculado a partir de píxeles dentro del área de selección y teniendo en cuenta el paso. Sobre la base de estas tres reflexiones indexadas, se genera una red bidimensional para toda la imagen con una indexación automática de puntos, obteniendo resultados que permite la indexación semiautomática de los patrones de difracción de electrones así reporta Dorcet [5].

3.2 ELIMINACIÓN RUIDO POR GRADIENTE

Para este trabajo analizan difracciones de electrones retro dispersados, dichas difracciones comprueban que se pueden descomponer en un patrón de difracción y un fondo suave representado como un gradiente, es muy común el método de corrección de fondo para los patrones de electrones retro dispersados de manera que resuelve la relación de señal-ruido haciendo la división y resta entre estos dos. Es propuesto y desarrollado un algoritmo de ajuste polinomial para obtener patrones de difracción mas limpios para aplicaciones en materiales con problemas de recubrimiento [9]. La calidad de los patrones tiene una influencia significativa en el rendimiento del procesamiento de indexación.

3.3 HOUGH PARA DETECCIÓN EN DIFRACCIONES

Se realiza la localización de los centros del anillo. vía una transformada de Hough, que puede ser intensiva en memoria computacional en modo completamente automático. El mismo autor presenta una herramienta para el análisis de patrones de difracción puntual empleando un promedio circular centrado en uno de los puntos de difracción. Este es un enfoque muy rápido y elegante, que reduce a uno el número de puntos localizados por el usuario. Por otro lado, es muy sensible a la localización del punto central [4].

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

En este capítulo se explica la metodología utilizada tanto en el proceso y obtención de las nanopartículas y preparación del microscopio para analizar dichas muestras así como también el código desarrollado para el estudio del difractograma obtenido y su posterior comparación con tarjetas ya reportadas por el difractor de rayos X.

4.1 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

4.1.1 TEM CONDICIONES

4.1.2 OBTENCIÓN DE NANOPARTICULAS

4.1.2.1 PLATA

4.1.2.2 ORO

4.1.2.3 ÓXIDO DE HIERRO

4.2 CÓDIGO

Esta sección menciona paso a paso como se fue analizando la muestra y que funciones son las utilizadas para optimizar el proceso de imagen y obtención de datos. El programa es desarrollado en el software Python version 3.9 en un ordenador con Windows 11 y procesador tipo Intel(R) Core(TM) i5-8250U CPU @ 1.60GHz 1.80 GHz y 8GB de RAM a 64 bits.

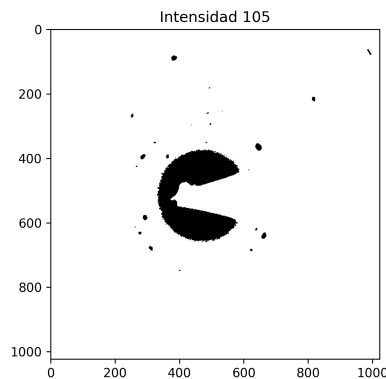
4.2.1 DETECCIÓN DE CENTRO DEL HAZ

La detección del centro de haz se dificulta en el análisis debido a que puede ocasionar un desfase, ya que esta obstruido por un paro de haz que es utilizado para

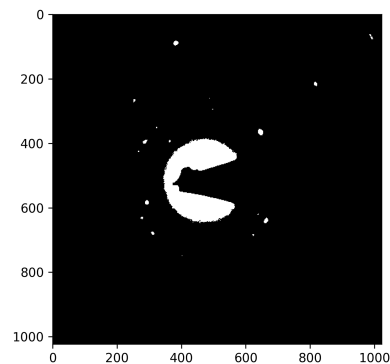
que la imagen no sea irradiada por exceso de luz, y es por eso que esta irradiación ya obstruida es utilizada para crear una circunferencia y encontrar el píxel central y a su vez variar dependiendo la intensidad seleccionada (esto dentro de un ciclo de varias intensidades) esta variación permite obtener un muestreo de muchos centros calculados y tratarlos estadísticamente.

4.2.1.1 RANGO DE INTENSIDAD

El rango de intensidad en cada ciclo se analiza con una de las funciones que cuenta OpenCv la cual se llama `threshold` en la que como argumentos se ingresa la imagen original convertida a escala de grises y el segundo valor es un umbral que es tomado de la intensidad a procesar.



(a) Binariza umbral 105.

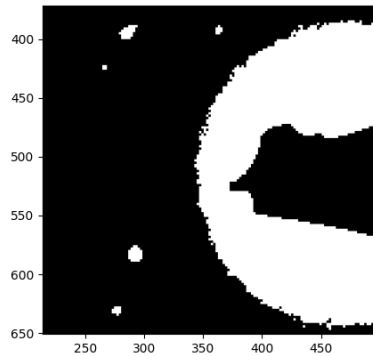


(b) Imagen en negativo

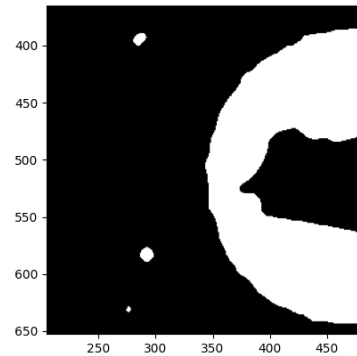
4.2.1.2 FILTRO DE MEDIANA

El filtro media consiste en eliminar imperfecciones de la imagen pero que a su vez mantiene la estructura intacta sin afectar los bordes, toma una mediana de todos los píxeles debajo del área del kernel y reemplaza el elemento central con este valor

medio. Ideal para eliminacion de pequeños ruidos o agrupaciones de pixeles extra en la imagen.



(a) negativo



(b) filtro de media

4.2.1.3 RUIDO GAUSSIANO

Un método de tratamiento de imágenes o mejoramiento para ciertos aspectos es el filtro gaussiano este es un desenfoque básico que funciona definiendo un kernel de $n \times n$ y al aplicarse el kernel a cada píxel lo que hace promedia el resultado de sus píxeles vecinos dentro del kernel lo que da un resultado una imagen borrosa dependiendo el tamaño de la vecindad dada(kernel). Retomando el código una vez que se tiene la imagen binarizada por el umbral dado entonces procede a la aplicación de un ruido gaussiano que tiene como fin el de amortiguar los picos en la silueta circular que se forma con la intensidad binarizada haciéndolos borrosos ligeramente. Lo cual beneficia y facilitara la lectura de la siguiente función.

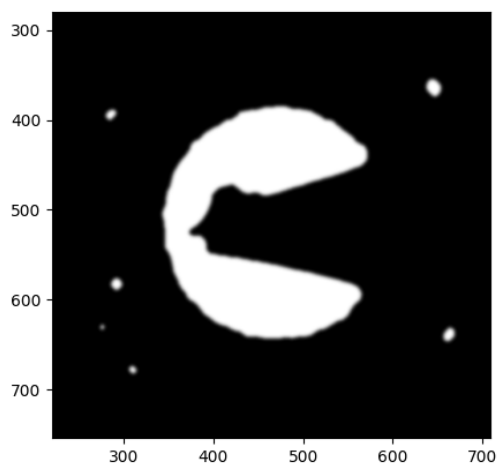


Figura 4.3: Ruido gaussiano.

4.2.1.4 DETECCIÓN DE BORDES

La función `canny` en `open cv` ayuda para el procesamiento de la imagen cuando se quieren encontrar bordes de objetos, el filtro se basa en direcciones y resoluciones diferentes, minimiza los bordes falsos, y en precisión entrega un píxel de ancho de borde. En el programa la imagen con el filtro gaussiano la lee la función `canny` que recibe tanto la imagen como también dos valores que serán el umbral de la histeresis para detectar el borde.

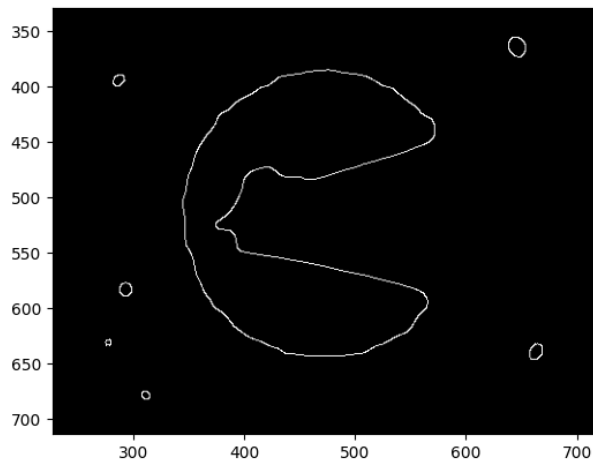


Figura 4.4: Detección de bordes

Al pasar por la función de bordes una cantidad de ellos no están cerrados como para poder obtener un contorno único y para eso la siguiente función aplica.

4.2.1.5 FILTRO DILATACIÓN

Una operación o filtro morfológico como lo es la función dilatación tiene como propósito el aumentar los límites de las regiones de cada píxel. En pocas palabras es la adición de píxeles del mismo color alrededor de uno según los parámetros indicados en base a un kernel Open cv tomara dos entradas para esta función el cual es la imagen de entrada y el siguiente sera un elemento estructurante o núcleo el cual va a decidir la naturaleza de la operación.

Los bordes que se encontraban abiertos con la función dilate, une estas secciones abiertas que simulen una morfología de elipse tal como es indicado en la función del elemento estructurante y dando un kernel de dimensiones 9x9 para que haga la unión de una vecindad mas grande.

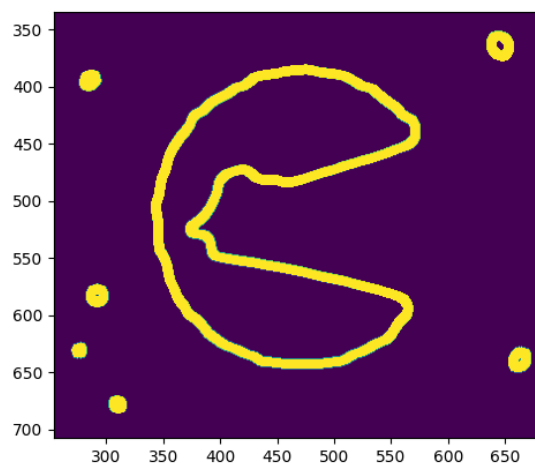


Figura 4.5: Filtro dilatación aplicado

4.2.1.6 DETECCIÓN DE CONTORNOS

FindContours de open cv recibe una imagen previamente procesada mediante filtros que limpian la imagen para poder hacer una detección limpia de contornos de figuras abstractas

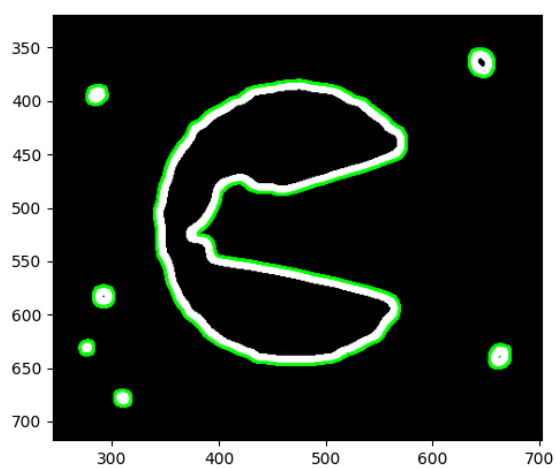


Figura 4.6: Detección de contornos

4.2.1.7 CIRCUNFERENCIAS MEDIANTE HOUGH

Ahora para el final de la detección del centro del haz se aplica a la imagen la transformada de Hough utilizando la función `HoughCircles` la cual se le dan parámetros como la imagen de entrada desenfocada para reducir círculos falsos, `HOUGH-GRADIENT` el que define el método de detección, una distancia mínima en detección de centros de círculos, `param1`, Umbral superior para el detector interno de bordes Canny, `param2` Umbral para la detección del centro, y de los mas importantes, el mínimo radio de circunferencia así como el máximo para limitar los círculos que llegan a detectarse. La función arroja una circunferencia apartir de un contorno imperfecto que estima según la transformada explicada en el capítulo 3 el mejor círculo se muestra con todo y el centro único a nivel píxel.

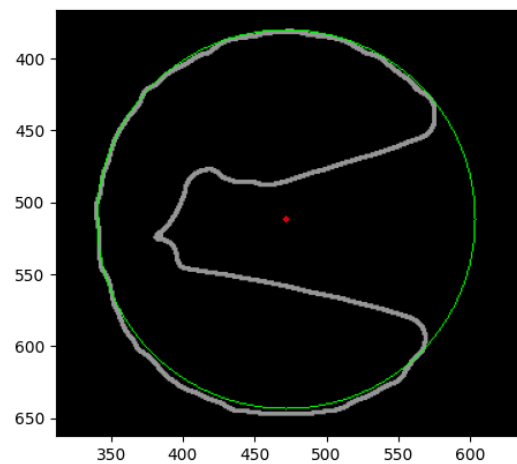


Figura 4.7: Círculo encontrado y centro

4.2.2 CAJA BIGOTE Y ANOMALÍAS

4.2.2.1 ELIMINACIÓN DE ANOMALÍAS

4.2.3 RUIDO POR GRADIENTE

aquí se toma el ruido parásito como...

4.2.3.1 CURVA DE INTENSIDAD

la curva es generada de manera...

4.2.3.2 AJUSTE POR REGRESIÓN POLINOMIAL

la regresión polinomial que es utilizada...

4.2.3.3 PICOS DE CURVA

dichos picos que se generan.

4.2.3.4 CREACIÓN DE GRADIENTE

la creación de este gradiente es para...

4.2.4 ANÁLISIS DE SPOTS

4.2.4.1 CENTRO DE CADA SPOT

4.2.5 RECONOCIMIENTO DE CARACTERES Y ESCALA

4.3 TARJETAS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Las tarjetas ya reportadas que son obtenidas del difractor de rayos X son utilizadas para comparar los resultados de los spots encontrados pero primero son procesadas en python para poder leerlas y extraer la información requerida que son la tabla de picos donde encontramos la distancia interplanar y los índices de Miller hkl .

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

6.1 CONTRIBUCIONES

6.2 TRABAJO A FUTURO

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Leonid A Bendersky and Frank W Gayle. Electron diffraction using transmission electron microscopy. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(6):997, 2001. doi: 10.6028/jres.106.051.
- [2] Williams D. & Carter C. *Transmission Electron Microscopy A Textbook for Materials Science*, volume 5. Springer Science & Business Media, 1999. ISBN 978-0-387-76500-6.
- [3] *CIIDIT*. Centro de innovación, investigación y desarrollo en ingeniería y tecnología, 2015. URL <http://ciidit.uanl.mx/>.
- [4] Shawn P Coleman, Mehrdad M Sichani, and Douglas E Spearot. A computational algorithm to produce virtual x-ray and electron diffraction patterns from atomistic simulations. *Jom*, 66(3):408–416, 2014. doi: 10.1007/s11837-013-0829-3.
- [5] V Dorcet, X Larose, C Fermin, M Bissey, and P Boullay. Extrax: an imagej plug-in for electron diffraction intensity extraction. *Journal of Applied Crystallography*, 43(1):191–195, 2010. doi: 10.1107/S0021889809049267.
- [6] Rossum G. *Python*. Python Software Foundation, 2021. URL <https://www.python.org/>.
- [7] Milos Janecek and Robert Kral. *Modern electron microscopy in physical and life sciences*. BoD–Books on Demand, 2016. ISBN 9789535122524.

-
- [8] Andreas D Schenk, Ansgar Philippsen, Andreas Engel, and Thomas Walz. A pipeline for comprehensive and automated processing of electron diffraction data in iplt. *Journal of structural biology*, 182(2):173–185, 2013. doi: 10.1016/j.jsb.2013.02.017.
- [9] Yi-Yun Tsai, Yi-Chen Pan, and Jui-Chao Kuo. Polynomial fitting method of background correction for electron backscatter diffraction patterns. *Scientific reports*, 12(1):1–13, 2022. doi: 10.1038/s41598-021-04407-0.

APÉNDICE A

INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

APÉNDICE B

OTRO APÉNDICE COMPLEMENTARIO

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Edson Edgardo Samaniego Pantoja

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias de la Ingeniería
con Orientación en Nanotecnología

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

PROCESAMIENTO DE IMAGEN DEL ESPECTRO DE DIFRACCIÓN DE
ELECTRONES

Nací el 22 de octubre de 1997 en la ciudad de Nuevo Laredo, Tamaulipas; mis padres son Enrique Samaniego y Gloria Pantoja. En 2019 egresé como Ingeniero en Mecatrónica en el Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.