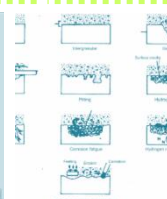
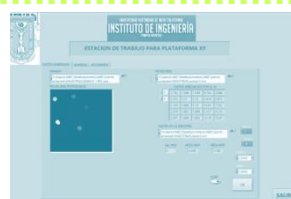
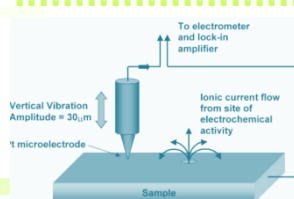




**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA
CALIFORNIA**

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E
INGENIERÍA**



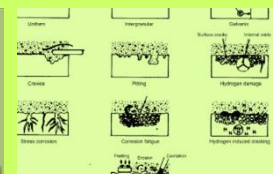
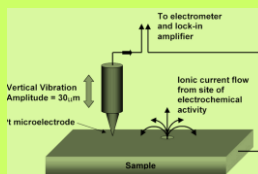
**“INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN VIRTUAL PARA
CONTROL DE UNA ESTACIÓN DE TRABAJO ELECTROQUÍMICA
XY PARA EL USO DE LAS TÉCNICAS DE BARRIDO CON
ELECTRODO SRET Y SVET”**

**TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS**

**PRESENTA
Marco Antonio Flores Zamora**

**DIRECTOR
Dr. Rogelio Arturo Ramos Irigoyen**

Mexicali, B. C. Abril 2015



Dedicatoria

**A mis padres con su testimonio de vida, y a mis hermanos y
amigos que me inspiran para lograr mis metas**

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarme apoyo económico a lo largo de mis estudios.

A mi director de tesis Dr. Rogelio Arturo Ramos Irigoyen por la confianza depositada al poner en mis manos su investigación y por su amistad.

A todos los catedráticos por transmitirme sus conocimientos.

Tabla de contenido

Pág.

Tabla de contenido	i
Lista de figuras	iv
Lista de tablas	vi
Capítulo 1 . Introducción	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.	4
1.3 Hipótesis	4
Capítulo 2 . Marco teórico.	5
2.1 Corrosión por picadura.	5
2.2 Técnicas de barrido con electrodo.	9
2.2.1 El proceso de la corrosión localizada	9
2.2.2 Técnicas de la electroquímica locales que permiten el mapeo de corrientes eléctricas.	10
2.2.3 Técnicas de barrido con electrodo para mapeo de corrientes locales y potenciales.	12
2.2.3.1Técnica de Barrido con Electrodo de Referencia SRET.	13
2.2.3.1.1 Aplicaciones	16
2.2.3.2 Técnica de barrido con electrodo vibrante SVET.	17
2.2.3.2.1 Aplicaciones.	24
2.2.3.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica local EIS.	24

Tabla de contenido

Pág.

2.3 Sistema X-Y.	26
2.4 Ruido eléctrico en las técnicas de barrido con electrodo.	26
2.5 Instrumentación virtual	27
Capítulo 3 . Materiales y Técnicas	31
3.1 Desarrollo de mecanismos e instrumentación electrónica.	31
3.1.1 Sistema SVET	31
3.1.1.1 Mecanismo X-Y empleado.	33
3.1.1.2 Características de Mecanismo X-Y para SRET o SVET.	34
3.1.2 Unidad de control de control para el mecanismo X-Y.	35
3.1.2.1 Características técnicas de ARDUINO UNO	36
3.1.3 Unidad de potencia.	37
3.2 Método Propuesto para mejora en el tiempo de barrido par las técnicas SVET o SRET	39
3.2.3.1 Programación y desarrollo del controlador para la estación de trabajo XY.	42
3.2.3.1.1 Lectura de base de datos	43
3.2.3.1.2 Iniciar estación de trabajo	45
3.2.3.1.3 Aplicación del barrido completo	47
3.2.3.1.4 Aplicación de algoritmo para desplazamiento diagonal sobre los ejes XY	49
3.2.3.1.5 Algoritmo Bresenham	51
Capítulo 4 Resultados y discusiones	53
4.1 Instrumento virtual de control	53
4.2 Interfaz gráfica con el usuario.	54
4.2.1 Ventana principal	54

Tabla de contenido

	<i>Pág.</i>
4.2.2 Barrido completo -----	55
4.2.3 Recorrido por coordenadas -----	56
4.3 Calculo del tiempo de medición y comparación con un sistema SVET comercial -----	57
<i>Conclusiones</i> -----	59
<i>Referencias bibliográficas</i> -----	62
<i>Anexo A</i> -----	65

Lista de figuras

Pág.

<i>Figura 2.1 Curva de polarización para corrosión por picadura.</i>	6
<i>Figura 2.2 Mecanismo de corrosión de una picadura. El metal M se corroe en una disolución acuada de NaCl, disolviéndose. El oxígeno se reduce en las superficies catódicas adyacentes.</i>	8
<i>Figura 2.3 Aparato usado por U.R. Evans para medir la distribución de potencial con un electrodo de zinc.</i>	12
<i>Figura 2.4 Diagrama de un sistema comúnmente usado para la implementación de la técnica SRET. La configuración muestra un electrodo de referencia estacionario para la medición de potencial.</i>	14
<i>Figura 2.5 Prueba con dos electrodos usada por investigadores para la medición de distribución de potencial de forma localizada.</i>	15
<i>Figura 2.6 Diagrama conceptual de un mecanismo de vibración para electrodo con PZT usado en la técnica SVET.</i>	18
<i>Figura 2.7 Diagrama de un mecanismo vibratorio para un electrodo aplicado en la técnica SVET para, mediciones de potencial vertical y horizontalmente de la superficie de la muestra.</i>	19
<i>Figura 2.8 Aparato comúnmente usado para aplicar la técnica SVET para la medición de componentes de corriente normal y horizontal a la superficie de la muestra.</i>	20
<i>Figura 2.9 Representación esquemática de corrosión localizada. La imagen izquierda muestra las líneas de potencial y la imagen izquierda las líneas de corriente. El rectángulo central representa el ánodo y el resto del área es considerado el cátodo.</i>	23
<i>Figura 2.10 Representación esquemática de la punta de un electrodo usado como fuente de corriente puntual para calibración.</i>	23
<i>Figura 2.11 Evolución de la instrumentación</i>	27
<i>Figura 2.12 Instrumento Virtual.</i>	29
<i>Figura 2.13 Programación grafica de LabVIEW. (Chicala, Primera Edicion)</i>	30
<i>Figura 3.1 Sistema SVET básico.</i>	32
<i>Figura 3.2 Sistema X-Y.</i>	33

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3.3 Plataforma Arduino _____	35
Figura 3.4 Prototipo de la unidad de potencia. _____	38
Figura 3.5 Diagrama esquemático de la unidad de potencia _____	38
Figura 3.6 Interfaz del usuario del VI ADIPCL _____	40
Figura 3.7 Interfaz del usuario para la estación de trabajo con movimiento XY. _____	41
Figura 3.8 Diagrama de flujo de la programación. _____	42
Figura 3.9 Programación lectura de datos. _____	43
Figura 3.10 Configuración de Read From Measurement File. _____	44
Figura 3.11 Sensor de fin de carrera. _____	45
Figura 3.12 Programación para inicializar la estación de trabajo. _____	46
Figura 3.13 Programación barrido completo. _____	47
Figura 3.14 Barrido completo y simulación del recorrido. _____	49
Figura 3.15 Algoritmo movimiento lineal. _____	50
Figura 3.16 Simulación del recorrido y movimiento de motores. _____	50
Figura 3.17 Incremento de “y” mediante la pendiente m _____	51
Figura 3.18 Algoritmo Bresenham en plano cartesiano. (11) _____	52
Figura 4.1 Pantalla principal _____	55
Figura 4.2 Pantalla barrido completo _____	56
Figura 4.3 Pantalla recorrido por coordenadas _____	57

Lista de tablas

Pág.

<i>Tabla 3.1 Características del mecanismo X-Y.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.2 Resumen de características técnicas</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.3 Características eléctricas de diseño de la unidad de potencia.....</i>	<i>39</i>

Capítulo 1 . Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La corrosión localizada es un proceso cinético heterogéneo en donde las corrientes y potenciales se dan de forma puntual con dimensiones micrométricas en la superficie de un metal, para evaluarla se usan micro-electrodos por lo que es posible, aplicando técnicas electroquímicas, la medición de corrientes y potenciales en dimensiones de superficies micrométricas. Ahora bien, la medición anterior solo corresponde a un punto de la superficie de la muestra y lo que queremos saber es que pasa en toda la superficie de la muestra y detectar corrosión localizada. Por ello se realiza un barrido, con el micro-electrodo sobre la superficie de la muestra, con la finalidad de poder medir en todos los puntos posibles en la muestra a analizar.

Del método mencionado en el párrafo anterior surgen, las técnicas electroquímicas conocidas como técnicas de barrido con electrodo, las cuales permiten la evaluación de la corrosión localizada. (Los trabajos pioneros en este rubro fueron realizados por Thomhill y Evans quienes desarrollaron un método para la medición de la distribución de potencial sobre un electrodo de hierro [Philippe Marcus, Florian Mansfeld , Corrosion science And Engineering 2006]).

Comercialmente uno de los mejores equipos para la aplicación de las técnicas de barrido con electrodo en estudios de corrosión localizada, es la estación de trabajo para electroquímica del scanner modelo 370 de EG&G PAR. Este equipo utiliza el tradicional sistema de supresión de ruido tipo amplificador Lock-In, controlado por microprocesador y detector de fase automático, además, de contar con un oscilador interno de fase dual así como control de ganancia por software. Otra de las características de este equipo reportada por el fabricante, es el índice de barrido máximo de 2 mm/s. Esto significa que el tiempo de barrido para una longitud de 2 pulgadas en el eje X de una muestra de 2 x 2 pulgadas es de 25.4 s a la velocidad descrita. Si el paso en el eje Y se asume como de 5 μm , el número de líneas exploradas será de 50,800 μm / 5 μm dando un total de 10,160 barridos sobre la superficie para su completa exploración. De tal forma que para hacer el barrido por cada línea toma un tiempo de 25.4 s por lo que el barrido total de la muestra toma un tiempo de $10,160 \times 25.4 \text{ s} = 258,864$ segundos, lo que viene a darnos aproximadamente 75 horas de barrido y medición (más de 3 días). (Philippe Marcus, 2006)

Como podemos ver dos de los principales problemas para este equipo y otros más del mercado son, el considerable tiempo de barrido de la muestra metálica bajo investigación y el sofisticado sistema para supresión de ruido eléctrico tipo Lock-In

Es precisamente el considerable tiempo de barrido para una muestra metálica con las estaciones comerciales como la 370 de EG&G PAR lo que motiva a desarrollar este trabajo en el que se propone el desarrollo de Instrumentación Virtual así como sistemas de interfaz electrónica para controlar una estación de trabajo XY

con la que será posible optimizar los tiempos de barrido para las técnicas de barrido con electrodo como Barrido con Electrodo de Referencia (SRET) y Barrido con Electrodo Vibrante (SVET) midiendo solamente por medio de coordenadas previamente determinadas por análisis de visión de picaduras potenciales. Es decir nuestro equipo tendrá como característica especial que se le podrán dar las coordenadas de orientación de picaduras en un espécimen metálico (muestra) con lo que se disminuirá considerablemente el tiempo de barrido además incluye un algoritmo por computadora que permiten localizar la ruta más corta para ubicar el electrodo en la coordenada correspondiente de una forma más rápida.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollo de instrumentación virtual (VI) con la plataforma LabVIEW 2013 para la medición y control de una estación de trabajo electroquímica XY con capacidad de barrido sobre especímenes metálicos por coordenadas predeterminadas con el uso del VI Análisis de Imagen para Corrosión Localizada (ADIPCL) y el algoritmo Bresenham para el uso de las técnicas de barrido con electrodo SRET y SVET en estudios de corrosión localizada.

1.2.2 Objetivos específicos.

- a) Diseño y desarrollo de instrumentación virtual para control de una estación de trabajo electroquímica XY.
- b) Diseño de interfaz gráfica con el usuario para operación de la estación de trabajo electroquímica XY.
- c) Rediseño y modificación de movimiento X-Y para que opere como estación de trabajo electroquímica XY.
- d) Pruebas de operación de la estación de trabajo electroquímica e Instrumentación virtual de control.

1.3 Hipótesis

Automatización y control con el uso de la plataforma LabVIEW 2013 de una estación de trabajo electroquímica XY aplicada a las técnicas de la electroquímica de barrido con electrodo SRET y SVET en estudios de corrosión localizada particularmente corrosión por picadura.

Capítulo 2 . Marco teórico.

2.1 Corrosión por picadura.

La picadura es un ataque corrosivo extremadamente localizado que se manifiesta por la formación de hoyos en los metales. El ataque corrosivo de la picadura se da principalmente en aleaciones de aceros inoxidable y de aluminio. Estas picaduras pueden ser pequeñas o grandes en diámetro, pero en la mayoría de los casos son relativamente pequeñas. Las picaduras en ocasiones se presentan de forma aislada o muy cerca unas de otras dando la apariencia de una superficie rugosa en el metal (Mars G. Fontana Corrosion Engineering Third Edition 1986).

Generalmente una picadura se describe como una cavidad con un diámetro de superficie del mismo tamaño que su profundidad o menor. La picadura es una de las formas de corrosión más dañina ya que por tan solo ocasionar una pequeña pérdida de metal en la estructura tiene como consecuencia una falla estructural completa (G.S Frankel, The Ohio State University).

Las picaduras son difíciles de detectar debido a lo reducido de su tamaño además de que pueden estar cubiertas por otros productos de la corrosión además, son difíciles de medir cuantitativamente y difíciles de predecir por pruebas de laboratorio. En algunas ocasiones las picaduras requieren un largo tiempo (algunos meses o años) para poder ser vistas. Las picaduras son consideradas

particularmente despiadadas por su forma intensa de corrosión provocando fallas estructurales extremadamente repentinas. (Mars G. Fontana Corrosion Engineering Third Edition 1986).

Las picaduras son como consecuencia de una acción localizada en presencia de un electrolito, frecuentemente en condiciones neutras, cuando la capa pasiva es estable, se ha propuesto que la capa de óxido se repasiva continuamente. La presencia de iones dificulta la pasivación.

La respuesta electroquímica de un metal a un potencial aplicado se representa en la Figura 2.1, donde se detallan las posiciones relativas del potencial de corrosión (E_{corr}), el potencial de picadura (E_p) y el potencial de pasivación (E_R).

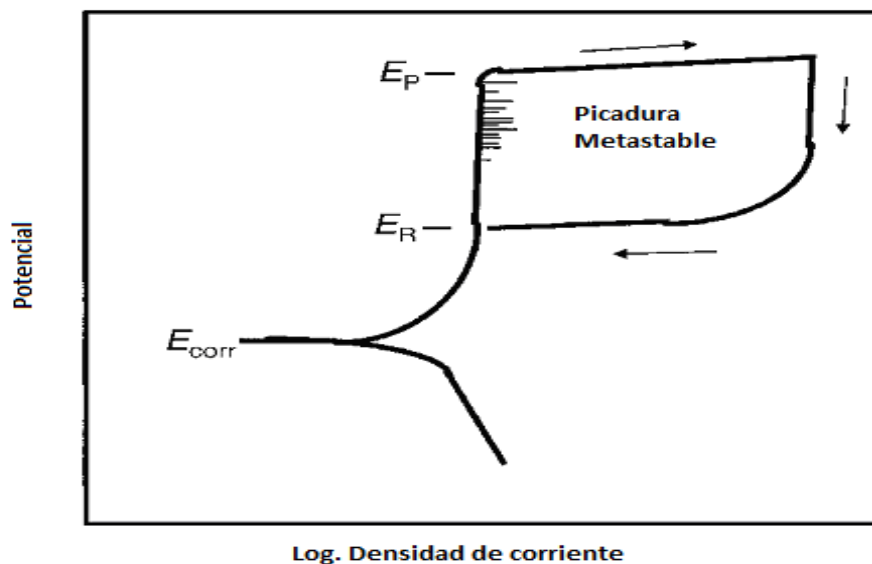


Figura 2.1 Curva de polarización para corrosión por picadura.

Algunos autores sugieren que la picadura solo se inicia por arriba del E_p . Una vez iniciada la picadura se propaga a potenciales menores que E_p , pero mayores que el potencial de pasivación E_R , en el cual se repasan. El E_p parece estar afectado por la concentración de oxígeno en la solución, variaciones moderadas de temperatura, y la presencia de elementos de aleación en forma de precipitados. Por ello, los autores sugieren que el E_p no debe ser utilizado como criterio para determinar la susceptibilidad a la corrosión de las aleaciones (por ejemplo aluminio), aunque si para determinar el límite de protección catódica.

El punto de iniciación de una picadura es un ánodo, el cual está rodeado de una matriz catódica, que provoca la disolución del metal. Donde el metal forma un hidróxido insoluble aumenta la acidez. La solución en la vecindad que corresponde a zona catódica es alcalina. Sin embargo, como la solución adyacente a la superficie catódica está expuesta a la solución, el grado de alcalinidad se mantiene en un grado de magnitud equivalente al de picadura. Un ejemplo esquemático en muestra en la Figura 2.2. Cuando aparece una picadura se observa que los productos insolubles de la corrosión forman una barrera física que actúa contra la difusión del oxígeno al ánodo. Mientras el cátodo tiene acceso al oxígeno de toda la solución.

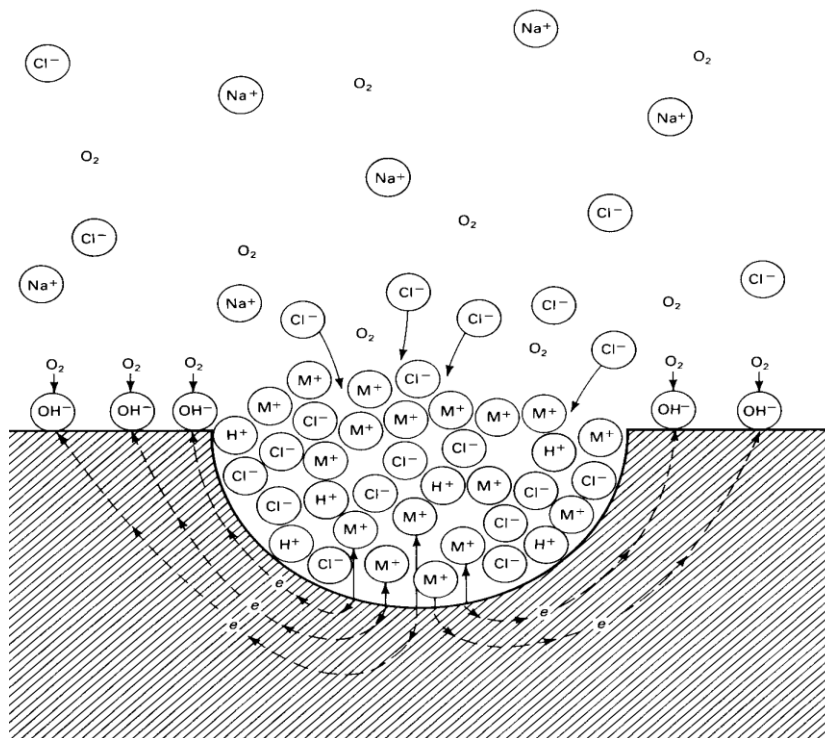


Figura 2.2 Mecanismo de corrosión de una picadura. El metal M se corroe en una disolución acuosa de NaCl, disolviéndose. El oxígeno se reduce en las superficies catódicas adyacentes.

Entre las causas más comunes de formación de estas celdas locales pueden destacarse impurezas en el metal, presencia de compuestos intermetálicos, grietas locales, heterogeneidades del medio, diferencias en la concentración, composición o velocidad, desgaste o rotura de la capa protectora por efecto de tensiones o abrasiones.

Una vez producida la picadura e iniciado su avance, la continuidad del ataque localizado puede explicarse por la combinación de la protección catódica en los bordes de la picadura, el mantenimiento de un ambiente ácido en el interior de la picadura y por la deposición de los productos insolubles de corrosión sobre ella.

2.2 Técnicas de barrido con electrodo.

2.2.1 El proceso de la corrosión localizada

El fenómeno de la corrosión localizada en particular corrosión por picadura (pitting corrosion) es ampliamente investigado y discutido ya que cuando un material es atacado por este tipo de corrosión se debilita su resistencia, lo que conlleva a fallas estructurales en los sistemas donde se aplican materiales que han sido o pueden ser atacados por corrosión por picadura.

Para estudiar y medir la corrosión se hace uso de técnicas electroquímicas. Estos métodos son de tipo analíticos cuantitativos, que basan sus metodologías en las propiedades eléctricas de una disolución de analito cuando forma parte de una celda electroquímica (Skoog Douglas A, Holler F. James, Hieman Timothy, Principios de Análisis Instrumental). Para el estudio y evaluación de la corrosión los métodos y técnicas comunes de la electroquímica son los de polarización potenciométrica y voltametría cíclica. Por desfortuna si lo que se desea es la evaluación de corrosión localizada existe una limitante en estos métodos, ya que solo permiten la medición del proceso cinético de un electrodo uniforme (R. Oltra CNRS- Université de Bourgogne, France) en donde los valores de corrientes y potenciales obtenidos con estas técnicas se refieren a toda el área del electrodo de trabajo (A.C. Bastos, A.M. Simões, M.G. Ferreira 2003), y no, a la medición del proceso cinético heterogéneo como el caso de la corrosión localizada en donde, la distribución de valores de corriente y potencial son a lo largo de la superficie del

electrodo de trabajo de forma puntual, de donde, reciben el nombre de corrientes y potenciales localizados.

2.2.2 Técnicas de la electroquímica locales que permiten el mapeo de corrientes eléctricas.

La corrosión localizada es un proceso cinético heterogéneo en donde las corrientes y potenciales se dan de forma puntual con dimensiones micrométricas en la superficie de un metal, por lo que si usamos micro electrodos es posible, aplicando técnicas electroquímicas, la medición de corrientes y potenciales en dimensiones de superficies micrométricas. Ahora bien, la medición anterior solo corresponde a un punto de la superficie de la muestra y lo que queremos saber es que pasa en toda la superficie de la muestra y detectar corrosión localizada. Por ello se realiza un barrido, con el micro electrodo sobre la superficie de la muestra, con la finalidad de poder medir todos los puntos posibles en la muestra a analizar.

Del método mencionado en el párrafo anterior surgen, las técnicas electroquímicas conocidas como técnicas de barrido con electrodo, las cuales permiten la evaluación de la corrosión localizada. Los trabajos pioneros en este rubro fueron realizados por Thomhill e Evans quienes desarrollaron un método para la medición de la distribución de potencial sobre un electrodo de hierro (Philippe Marcus, Florian Mansfeld , Corrosion science And Engineering 2006) El sistema empleado por Thomhill e Evans se muestra en la Figura 2.3. Este consiste de dos electrodos de referencia idénticos en solución (cloruro de plata para soluciones salinas y sulfato de mercurio para soluciones no cloradas). Uno de los electrodos

permanece fijo (electrodo referencia B), a una distancia de la superficie de la muestra (espécimen, electrodo de trabajo) mientras que el otro electrodo (electrodo de referencia A) es móvil y posicionado en diferentes puntos del espécimen haciendo así un barrido con el sobre el espécimen. El electrodo A se encuentra conectado en serie con el electrodo B a través de un potenciómetro y con la ayuda de un galvanómetro es posible medir el flujo de corriente para los diferentes puntos del barrido con el electrodo A. El poder de la técnica propuesta por Evans y Thomhill fue demostrado por Agar y Evans (Philippe Marcus, Florian Mansfeld, Corrosion science And Engineering 2006), quienes hicieron un mapeo la distribución de potencial a través de una muestra de zinc parcialmente inmersa en la disolución. Mostraron las reacciones catódicas aisladas al área del electrodo en cada punto del barrido con el electrodo A de la Figura 2.3. Agar y Evans, también presentaron un método para el cálculo la distribución de corrientes locales de las líneas equipotenciales que se presentan ver la Figura 2.3. Esta técnica es considerada el principio básico y punto de partida para las técnicas modernas de barrido con electrodo.

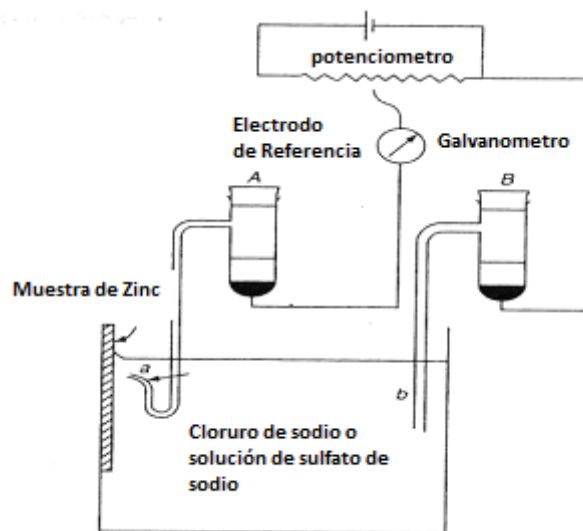


Figura 2.3 Aparato usado por U.R. Evans para medir la distribución de potencial con un electrodo de zinc.

2.2.3 Técnicas de barrido con electrodo para mapeo de corrientes locales y potenciales.

Las técnicas de barrido con electrodo para mapeo de corrientes locales y potenciales, utilizadas para la evaluación e investigación de corrosión localizada son tres: la Técnica de Barrido con Electrodo de Referencia (en inglés se le cita como Scanning Reference Electrode Technique SRET), la Técnica de Barrido con Electrodo Vibrante (en inglés se le cita como Scanning Vibrating Electrode Technique SVET) y la técnica de Impedancia de Espectroscopia Electroquímica Local (en inglés se le cita como Local Electrochemical Impedance Spectroscopy LEIS).

2.2.3.1 Técnica de Barrido con Electrodo de Referencia SRET.

Con la técnica SRET es posible medir la distribución de potencial en solución debido al flujo de corriente ocasionada por corrosión localizada. SRET permite al investigador cuantificar densidades de corriente locales de la superficie de una muestra metálica (Philippe Marcus, Florian Mansfeld, Corrosion science And Engineering 2006). Con el paso de los años se han desarrollado dos métodos para hacer mediciones locales con electrodo de referencia. El primer método es similar al de Evans. Un electrodo simple hace un barrido muy cercano a la superficie de una muestra metálica que se desea analizar. Este electrodo mide el potencial como función de la posición relativa a un electrodo estacionario a varios micrómetros de la superficie de la muestra. Un diagrama de este aparato se muestra en la Figura 2.4 en donde, los datos de potencial son adquiridos por un control computarizado en donde un medidor electrónico mide la diferencia de potencial entre el electrodo de barrido y electrodo estacionario.

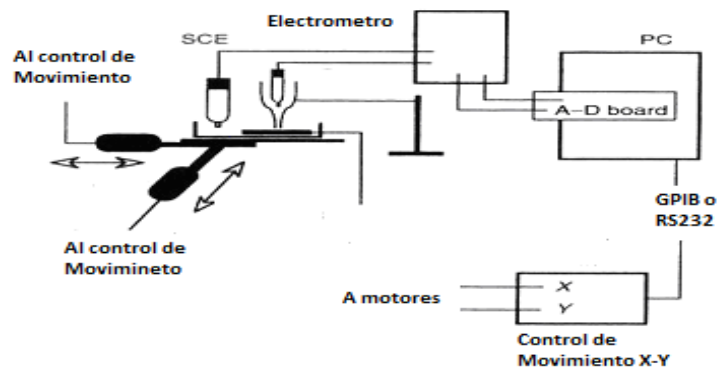


Figura 2.4 Diagrama de un sistema comúnmente usado para la implementación de la técnica SRET. La configuración muestra un electrodo de referencia estacionario para la medición de potencial.

El segundo método utiliza una configuración con dos electrodos que consisten de dos alambres fijados con resina epoxi a una distancia conocida entre ellos Figura 2.5. Con esta prueba de dos electrodos se hace un barrido a la superficie de la muestra para analizar la diferencia de potencial entre los dos electrodos que es registrada por un sistema de adquisición de datos. En este segundo método es posible el uso de un electrodo de referencia estacionario si se desea un control de potencial de la muestra en análisis.

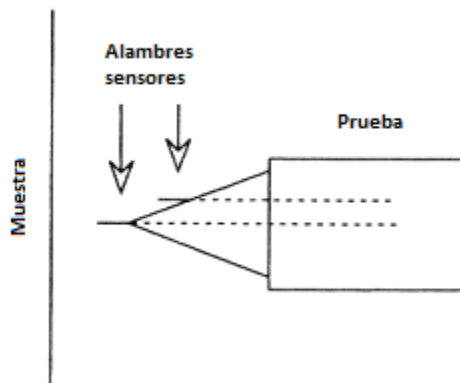


Figura 2.5 Prueba con dos electrodos usada por investigadores para la medición de distribución de potencial de forma localizada.

Los resultados en voltaje pueden ser analizados para obtener una conclusión cualitativa acerca del proceso de corrosión. Por ejemplo, localización de sitios anódicos y catódicos, defectos en la capa de protección en el material analizado o áreas de actividad relativa.

Idealmente es posible saber que sucede de forma más cuantitativa de lo que ocurre en la superficie de la muestra metálica con las intensidades de corriente local. Para la configuración de SRET con un solo electrodo de barrido los datos de potencial pueden ser convertidos a densidades de corriente con el uso de un alambre calibrado. Este alambre puede ser de un metal noble que es situado a un lado de la muestra con resina epoxi. En ambos casos con el uso del método de un electrodo o dos electrodos el investigador convierte los datos de potencial medidos con SRET a densidades de corriente. Por ejemplo, midiendo el potencial sobre el alambre calibrado como función de la corriente aplicada una curva de calibración puede ser generada para distintas distancias de separación. Multiplicando los

potenciales pico en el experimento de barrido por una pendiente apropiada de la curva de calibración. El resultado es una aproximación de la densidad de corriente local. Para el caso de una prueba con dos electrodos la intensidad de corriente local (i_{local} , A/cm²) en cualquier punto de la solución puede ser obtenida con la relación de la ecuación 2.1.

$$i_{local} = \frac{\Delta V_{probe} \sigma}{l} \quad (2.1)$$

2.2.3.1.1 Aplicaciones

El sistema SRET es usado ampliamente en una variedad de investigaciones de corrosión localizada entre las que se encuentra, corrosión por picadura intergranular y galvánica en diferentes metales y soldaduras.

2.2.3.2 Técnica de barrido con electrodo vibrante SVET.

El objetivo de SVET es el mismo que el de SRET la medición y determinación de la distribución de corriente en solución de una muestra metálica. SVET presenta un avance importante con respecto a SRET y es su característica de rechazo al ruido eléctrico que permite la medición de corrientes más (A.C. Bastos, 2003) pequeñas que las que se pueden medir con SRET (Philippe Marcus, Florian Mansfeld , Corrosion science And Engineering 2006). De hecho SVET no fue usado inicialmente en corrosión sino en neurología como un método para medir la respuesta en impulsos nerviosos de un axón (El axón o cilindroeje es una prolongación filiforme de la célula nerviosa, a través de la cual viaja el impulso nervioso de forma unidireccional, y que establece contacto con otra célula mediante ramificaciones terminales). En el campo de la corrosión los trabajos pioneros con esta técnica datan los años 70. Se le reconocen a Isaacs (A.C. Bastos, A.M. Simões, M.G. Ferreira 2003). La técnica SVET es conocida también como barrido con prueba vibrante (SVP) o prueba de densidad de corriente (CDP). SVET basa su operación en la medición con un electrodo vibrante del gradiente de potencial libre que aparece en la superficie de un metal corroído. Este gradiente principalmente es debido al flujo iónico que pasa a través del electrolito hacia las partes catódicas de la superficie metálica. La vibración mecánica del electrodo de SVET permite la medición de pequeñas magnitudes de potencial de c.a. con frecuencias iguales a la frecuencia de vibración y proporcionales a la densidad de corriente iónica. El barrido de la superficie metálica permite la localización de los defectos de la superficie provocados por corrosión localizada.

En SVET la prueba se encuentra vibrando ya sea verticalmente u horizontalmente con respecto a la superficie de la muestra para medir individualmente los componentes escalares de la corriente, o en ambas direcciones simultáneamente para medir vectores de corriente de dos dimensiones. La vibración se consigue con dos transductores piezoeléctricos, dispuestos en forma paralela al electrodo o prueba. Al aplicar un voltaje de CA los dos piezoeléctricos empiezan a flexionarse en la dirección de interés verticalmente u horizontalmente. El concepto es mostrado en la Figura 2.6.

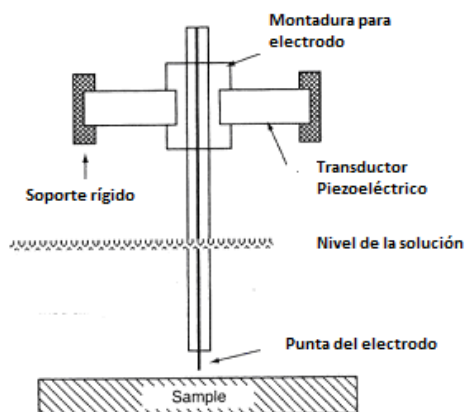


Figura 2.6 Diagrama conceptual de un mecanismo de vibración para electrodo con PZT usado en la técnica SVET.

Un pequeño alambre de platino aislado que actúa como prueba y se le coloca entre dos vibradores piezoeléctricos (esta forma es sugerida por Isaacs). Aplicando un voltaje a los piezo transductores (PZT), el electrodo se refleja en dirección vertical (de forma normal a la superficie de la muestra metálica a analizar). La Figura 2.7 muestra un diagrama esquemático de un mecanismo para hacer vibrar un electrodo en ambas direcciones X y Y. La Figura 2.8 muestra un diagrama de un sistema típico para la implementación de la técnica SVET.

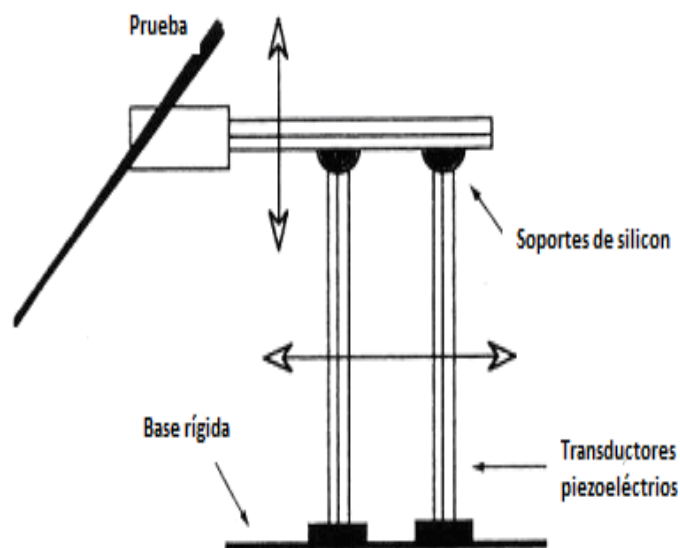


Figura 2.7 Diagrama de un mecanismo vibratorio para un electrodo aplicado en la técnica SVET para, mediciones de potencial vertical y horizontalmente de la superficie de la muestra.

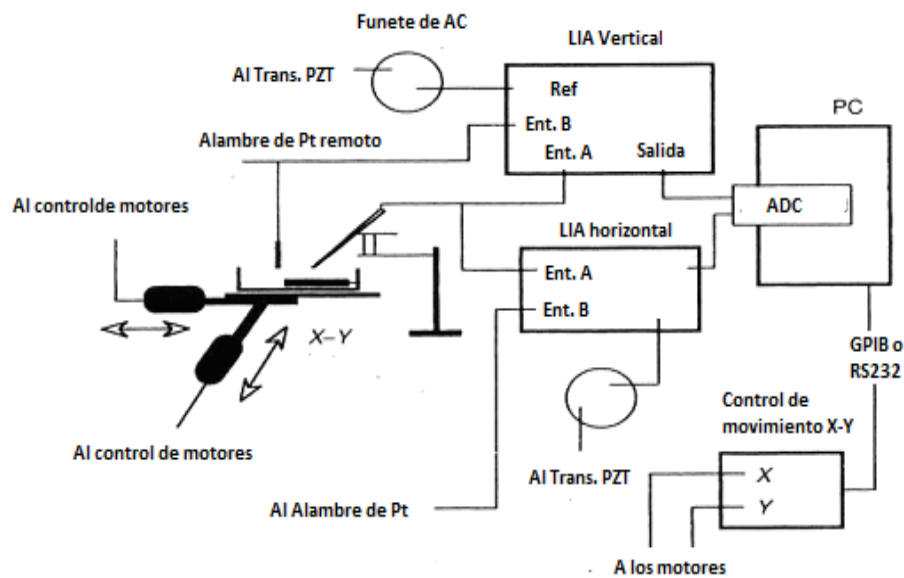


Figura 2.8 Aparato comúnmente usado para aplicar la técnica SVET para la medición de componentes de corriente normal y horizontal a la superficie de la muestra.

Como se menciona en el primer párrafo la principal característica de SVET con respecto a SRET es que permite un mayor rechazo al ruido eléctrico (S/N), ya que mientras que con la técnica SRET solo se pueden hacer mediciones eléctricas limitadas a 200 μV debido, a los niveles de ruido. Con SVET las mediciones eléctricas son en el orden de 5 μV . Este gran aumento en la sensibilidad se alcanzó, convirtiendo el gradiente de potencial medido a una señal de CA de frecuencia conocida (en la punta del electrodo). Con esto se pudo hacer uso de equipo electrónico como amplificadores tipo Lock-In (LIA) capaces de hacer mediciones de señales eléctricas inmersas en ruido. LIA puede medir con éxito potenciales en la punta del electrodo en el orden de μV con un cociente señal/interferencia (S/N) más bajos de -60dB.

Para el cálculo de la densidad de corriente de superficie Isaacs describió la ecuación 2.2.

$$\phi(x, y) = \frac{I}{2\pi k} \left[\frac{1}{(x^2 + y^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{1}{(x^2 + y^2 + (h+d)^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \quad (2.2)$$

Donde I es la corriente de superficie, k la conductividad de la solución, “ x ” y “ y ” las coordenadas cartesianas de la ubicación de la punta del electrodo en la superficie de la muestra metálica, h la distancia de separación entre el electrodo y la superficie de la muestra y del desplazamiento del electrodo causado por la vibración. Por medio de la ecuación 2.2 se pueden formar mapas de la distribución de corrientes de la superficie de la muestra.

Las ecuaciones 2.3 y 2.4 son usadas para obtener la densidad de potencial (V) y la densidad de corriente (I) respectivamente, en cada punto donde es posicionado el electrodo en la superficie de la muestra (A.C. Bastos, A.M. Simões, M.G. Ferreira 2003).

$$V = \frac{I\rho}{2\pi d} \quad (2.3)$$

$$i = \frac{I}{4\pi r^2} \quad (2.4)$$

Para la ecuación 2.3 V es el potencial, I la intensidad de corriente de la fuente, ρ la resistividad de la solución y d la distancia de separación entre la punta del electrodo y la superficie de la muestra. Para la ecuación 2.4, i es la densidad de corriente, I la intensidad de corriente de la fuente proveniente de un micro-electrodo de calibración, y r la distancia de la punta del electrodo vibrante y la superficie de la muestra. La Figura 2.9 muestra una representación esquemática del potencial y la distribución de corriente en la solución sobre la superficie de la muestra metálica. Mientras que en la Figura 2.10 podemos ver una representación esquemática del uso de un micro-electrodo de calibración como fuente de corriente para poder hacer uso de la ecuación 2.4.

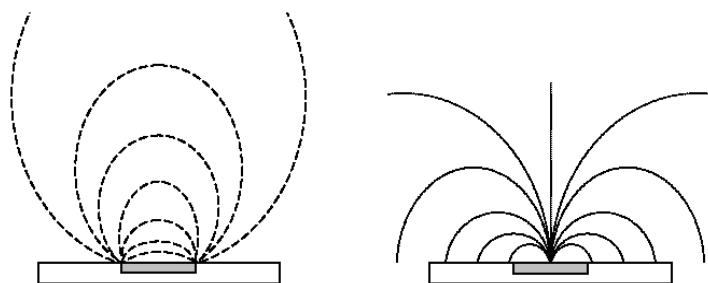


Figura 2.9 Representación esquemática de corrosión localizada. La imagen izquierda muestra las líneas de potencial y la imagen izquierda las líneas de corriente. El rectángulo central representa el ánodo y el resto del área es considerado el cátodo.

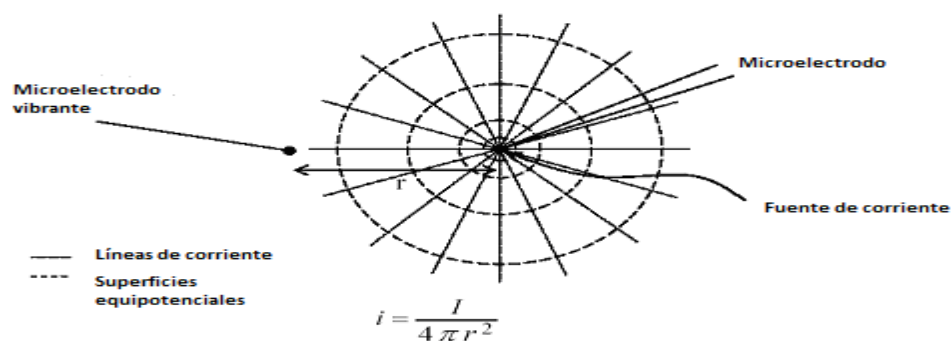


Figura 2.10 Representación esquemática de la punta de un electrodo usado como fuente de corriente puntual para calibración.

2.2.3.2.1 Aplicaciones.

SVET es usado extensivamente para la investigación de corrosión localizada, corrosión galvánica, recubrimientos, inhibidores, interfaces y límites de grano, partículas de segunda fase, corrosión por esfuerzo y corrosión microbiológica.

2.2.3.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica local EIS.

La espectroscopia de impedancia local es una técnica no destructiva ampliamente usada en sistemas electroquímicos. En resumen la técnica consiste en aplicar una señal senoidal con una tensión en el rango de milivoltios (mV), entre la muestra que se investiga y un electrodo de referencia distante. Los datos generados por EIS se obtienen directamente de la función de transferencia entre el voltaje de referencia y a la respuesta en corriente del electrodo como función de la frecuencia aplicada.

Debido a que en esta técnica es usada la respuesta en corriente del electrodo, se tiene como resultado una medición promedio-superficie en el caso de electrodos no uniformes debido, a por ejemplo, a defectos o corrosión por picadura que pueden aparecer cuando se analizan los datos de EIS, si las constantes de tiempo para procesos individuales ocurren en la superficie no son bien separados en el dominio de la frecuencia, o la corriente de alguno de los procesos es particularmente baja.

De este modo un método para generar impedancia local es deseable para, investigar los procesos locales debido a las partículas de segunda fase, heterogeneidades de superficie o límite de grano. Inicialmente para la generación

de datos de impedancia local se usaba un micro electrodo que contiene un electrodo de referencia y uno de tipo contador. Esta prueba era usada para polarizar la muestra localmente como función de la frecuencia. Haciendo un barrido con este micro electrodo a través de la superficie de la muestra a una distancia aproximada de $30\mu\text{m}$, con la misma técnica usada en SRET o SVET es posible generar datos de EIS para áreas discretas de la superficie de la muestra. Los resultados obtenidos arrojan diferencias cualitativas de defectos de capa y otras heterogeneidades no cuantitativas. Los datos de EIS producidos por estos métodos, se debe en parte, a la inhabilidad de confinar la corriente al área de interés. Por otra parte la impedancia de entrada de los micro electrodos es relativamente alta y la corriente tiende a fugarse a las áreas de baja impedancia de la superficie de la muestra, también la alta impedancia de los electrodos limitan la sensibilidad de la técnica.

Las aplicaciones para EIS o LEIS son en la investigación de partículas de segunda fase, defectos de capa y corrosión por picadura.

2.3 Sistema X-Y.

Los sistemas usados para el barrido con el electrodo son sistemas para movimiento en dos dimensiones, movimientos X-Y. El movimiento o desplazamiento en ambos ejes se consigue con servo motores o motores a pasos. El desplazamiento en ambos ejes permite barrer con el electrodo un área cuadrada de la muestra metálica que se desea analizar y con la ayuda de equipos de electro medición se puede obtener un mapeo de la distribución de potencial en solución de la superficie de la muestra.

Los datos de potencial obtenidos pueden ser graficados en forma de mapas de contorno de tres dimensiones en donde los ejes X-Y son de posición y el eje Z representa el voltaje o potencial (Philippe Marcus , Florian Mansfeld , Corrosion science And Engineering 2006).

2.4 Ruido eléctrico en las técnicas de barrido con electrodo.

El ruido eléctrico se considera como una variable perturbadora no deseable en cualquier sistema. El ruido eléctrico para los sistemas electroquímicos es muy perjudicial ya que invade y se superpone con gran magnitud a las señales eléctricas que se obtienen como resultado de los sistemas electroquímicos (relación señal a ruido S/N), las cuales son débiles y pequeñas con respecto a la

señal de ruido. Una vez que se tiene una señal con ruido el problema es poder determinar que parte de la señal medida es útil y cual es ruido, de aquí que uno de los mayores trabajos en la instrumentación electroquímica, es poder medir señales de magnitudes pequeñas de tensión y corriente libres de ruido eléctrico (Federico Miyara, Luis A. Lahoz (Introducción al análisis frecuencial y al ruido eléctrico Tercera Edición - Año 2003).

2.5 Instrumentación virtual

La instrumentación ha evolucionado a través del tiempo aprovechando siempre los últimos avances tecnológicos del momento que se han dado a través de la historia, la Figura 2.11 (1) muestra la evolución de la instrumentación tomando en cuenta el aumento de flexibilidad y funcionabilidad de la misma.

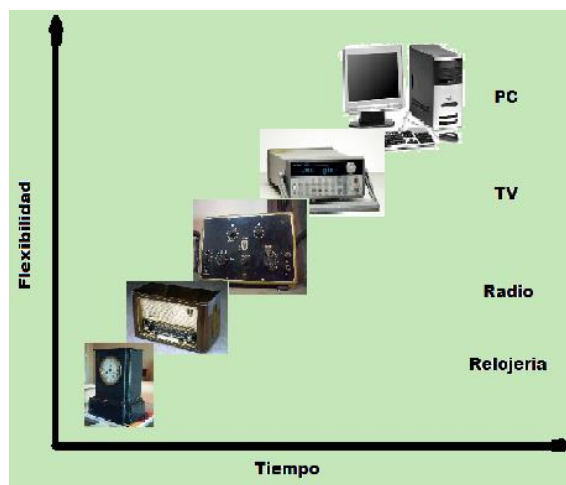


Figura 2.11 Evolución de la instrumentación

Los primeros instrumentos para medición de magnitudes eléctricas inicia en el siglo XIX, para su desarrollo se utilizaron los componentes y mecanismos usados en los relojes un ejemplo, es la fabricación del mecanismo de D'Arsonval usado para medir pequeñas corrientes eléctricas. Posteriormente con el desarrollo de la radio construida con tubos al vacío se utilizaron se usan amplificadores y se desarrollan instrumentos de medición con pre amplificación de señales eléctricas pudiendo medir cantidades eléctricas muy pequeñas. A la llegada de la televisión se desarrollan los primeros osciloscopios y fué posible observar en una pantalla las formas de las señales eléctricas. Finalmente con el desarrollo de la computadora se da inicio a el desarrollo de la los primeros instrumentos virtuales los cuales forman parte por medio de la programación del hardware de la computadora.

Se conocen dos tipos de instrumentación, instrumentación rígida tradicional y la instrumentación virtual. En la Instrumentación rígida tradicional su función está definida por el fabricante algunos ejemplos son, los osciloscopios, analizadores de espectro, frecuencímetros, entre otros. La instrumentación virtual es aquella que se su forma física se encuentra en el Hardware de una computadora y su función está definida por el usuario final del instrumento. Un sistema de instrumentación virtual está compuesto por una Computadora, una Plataforma de Programación y una tarjeta de interfaz que permite una conexión física y funcional entre la computadora y las magnitudes eléctricas a medir y controlar.

La instrumentación virtual comparada con la instrumentación tradicional es más flexible y adaptable a las diferentes necesidades de la instrumentación. (Figura 2.12)



Figura 2.12 Instrumento Virtual.

Una herramienta esencial para el desarrollo de la instrumentación virtual es la plataforma de programación LabVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench). Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, MAC y GNU/Linux. Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs y su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer programas relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales.

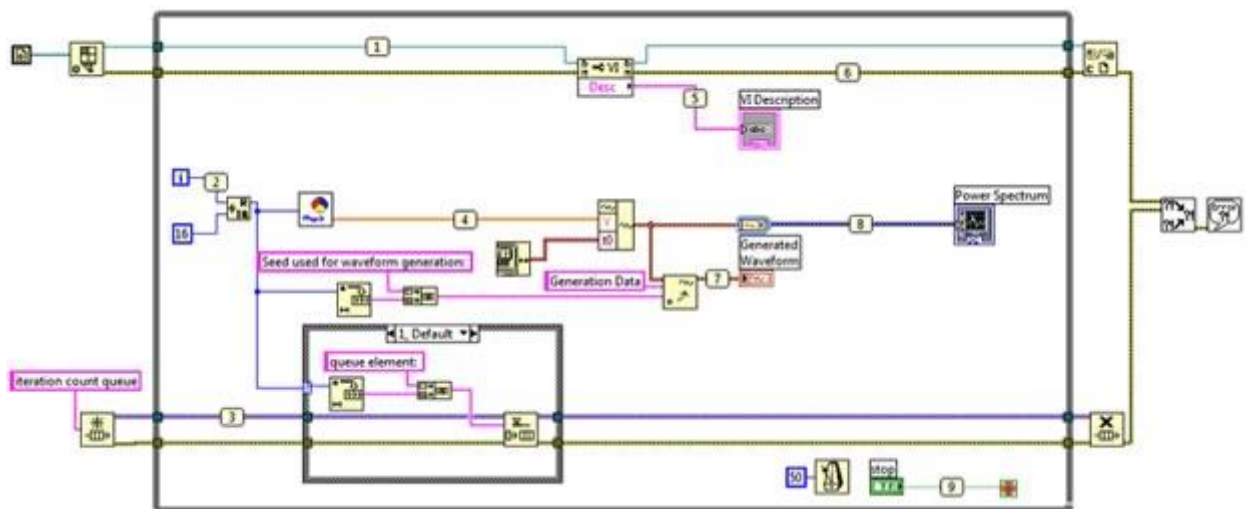


Figura 2.13 Programación grafica de LabVIEW. (Chicala, Primera Edicion)

Capítulo 3 . Materiales y Técnicas

3.1 Desarrollo de mecanismos e instrumentación electrónica.

El desarrollo de este trabajo surge de la necesidad de determinar, medir y contar las posibles picaduras en especímenes metálicos de diferentes aleaciones, así como disminuir el tiempo de barrido para la técnica SRET y SVET. En este capítulo se describen los mecanismos e instrumentación desarrollados para hacer posible el objetivo del proyecto general y particulares de este documento de tesis.

3.1.1 Sistema SVET

La técnica de barrido por electrodo vibrante sus siglas en ingles SVET primeramente fue desarrollada por biólogos para el estudio del flujo iónico en sistemas biológicos, su aplicación en el campo del estudio de la corrosión data de los años 70 por Isaacs, Agar y Evans (Bastos, Simões, Ferreira 2003) (James Badger Stephen 1999), (Jie Hi, Johnston Gelling, Tallman and Bierwagen 2000).

SVET permite la medición de intensidades de corriente eléctrica locales en superficies de metales activos inmersos en soluciones electrolíticas.

El método se basa en la medición de potenciales extremadamente pequeños que existen en la solución debido al flujo de corrientes iónicas originadas por las reacciones electroquímicas que ocurren en las superficies activas de los metales (Bastos, Simões, Ferreira 2003)(Jie Hi, Johnston Gelling, Tallman and Bierwagen 2000).

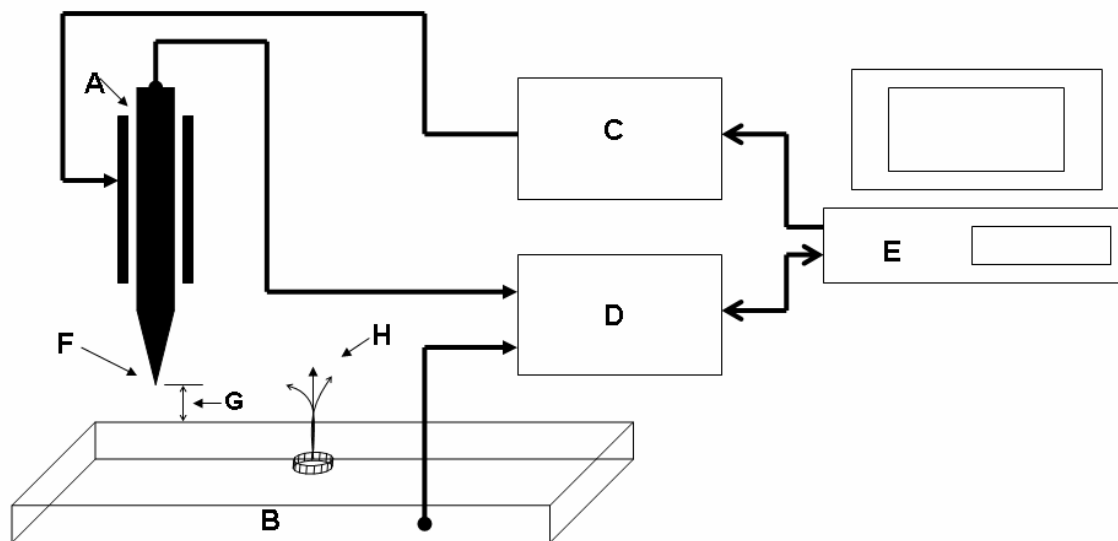


Figura 3.1 Sistema SVET básico.

El potencial del electrodo vibrante es medido con respecto a un electrodo de referencia para obtener, diferencias de potencial en los límites del área de vibración del electrodo, con las que se determina la corrosión por picadura. En el campo de la corrosión el método es aplicado para el estudio de fenómenos de corrosión localizada como corrosión por picadura (pitting), intergranular o galvánica, ya que con ella es posible medir densidades de corriente local.

3.1.1.1 Mecanismo X-Y empleado.

Se trata de un sistema mecánico que permite desplazar un electrodo dentro de las dimensiones de un plano para un espécimen metálico. El mecanismo usado efectúa un desplazamiento en los ejes X e Y con dos motores a pasos tipo unipolar modelo VEXTA PX245 M-01A.

En la imagen (Figura 3.2), se muestra el sistema de movimiento que se usó en ella se pueden apreciar las partes principales que lo integran como son, los motores y los tornillos de desplazamiento a los que se encuentran acoplados.

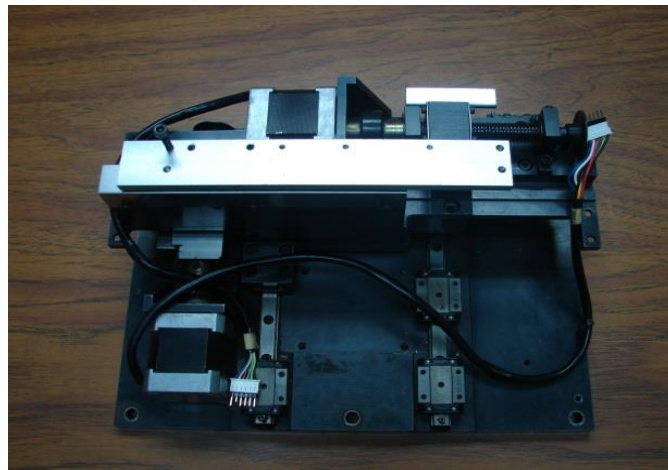


Figura 3.2 Sistema X-Y.

Los motores del sistema tienen un movimiento angular de 0.9° por paso, estos motores están acoplados a tornillos los cuales para el desplazamiento angular por paso permiten un desplazamiento lineal de $5.31\mu\text{m}$ para cada paso de los motores. La tabla 3.1 detalla las características del mecanismo X-Y.

Tipo de Movimiento	Desplazamiento	
	Eje X	Eje Y
Desplazamiento Lineal/P	5.31 μ m	5.31 μ m
Desplazamiento Angular/P	0.9°	0.9°

Tabla 3.1 Características del mecanismo X-Y.

3.1.1.2 Características de Mecanismo X-Y para SRET o SVET.

El mecanismo o movimiento X-Y aplicado a un sistema SRET o SVET debe permitir hacer el barrido sobre la muestra metálica bajo medición, desplazando el electrodo vibrante sobre la misma y cubriendo el área de la cual se desea determinar si hay una picadura con la medición, de la diferencia de potencial eléctrica por picadura. Este mecanismo debe cubrir las necesidades de alta resolución en su movimiento tanto para el eje X como Y, ya que, entre mayor resolución se tendrá un mejor barrido. Esta resolución está relacionada con la dimensión del diámetro de las picaduras de las cuales se requiere hacer medición de potencial. Cabe destacar que entre más pequeña la picadura el paso en los movimientos XY deberá ser más pequeño para poder así hacer un barrido efectivo y no dejar fuera picaduras en el proceso de barrido.

3.1.2 Unidad de control de control para el mecanismo X-Y.

La unidad de control para el mecanismo X-Y, usada en este proyecto es “Arduino Uno” (Figura 3.3) de fabricación Italiana la cual consiste de una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open source) basada en un hardware y software flexibles y fácil de usar.



Figura 3.3 Plataforma Arduino

Para nuestro desarrollo Arduino Uno es utilizada como unidad de interfaz de control para los motores del sistema por medio del protocolo de comunicación y puerto de entrada/salida USB conectada a una computadora personal Dell Optiplex 7010 Core i7 CPU @ 3.40GHz, sistema operativo de Windows 8 Pro.

3.1.2.1 Características técnicas de ARDUINO UNO

Arduino es un sistema de desarrollo integrado que integra un microcontrolador Atmega328 (Tabla 3.3). El sistema de desarrollo integrado Arduino Uno integra todos los periféricos para la operación del microcontrolador como lo son reguladores de tensión, un puerto USB (En los últimos modelos, el original utilizaba un puerto serie) conectado a un módulo adaptador USB-Serie que permite programar el microcontrolador desde cualquier PC de manera cómoda y también hacer pruebas de comunicación con el propio sistema de desarrollo integrado Arduino.

Arduino dispone de 14 terminales (pines) que pueden configurarse como entrada o salida y a los que puede conectarse cualquier dispositivo que sea capaz de transmitir o recibir señales digitales en el estándar TTL de 0 y 5 V.

También dispone de entradas analógicas. Las entradas analógicas permiten digitalizar señales continuas con el tiempo con un CAD con resolución 10 bits. Cuenta con señales de salidas de modulación por ancho de pulso PWM generalmente utilizadas para control de servomotores.

Microcontrolador	Atmega328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (Recomendación)	7 – 12 V
Voltaje de entrada (Limite)	6 – 20 V
Pines de entrada/salida digital	14 (6 puede usarse como salida PWM)
Pines de entrada analogica	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Corriente continua en el pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (0.5 KB ocupados por el bootloader)
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de reloj	16 MHz

Tabla 3.2 Resumen de características técnicas

3.1.3 Unidad de potencia.

Los terminales de salida de la tarjeta de desarrollo integrado Arduino UNO están limitadas su capacidad de entrega de corriente eléctrica las cuales son de 40 mA, por lo que fue necesario diseñar una unidad de potencia para amplificar la capacidad de corriente suministrada a los motores del sistema XY.

Se diseñó y desarrollo una unidad de potencia para entregar una corriente de salida de 2 amperios por bobina a cada motor del sistema, La Figura 3.4 muestra el prototipo y el diagrama esquemático (Figura 3.5), corresponde al diagrama eléctrico de la unidad de potencia.

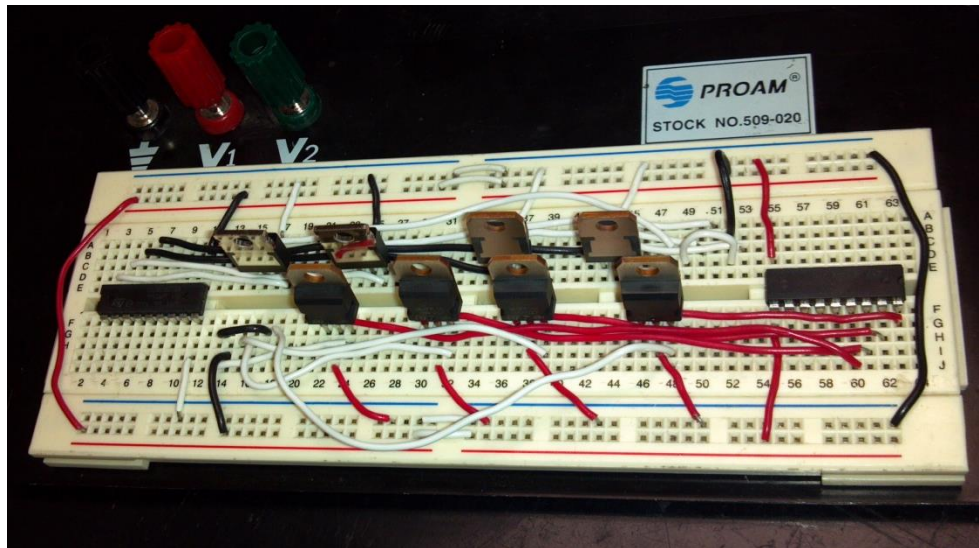


Figura 3.4 Prototipo de la unidad de potencia.

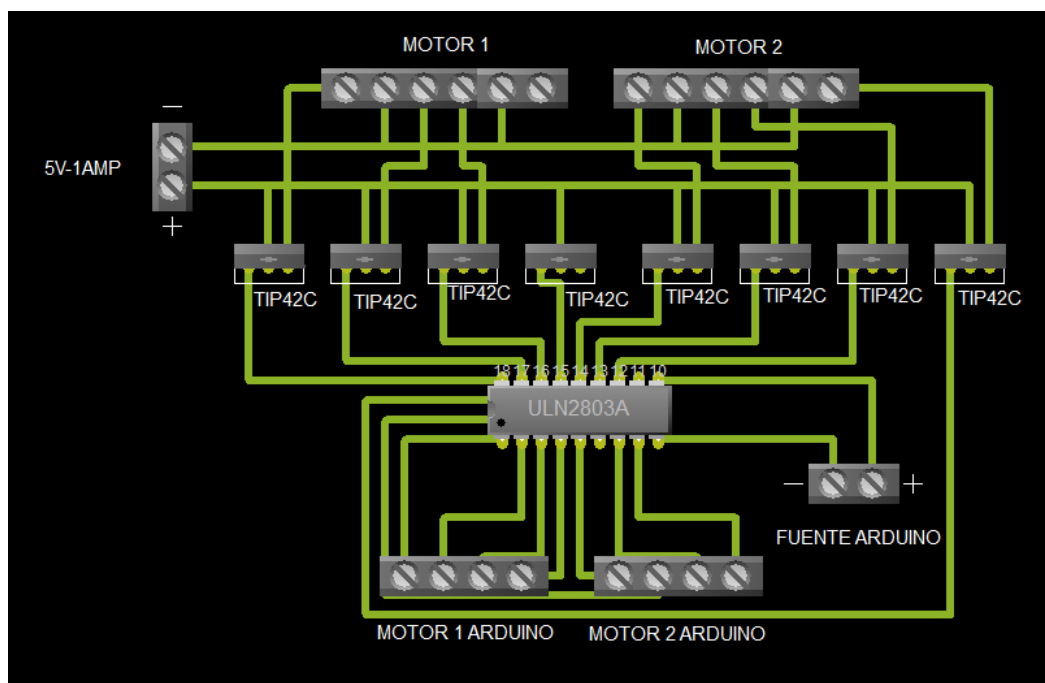


Figura 3.5 Diagrama esquemático de la unidad de potencia

Transistor TIP41C PNP	Voltaje colector base 100v Corriente colector 6A Corriente base 3A
Arreglo de transistores ULN2803A tipo Darlington	Vo Output Voltage 50 V Vi Input Voltage 30 V Corriente colector 500 mA Corriente base 25 mA

Tabla 3.3 Características eléctricas de diseño de la unidad de potencia.

3.2 Método Propuesto para mejora en el tiempo de barrido por las técnicas SVET o SRET

Las técnicas de barrido con electrodo SRET y SVET tienen una desventaja importante, los tiempos de barrido y medición. En este trabajo de tesis uno de los objetivos principales fue el diagnóstico y diseño de un sistema en busca de minimizar los tiempos de barrido de la plataforma XY usada en la aplicación de SRET y SVET.

El procedimiento propuesto en este trabajo se basa en la utilización de dos instrumentos virtuales (VI's). Un primer VI llamado Análisis de Imagen para Corrosión Localizada (ADIPCL) (2), el cual realiza un barrido o la toma de una sola imagen al espécimen bajo prueba con el uso de un scanner comercial o un microscopio digital de video inspección. Seguido aplica el reconocimiento digital de imágenes con un VI desarrollado en LabVIEW2010 que utiliza técnicas de análisis de blobs para la determinación de picaduras potenciales. Este VI permite determinar rápidamente, el número de picaduras en grandes muestras de especímenes corroídos. Los resultados obtenidos de ADIPCL son registrados en

un archivo que contiene las coordenadas de las picaduras potenciales, el área de las picaduras, la longitud transversal, y la densidad de estas además, de imágenes de los especímenes con la identificación y ubicación de las picaduras. La figura 3.6 muestra la interfaz con el usuario de ADIPCL. (3) (4) (5) (6; 7) (8)

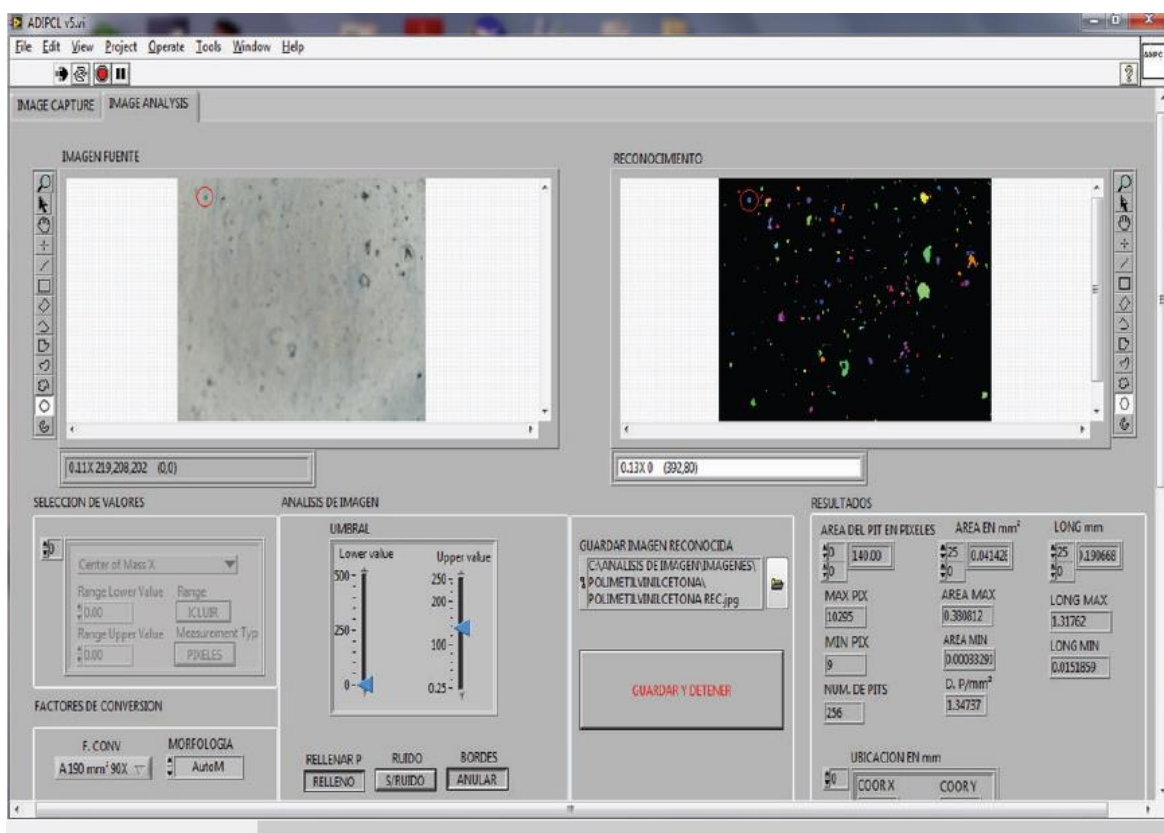


Figura 3.6 Interfaz del usuario del VI ADIPCL

El archivo generado por ADIPCL posteriormente es usado en el VI de control para la estación de trabajo XY desarrollado en este trabajo de tesis.



Figura 3.7 Interfaz del usuario para la estación de trabajo con movimiento XY.

Un segundo VI es el sistema de control propuesto en este documento (VI de Control) para una estación de trabajo XY aplicada a las técnicas de barrido con electrodo SVET o SRET opera inicialmente efectuando una medición de potencial en los centros de las picaduras potenciales encontradas con ADIPCL con la finalidad de predeterminar si se da una diferencia de potencial y validar las picaduras potenciales encontradas por ADIPCL y descartar que ADIPCL identifique como picadura potencial una mancha en la superficie del espécimen metálico. Una vez determinada la veracidad de las picaduras potenciales determinadas por ADIPCL realiza el barrido en las picaduras validadas para el registro de los potenciales eléctricos obtenidos por el electrodo en cada una de las picaduras.

3.2.3.1 Programación y desarrollo del controlador para la estación de trabajo XY.

El diagrama de flujo de la figura 3.8 muestra gráficamente el flujo de operación del controlador propuesto para el control de la estación de trabajo XY. El Instrumento Virtual cuenta con tres procesos importantes en la programación.

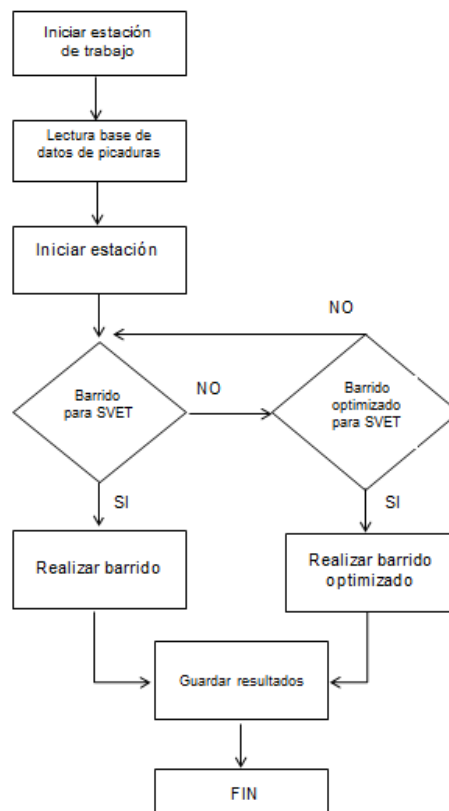


Figura 3.8 Diagrama de flujo de la programación.

3.2.3.1.1 Lectura de base de datos

Al momento de correr el programa, el curso de la programación entra a una “estructura case”, esta estructura nos da la posibilidad de trabajar en diferentes procesos, los cuales son elegidos por el usuario, en este caso tenemos tres procesos posibles a trabajar. El proceso que por default emprenderá principalmente la programación es el de la lectura de la base de datos. Se leerán dos tablas y la imagen de la muestra, previamente direccionando la ubicación de los archivos, los bloques azules presentados en la Figura 3.9 dan lectura de los archivos, posteriormente se convierten a un arreglo de datos con la finalidad de poder direccionar la información que queremos presentar al usuario. De igual manera se da lectura a la imagen con la que trabajaremos convirtiéndola a datos manipulables para el lenguaje de programación y así poderla presentar en la interfaz con el usuario.

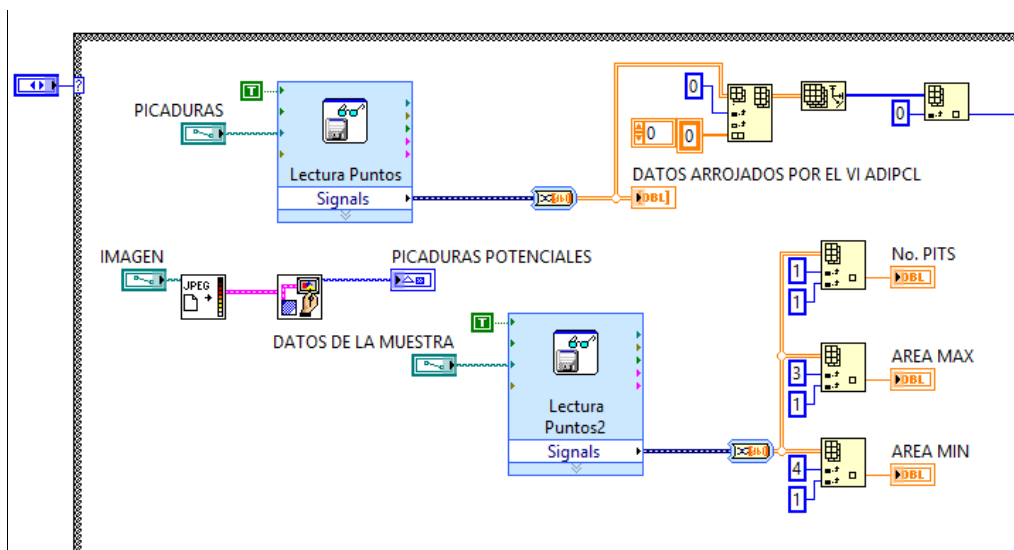


Figura 3.9 Programación lectura de datos.

Cuando se está programando y deseamos conocer los datos con los que vamos a trabajar y que en este caso de debe dar lectura, usamos una herramienta del entorno de LabView la cual nos ayudara a visualizar la estructura del archivo, en este trabajo es una tabla donde nos muestran los datos de las potenciales picaduras. Esta herramienta lleva el nombre de “Read From Measurement File” se encuentra dentro de la paleta de programación FILE I/O del bloque Programming. Al momento de abrir la herramienta se abre un cuadro que sirve para configurar la forma en la que queremos usar el archivo a leer, tales son el formato de lectura, número y delimitación los datos con los que trabajaremos tal y como lo muestra la figura 3.10.

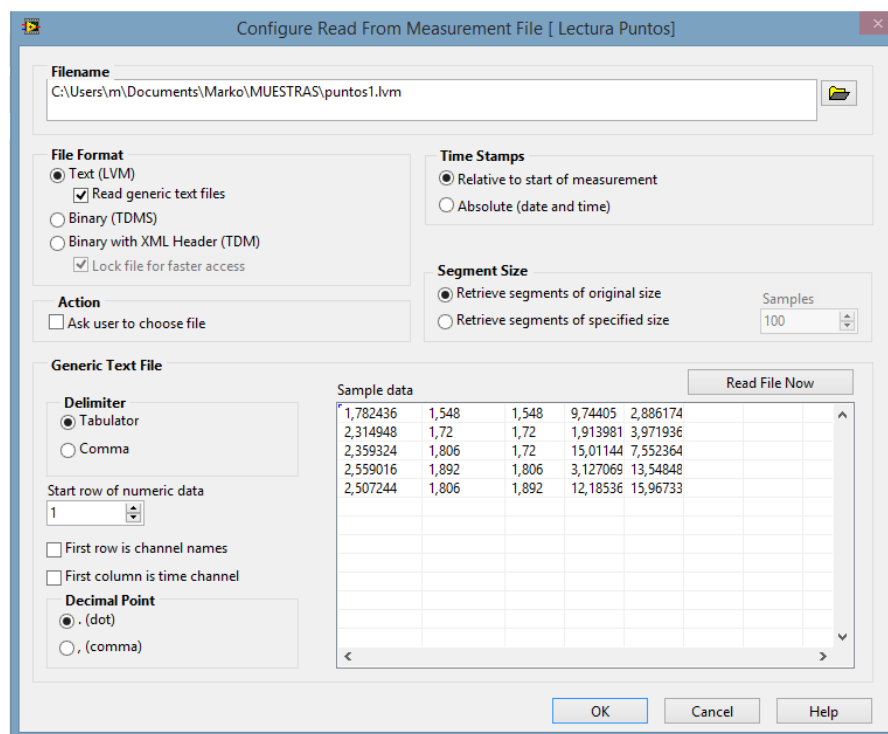


Figura 3.10 Configuración de Read From Measurement File.

Posteriormente para manipular y poder mostrar los datos dinámicos del Measurement File estos se convierten a arrays o arreglos con la función “Convert from Dynamic Data” que convierte los datos a una tabla manipulable.

3.2.3.1.2 Iniciar estación de trabajo

Una vez hecha la lectura de la base de datos es necesario inicializar la estación de trabajo, para esto se necesita un setpoint o punto de referencia para poder empezar adecuadamente y de manera justa con los movimientos de los ejes X y Y que conforman la estación. Para llevar a cabo este proceso se adecuaron sensores de fin de carrera (Figura 3.11) con ayuda de botones tipo pulsador.

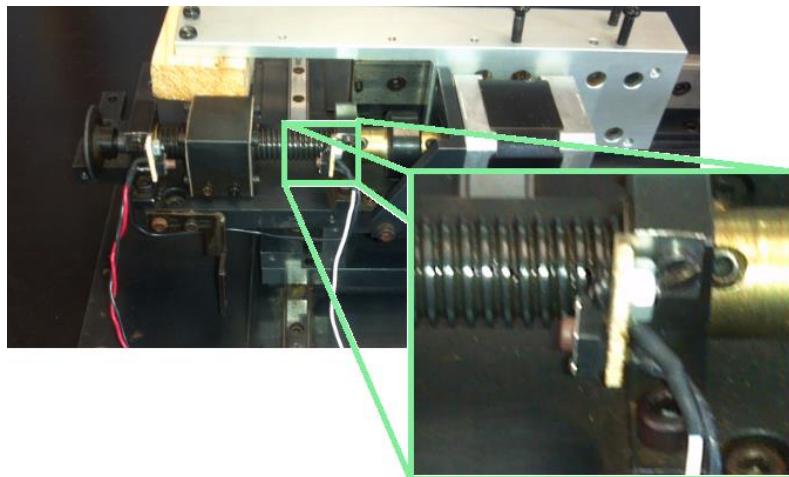


Figura 3.11 Sensor de fin de carrera.

El inicio de la estación de trabajo consiste en presionar el botón de OK de la ventana principal para comenzar el movimiento de los motores hacia donde están posicionados los sensores de fin de carrera. El setpoint toma lugar cuando las bancas ubicadas en los tornillos sin fin de cada motor hacen contacto con los

sensores de fin de carrera. Cuando se ubica el set point, la estación esta lista para el siguiente paso.

Unas de las varias formas encontradas para inicializar la estación de trabajo es usando la función “Stacked Sequence Structure” la cual se encuentra dentro de la paleta de programación structures y a la vez dentro del bloque Programming. Esta función es una estructura de secuencia la cual puede contener varios sub-diagramas o frames los que realiza consecutivamente hasta terminar todo el ciclo.

La función Stacked Sequence Structure en este proyecto se usó para el movimiento de los motores a pasos (figura 3.12), de tal manera para esta etapa de inicializar la estación se usó una estructura con solo dos frames y dentro de cada frame otra estructura para cada uno de los motores los cuales se detendrán solamente que los motores hagan contacto con el sensor de fin de carrera, en este punto la estación de trabajo se encontrara en el set point.

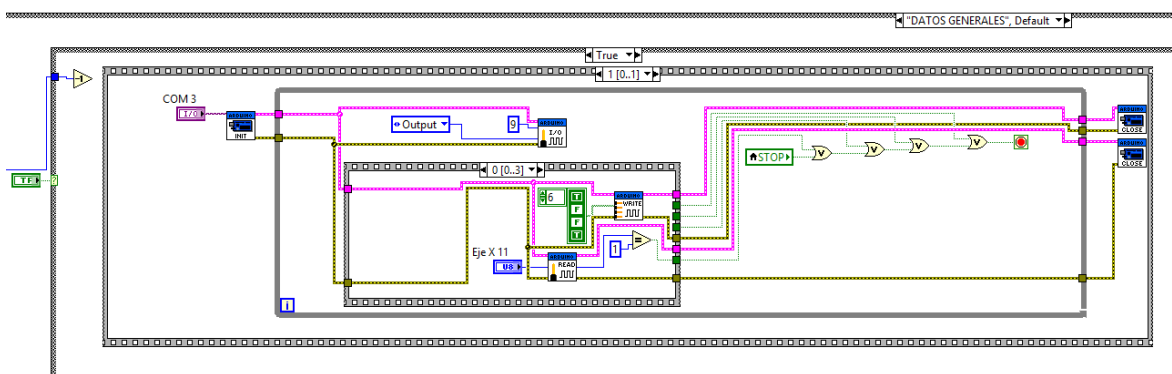


Figura 3.12 Programación para inicializar la estación de trabajo.

3.2.3.1.3 Aplicación del barrido completo

Una vez inicializado la estación de trabajo en el set point, podemos elegir la opción para un barrido completo de la muestra.

El código de programación (Figura 3.13) del barrido convencional se encuentra dentro de una estructura case y no entrara a esta hasta que el usuario presione el botón de INICIAR. Posteriormente se encuentra una estructura de secuencia, esta estructura al terminar cada secuencia de programación realiza la siguiente, esto hasta terminar todo el ciclo. La estructura solo contiene dos estados de secuencia, en los cuales realiza un barrido de ida y otro vuelta del barrido, los dos en el eje X, aumentando una unidad en el eje Y por cada recorrido y así poder barrer la muestra completa.

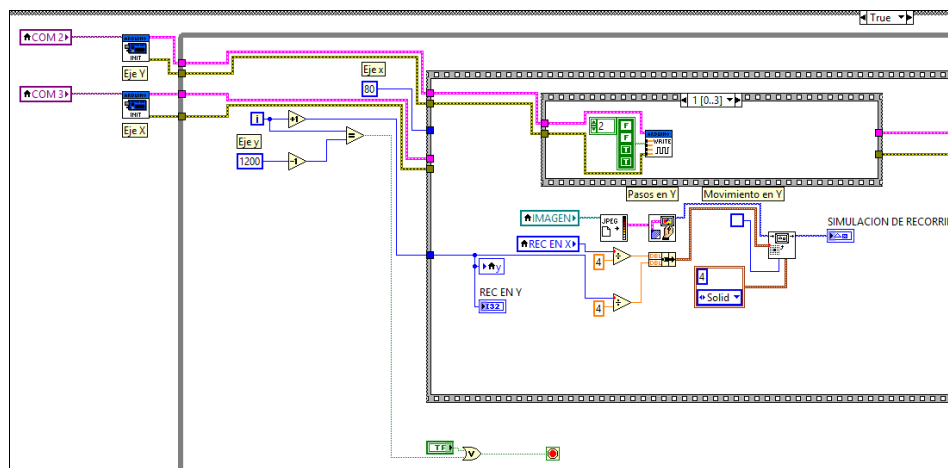


Figura 3.13 Programación barrido completo.

Además de hacer posible un barrido completo esta parte de la programación también contiene la simulación del recorrido real, la cual se presenta en la interface gráfica del usuario. Mediante el código de programación (figura 3.14) se pueden hacer dos procesos simultáneamente, uno es el barrido completo y el otro es la simulación del recorrido. Para la simulación se necesita la imagen de la muestra ya analizada por el ADIPCL, la imagen se mostrara con un fondo negro con coloridos en las partes donde se encuentran las posibles picaduras. Lo anterior es logrado gracias a las funciones que se encuentran en la paleta Graphics & Sounds que se encuentra en el bloque programming. Los bloques de programación utilizados varían según su función, primeramente se utilizó el bloque Read JPEG File, se usa para leer un archivo de imagen y crea los datos necesarios para poder presentarla en pantalla, el siguiente VI que se utiliza es el Draw Flattened Pixmap VI, el cual dibuja el un mapa de bits dentro de la imagen para poder dibujar sobre ella, el siguiente bloque de programación es el Draw Point VI, este lo utilizamos para dibujar un punto sobre la imagen el cual nos da el curso y posición del movimiento XY sobre la imagen que se está analizando.

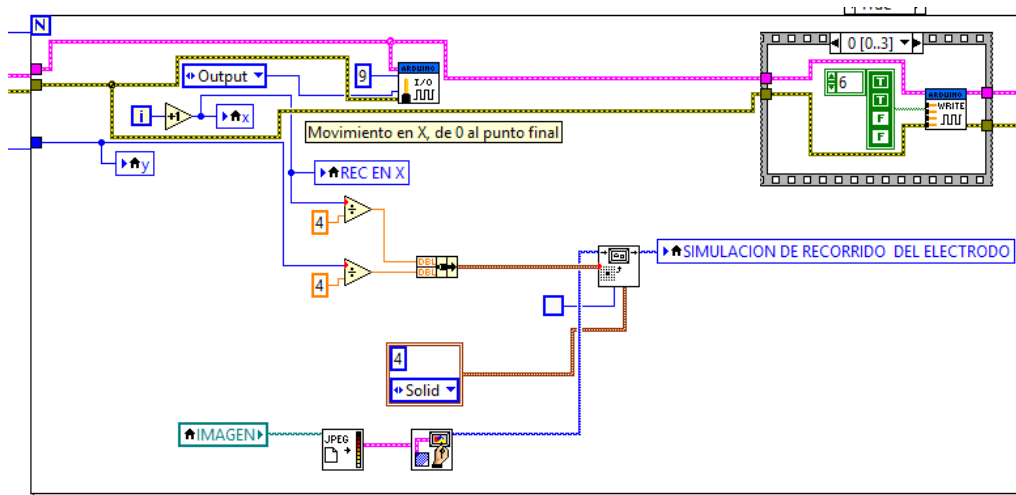


Figura 3.14 Barrido completo y simulación del recorrido.

3.2.3.1.4 Aplicación de algoritmo para desplazamiento diagonal sobre los ejes XY

Una parte muy importante del software que hace posible que el recorrido del barrido sea el más corto posible entre las picaduras potenciales detectadas por ADIPCL es la programación (Figura 3.15), la cual está basado en el algoritmo de Bresenham (9)(Anexo A). En esta parte del código mediante operaciones simples se optimiza el movimiento en cualquier dirección dentro de los ejes X y Y.

Las funciones se encuentran dentro de los bloques Numeric y Comparison dentro del mismo bloque programming.

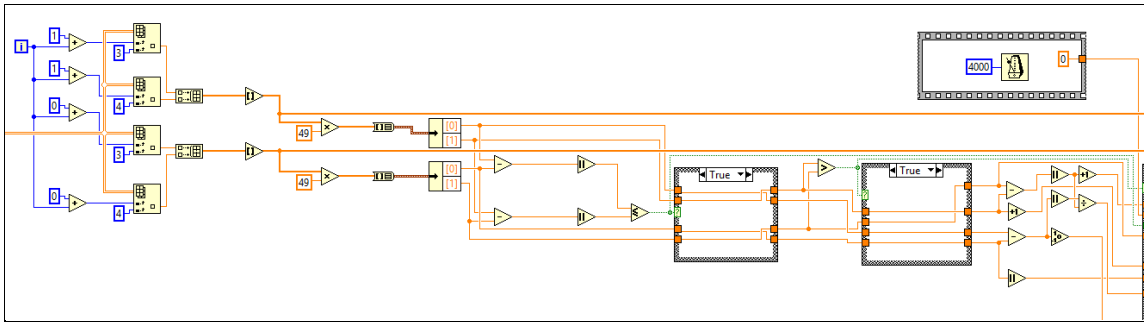


Figura 3.15 Algoritmo movimiento lineal.

Al igual que en el recorrido completo, en la programación del recorrido por coordenadas también se presenta la simulación del recorrido así como el movimiento de los motores simultáneamente (Figura 3.16).

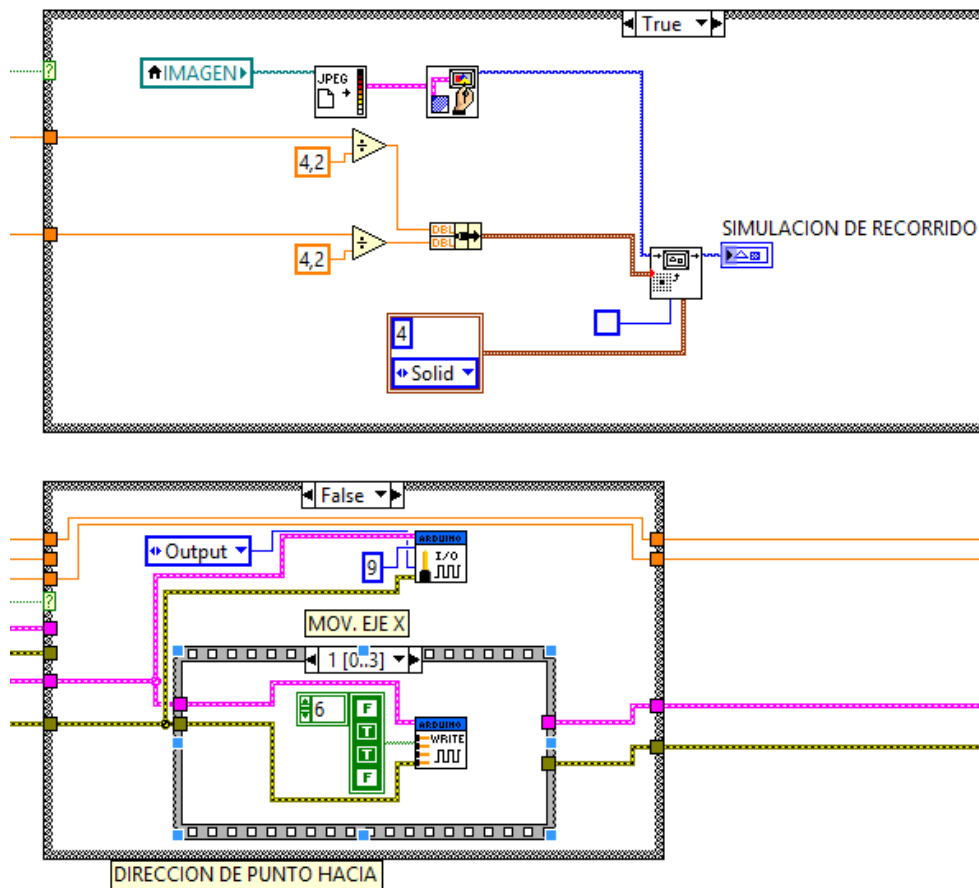


Figura 3.16 Simulación del recorrido y movimiento de motores.

3.2.3.1.5 Algoritmo Bresenham

El algoritmo Bresenham es una manera elegante y digital para realizar trayectorias punto por punto y en todas las dimensiones o ejes que necesitemos, es ampliamente usado en máquinas CNC y en impresión de gráficos. También se usa para dibujar rectas en cualquier ángulo en dispositivos gráficos rasterizados, como el monitor de una computadora utilizando los pixeles en función de la inclinación del ángulo de la recta a dibujar.

La principal forma de trabajar del algoritmo Bresenham como ya se hizo mención anteriormente es en función de la inclinación del ángulo de la recta a dibujar.

Para esto es necesario tener la ecuación de la recta en el plano (ecuación 3.1).

$$(y_2 - y_1) = m(x_2 - x_1) \quad \text{ecuación 3.1}$$

Donde "m" es la pendiente de la recta y (x_1, y_1) es el punto inicial de la recta.

Para llegar al punto final de la recta se va incrementando "x" en una unidad hasta el valor final y solo se tiene que calcular la parte entera de "y" (Figura 3.16).

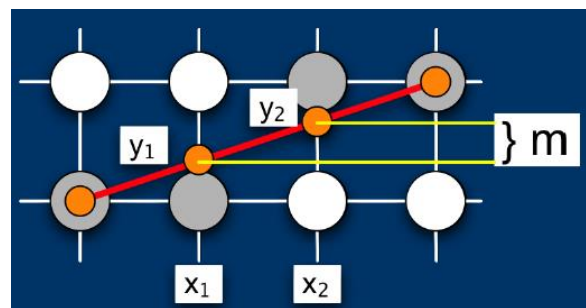


Figura 3.17 Incremento de "y" mediante la pendiente m

El único problema en la deducción de este algoritmo es cuando incrementamos al variable “y”, ya que no siempre que se incremente la variable “x” vamos a incrementar “y”. Entonces sabemos que $m=dy/dx$, dado que $dy= y_2-y_1$ y $dx= x_2- x_1$, estas ecuaciones nos dicen cuanto se incrementa “y” por cada incremento de “x” en este caso estamos aplicando el algoritmo Bresenham con rectas con pendientes menor a 45° , “m” será menor a 1. Con esto necesitamos una nueva variable que inicie con valor de cero le vamos sumando “m” por cada ciclo, la variable será “r” y cuando $r \geq 1$ significa que “y” debe de incrementarse, acto siguiente hacemos $r=r-1+m$, se continua el ciclo hasta que $x= x_2$. (10)

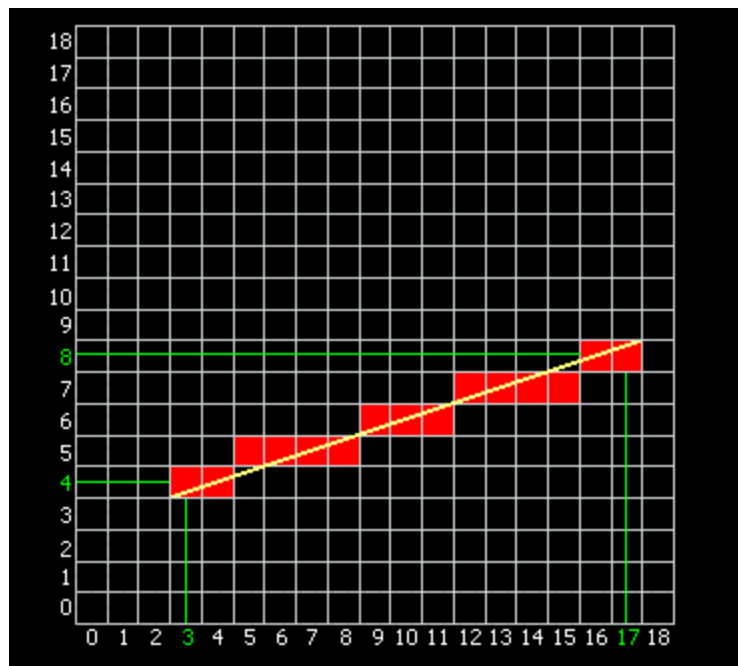


Figura 3.18 Algoritmo Bresenham en plano cartesiano. (11)

Capítulo 4 Resultados y discusiones

4.1 Instrumento virtual de control (Programación grafica virtual)

Se diseñó desarrollo e implemento un sistema de control virtual XY con la plataforma de programación para instrumentación virtual LabVIEW 2013. Como resultados relevantes del diseño podemos resaltar que el control opera en dos modos, haciendo un Barrido completo o un Barrido puntual. En los casos que se elija el modo de Barrido puntual el controlador solicita al operador archivo con la orientación cartesiana de las picaduras potenciales previamente de terminadas por el sistema ADIPCL. En la programación por instrumentación virtual del controlador se incluyen estructuras modulares de programación haciendo la ejecución del instrumento virtual más eficiente (programación por jerarquía) además de permitir tener una comunicación bidireccional con la tarjeta de interfaz Arduino UNO y a su vez un control eficiente, preciso y exacto de los motores a pasos que ejecutan el desplazamiento de los ejes X Y de la plataforma de trabajo XY. La programación incluye el algoritmo Bresenham con el que se puede realizar trayectorias punto por punto utilizando la ruta más apropiada y en todas las dimensiones o ejes que necesitemos, el algoritmo Bresenham es ampliamente usado en máquinas CNC y en impresión de gráficos.

4.2 Interfaz gráfica con el usuario.

El instrumento virtual de control cuenta con una interfaz gráfica con el usuario, amena y amigable que permite, una interacción simple del VI de control con el usuario. Utiliza imágenes y objetos gráficos que presenta información y otras acciones disponibles del VI de control proporcionando un entorno sencillo para la comunicación entre usuario y VI de control.

La interfaz gráfica del VI de control cuenta con una interfaz dividida en tres pestañas, cada pestaña nos presentara las acciones y funciones necesarias para lograr los objetivos del programa.

4.2.1 Ventana principal

La primera ventana (Figura 4.1) nos muestra el VI de control, es usada para ingresar al sistema la información de la número de picaduras potenciales, área máxima y mínima, tabla de datos que nos muestra las áreas de estas picaduras, sus longitudes transversales, las coordenadas de la posición en la que se encuentran dentro del área del espécimen y la imagen del espécimen con el que vamos a trabajar información proporcionada por ADIPCL.

En esta ventana también podremos configurar los puertos de comunicación de la tarjeta Arduino, como los sensores de fin de carrera los cuales nos ayudaran a delimitar el área de trabajo.



Figura 4.1 Pantalla principal

4.2.2 Barrido completo

La ventana de barrido (Figura 4.2) cuenta con la imagen ya analizada y procesada que nos ofrece el VI LCIA, cuenta con los botones de control de inicio y paro, para la opción de barrido completo. Dentro de la imagen se mostrara un puntero en movimiento que nos indica el avance que lleva el electrodo al ejecutar el barrido en el espécimen el cual se coloca en la plataforma de trabajo XY.

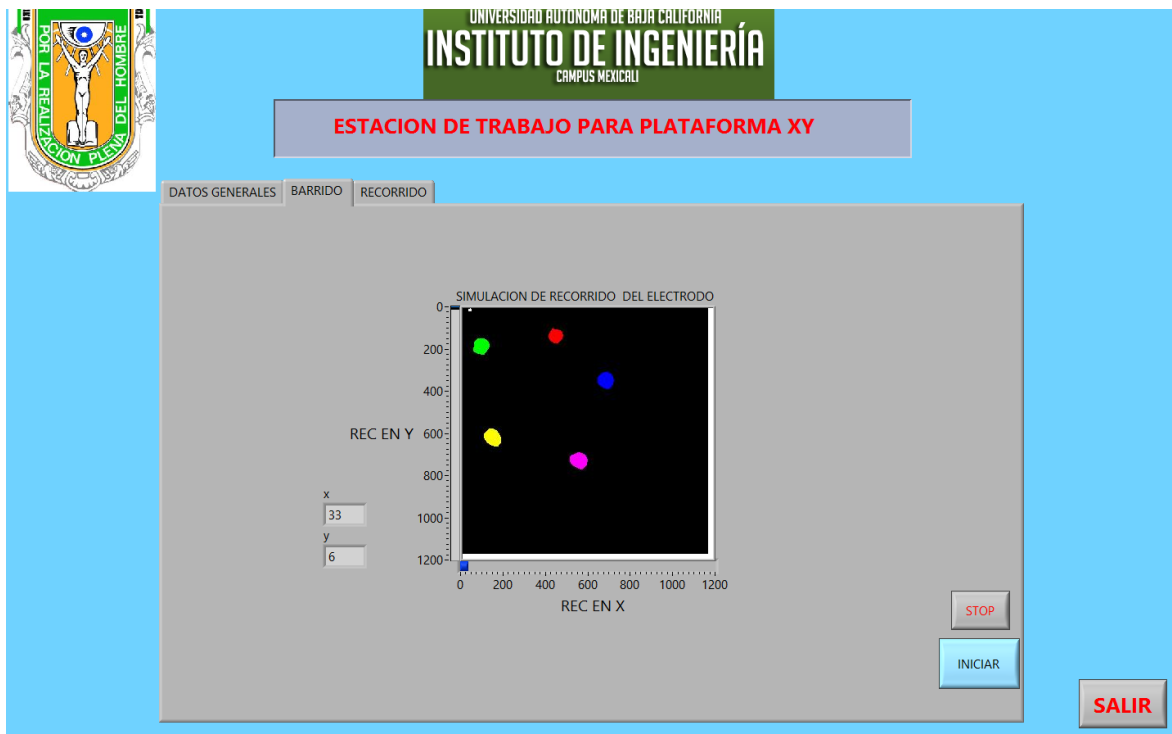


Figura 4.2 Pantalla barrido completo

4.2.3 Recorrido por coordenadas

Al igual que la ventana de barrido, la (Figura 4.3) muestra la ventana para recorrido optimizado la cual cuenta con la imagen de las picaduras potenciales proporciona el VI LCIA, en ella puede verse el desplazamiento optimizado e inteligente del electrodo utilizando la ruta más corta determinado por el algoritmo Bresenham.

La ventana de información de datos de las picaduras potenciales, como son su área, su longitud transversal, y la posición en coordenadas de las mismas.



Figura 4.3 Pantalla recorrido por coordenadas

4.3 Calculo del tiempo de medición y comparación con un sistema SVET comercial

El índice de barrido máximo de la estación de trabajo para electroquímica del scanner modelo 370 EG&G PAR reportada por el fabricante es de 2 mm/s (10). Por lo tanto el tiempo de barrido para una longitud de 2.54 centímetros (eje X) de una muestra de 2.54 x 2.54 cm. será de 25.4 s a la velocidad descrita. Si el paso en el eje Y se asume como de 5 μm , el número de líneas exploradas será de $50,800 \mu\text{m} / 5 \mu\text{m} = 10,160$ barridos sobre la superficie para su completa exploración. De los valores anteriores se tiene que para barrer cada línea se requiere de un tiempo de 25.4 s por lo que el barrido total de un espécimen

requiere de un tiempo de $10,600 \times 25.4 \text{ s} = 269,240 \text{ s}$ aproximadamente 75 horas de barrido (más de 3 días).

El tiempo para el barrido de la muestra completa con SVET también depende del número de picaduras y le toma cerca de 2 minutos por picadura incluyendo el tiempo del posicionamiento del electrodo vibrante sobre el centro virtual de la picadura. Así, que para una muestra de $2.54 \times 2.54 \text{ cm}$. con un contenido de 20 picaduras, el tiempo de barrido con el equipo SVET cuyo desarrollo se ha descrito aquí, será cerca de 40 minutos por lo que el tiempo total incluyendo el barrido de reconocimiento óptico y de reconocimiento de imagen será 175 minutos aproximadamente 3 horas. Comparado con las 75 horas del equipo comercial de SVET el tiempo obtenido es 25 veces menor y solo representa el 4% del tiempo requerido para el equipo comercial de SVET.

Conclusiones

Se diseñó y desarrollo la instrumentación requerida para el control de una estación de trabajo XY para aplicación de las técnicas de barrido con electrodo SRET y SVET. La programación de la instrumentación se implementó utilizando técnicas, algoritmos herramientas y métodos de instrumentación virtual para programación en el entorno de la plataforma de programación LabVIEW 2013.

Se diseñó en el entorno de LabView una interfaz gráfica amigable para el usuario final. La interfaz gráfica ofrece información completa y suficiente para la operación de una estación de trabajo XY.

Tomando en cuenta el proceso, se determinaron los requerimientos de rediseño del movimiento XY para adaptarlo al uso de técnicas de barrido con electrodo, implementando principalmente sensores de fin de carrera que permiten delimitar el área de trabajo así como el punto de origen y partida para el electrodo.

La programación en LabView es modular y estructurada esto garantiza que los procedimientos para control virtual implementados se ejecuten en tiempo real.

Cada módulo de programación implementado para el instrumento virtual de control se ejecuta por flujo de datos de programa “Dataflow Programing” esto asegura una ejecución eficiente del instrumento virtual.

El instrumento virtual está constituido por los siguientes moduls.

Modulo para Lectura de base de datos de ADIPCL. Lee la información registrada por ADIPCL. Los datos del registro contienen el número, dimensiones y

orientación (ubicación en el plano cartesiano) de las picaduras potenciales determinadas por ADICPL.

Modulo Iniciación para la estación de trabajo. Posiciona en el origen el electrodo de la estación de trabajo evitando problemas de precisión en la ubicación del electrodo en los centros de las picaduras.

Barrido completo. Realiza un barrido completo si así lo desea el usuario del sistema. El barrido cubrirá el área total de la muestra en cada punto (la precisión depende de la resolución del movimiento XY).

Recorrido por coordenadas. Este recorrido posiciona el electrodo en las picaduras potenciales previamente determinado por ADIPCL. Utiliza el algoritmo Bresenham el cual permite determinar el menor recorrido posible para posicionar el electrodo en una picadura.

Finalmente se realizaron pruebas de operación del movimiento XY para los diferentes métodos de control propuestos en esta tesis. Las pruebas consistieron en la calibración y ajuste de la instrumentación virtual desarrollada en este trabajo con la finalidad de minimizar los márgenes de desfase de posición del porta electrodo de la estación de trabajo XY.

LabVIEW es una plataforma de programación para instrumentación virtual modular por flujo de datos eficiente y segura tiene la posibilidad de absorber los recursos de la computadora para garantizar que el procesador de la misma dedique el mayor porcentaje de su capacidad en la ejecución del instrumento virtual desarrollado garantizando una operación en tiempo real. Incluye el manejo

de una diversidad muy amplia de sistemas de interfaz entre los más importantes entrada y salida de señales eléctricas, video, audio, vibración, temperatura entre otras. Esto garantiza poder instrumentar y automatizar virtualmente diversos sistemas tantos como nuestra imaginación lo permita.

El trabajo aquí desarrollado se concluyó con éxito salvo limitaciones económicas presentes en todo proyecto.

Referencias bibliográficas

1. **Chicala, Ind. Carlos.** *Adquisicion de Datos*. Primera Edicion.
2. **Rogelio Ramos, Roumen Zlatev, Benjamin Valdez, Margarita Stoytcheva, Mónica Carrillo,.** *LabVIEW 2010 Computer Vision Platform Based Virtual Instrument and Its Application for Pitting Corrosion Study*. Mexicali, Mexico : Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2013. Vol. 2013.
3. *Novel SVET approach and its application for rapid.* **R. Ramos, R. K. Zlatev, M. S. Stoytcheva, B. Valdez, and S.** no. 1, s.l. : Novel SVET ECS Transactions, 2010, Vol. 29.
4. *Applications of the scanning reference electrode technique to.* **K. R. Trethewey, D. A. Sargeant, D. J. Marsh, and A. A. Tamimi.** no. 1-4, s.l. : Corrosion Science, 1993, Vol. 35.
5. *Measurement and evaluation of corrosion and corrosion protection (3). Characterization of localized corrosion: scanning vibrating electrode technique.* **Shibata, S. Fujimoto and T.** no. 9, s.l. : Denki Kagaku, 1996, Vol. 64.
6. *Design of LabVIEW-based software for the control of sequential injection analysis instrumentation for the determination of morphine.* **C. E. Lenehan, N. W. Barnett, and S. W. Lewis.** no. 4, s.l. : Journal of Automated Methods and Management in Chemistry, 2002, Vol. 24.

7. *Novel SVET approach and its application for rapid pitting corrosion studies of chromatized aerospace aluminum alloy.* **R. Ramos, R. K. Zlatev, M. S. Stoytcheva, B. Valdez, and S. Kiyota.** pp. 23-31, Novel SVET ECS Transactions, pág. 2010.
8. *Localized Corrosion.* **H. Isaacs, R. Staehle, B. Brown, J. Kruger and A. Agarwal.** Houston, Tex, USA : NACE, 1974.
9. **J.E.Bresenham.** *Algorithm for computer control of a Digital Plotter.* s.l. : IBM System Journal, 1965.
10. <http://serdis.dis.ulpgc.es/~ii-fgc/Tema%20%20-%20Primitivas%20D.pdf>.
[En línea]
11. <https://sites.google.com/site/proyectosroboticos/trayectorias>. [En línea]
12. *An ultrasensitive vibrating probe for measuring steady extracellular currents.* **Nucitelli, L. Jaffe and R.** no. 2, s.l. : Journal of Cell Biology, 1974, Vol. vol. 63.
13. **Instrument, National.** How Do I Install the LabVIEW Interface for Arduino Toolkit Using VIPM?
<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/A20FBBD36820669086257886004D5F4D>. [En línea]
14. **Philippe Marcus, Florian Mansfel.** *Corrosion Science And Engineerin* . 2006.
15. **Fontana, Mars G.** *Corrosion Engineering Third Edition.* 1986.
16. **Frankel, G. S.** *The Ohio State University.*

17. **A.C. Bastos, A.M Simoes, M. G. Ferreira.** 2003.
18. **Raicho Raichev Lucien Veleva, Benjamin Valdez.** *Corrosion de metales y degradacion de materiales.* 2009.
19. **Skoo Douglas A, Holler F. James, Hieman Timothy.** *Principios de analisis instrumental.*
20. **Oltra, R.** CNRS. France : Universite de Bourgogne.
21. **Irigoyen, Rogelio Arturo Abraham Jose Maria Ramos.** *Desarrollo de metodologia e instrimentacion para la medicion y caracterizacion precisa de corrosion localizada.* Mexicali : s.n., 2011.
22. **Federico Miyara, Luis A. Lahoz.** *Introduccion al analisis frecuencial y al ruido electrico.* 2003.
23. *Pitting corrosion characterization by SVET applying a synchronized noise suppression technique.* **R. Ramos, R. K. Zlatev, M. S. Stoytcheva, B. Valdez, S. Flores, and A.M.Herrera.** no. 1, s.l. : ECS, 2010, Vol. vol. 29.
24. **Arduini.** <http://www.arduino.cc/>. [En línea] 2014.
25. **Analisis y procesamiento de imágenes, National Instruments Alliance Member.** <http://www.tracnova.com/tracnova-pub/An%E1lisis%20&%20Proc.Im%E1genes.pdf>. [En línea] 2014.

An algorithm is given for computer control of a digital plotter.

The algorithm may be programmed without multiplication or division instructions and is efficient with respect to speed of execution and memory utilization.

Algorithm for computer control of a digital plotter

by J. E. Bresenham

This paper describes an algorithm for computer control of a type of digital plotter that is now in common use with digital computers.¹

The plotter under consideration is capable of executing, in response to an appropriate pulse, any one of the eight linear movements shown in Figure 1. Thus, the plotter can move linearly from a point on a mesh to any adjacent point on the mesh. A typical mesh size is 1/100th of an inch.

The data to be plotted are expressed in an (x, y) rectangular coordinate system which has been scaled with respect to the mesh; i.e., the data points lie on mesh points and consequently have integral coordinates.

It is assumed that the data include a sufficient number of appropriately selected points to produce a satisfactory representation of the curve by connecting the points with line segments, as illustrated in Figure 2. In Figure 3, the line segment connecting

Figure 1 Plotter movements

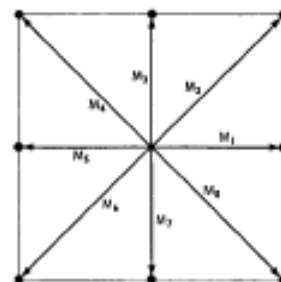
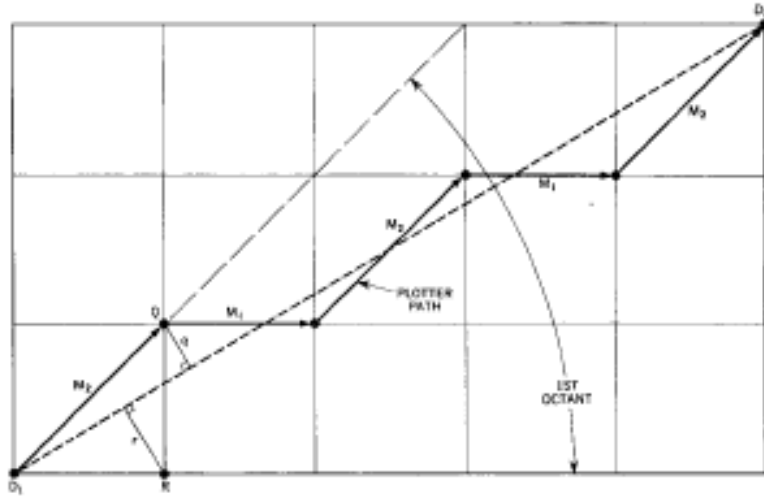


Figure 2 Curve defined by linear segments joining data points



Figure 3 Sequence of plotter movements



the two adjacent data points $D_1(x_1, y_1)$ and $D_2(x_2, y_2)$ is shown on the mesh, drawn on an enlarged scale. Also shown is the path actually taken by the plotter in accordance with the algorithm. In each instance, the mesh point nearest the desired line segment is selected. For example, since Q is closer to the line segment than R , Q is chosen as the second mesh point in the path taken by the plotter in approximating the desired segment joining D_1 and D_2 .

In the first case to be considered, it is assumed that D_2 lies in the first octant, relative to a rectangular coordinate system obtained by translation of the origin to D_1 . It is apparent that the plotter movement can be accomplished by a sequence of moves involving only M_1 and M_2 , as illustrated in Figure 3.

In Figure 4, an (a, b) coordinate system obtained by translation of the origin to D_1 is shown. Consequently, the new coordinates of D_2 are $(\Delta a, \Delta b) = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$.

When the plotter has progressed to the point P_{i-1} , as indicated in Figure 4, the next movement is either M_1 (to the point R_i) if $r_i < q_i$, or M_2 (to the point Q_i) if $r_i \geq q_i$.

It follows from similar triangles that $r'_i - q'_i$ has the same sign as $r_i - q_i$. Since the segment D_1D_2 lies in the first octant, $\Delta a > 0$. Thus, $\nabla_i = (r'_i - q'_i)\Delta a$ also has the same sign as $r_i - q_i$, and may be used for computational convenience in selecting the appropriate movement, either M_1 or M_2 . Later in the paper, ∇_i is shown to satisfy the recursive relation:

$$\nabla_1 = 2\Delta b - \Delta a$$

$$\nabla_{i+1} = \begin{cases} \nabla_i + 2\Delta b - 2\Delta a & \text{if } \nabla_i \geq 0 \\ \nabla_i + 2\Delta b & \text{if } \nabla_i < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

where

$$\Delta a = x_2 - x_1, \quad \Delta b = y_2 - y_1. \quad (2)$$

algorithm
for first
octant

The values of ∇_i computed by means of (1) and (2) are used to determine the movement of the plotter:

$$\text{if } \begin{cases} \nabla_i < 0, & \text{execute } m_1 \\ \nabla_i \geq 0, & \text{execute } m_2 \end{cases}, \quad i = 1, \dots, \Delta a, \quad (3)$$

where

$$m_1 = M_1 \quad \text{and} \quad m_2 = M_2. \quad (4)$$

Expressions (1), (2), (3), and (4) constitute the algorithm for the present case. For other octants, the right members of each equality in (2) and (4) must be modified.

Before indicating this modification, the recursive relation (1) is shown to hold. The notation employed in Figure 4 is as follows: $(a_{i-1}, \hat{b}_{i-1})$ is used to denote the coordinates of P_{i-1} . Consequently, the coordinates of R_i and Q_i are, respectively, $(a_i, \lfloor b_i \rfloor)$ and $(a_i, \lceil b_i \rceil)$, where " $\lfloor \cdot \rfloor$ " and " $\lceil \cdot \rceil$ " are used to denote the *floor* and *ceiling* operators.² Denoting the ordinate of S_i by b_i , the coordinates of S_i are (a_i, b_i) .

proof of
the recursive
relation

This notation is used to rewrite the expression for ∇_i :

$$\nabla_i = (r'_i - q'_i)\Delta a = [(b_i - \lfloor b_i \rfloor) - (\lceil b_i \rceil - b_i)]\Delta a.$$

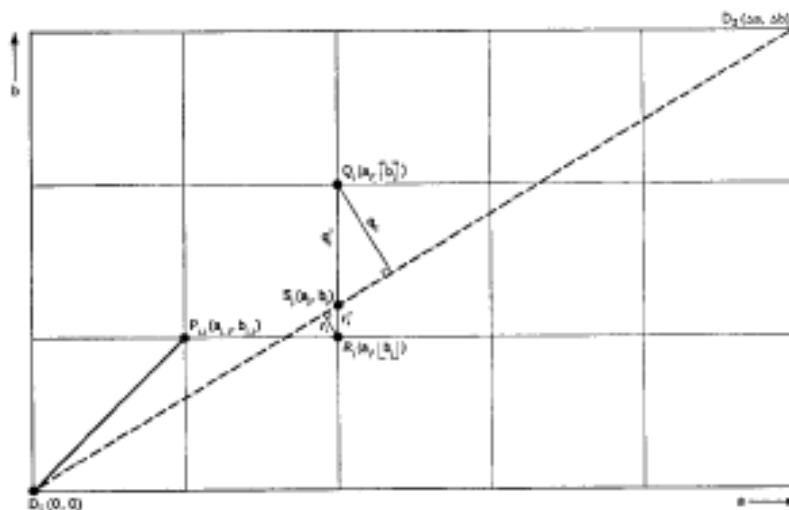
By noting that $b_i = (\Delta b / \Delta a)a_i$,

$$\nabla_i = 2a_i\Delta b - (\lfloor b_i \rfloor + \lceil b_i \rceil)\Delta a.$$

Since the line segment D_1D_2 lies in the first octant, $a_i = a_{i-1} + 1$. By definition, $\lceil b_i \rceil = \hat{b}_{i-1} + 1$ and $\lfloor b_i \rfloor = \hat{b}_{i-1}$. These relations are used to rewrite the latter expression for ∇_i in a form free of a_i and b_i :

$$\nabla_i = 2a_{i-1}\Delta b - 2\hat{b}_{i-1}\Delta a + 2\Delta b - \Delta a.$$

Figure 4 Notation for the algorithm



Applying the initial condition for the coordinates of P_0 , $a_0 = 0$ and $\delta_0 = 0$,

$$\nabla_i = 2\Delta b - \Delta a.$$

If $\nabla_i \geq 0$,

$$\delta_i = \delta_{i-1} + 1,$$

so that

$$\begin{aligned}\nabla_{i+1} &= 2(a_{i-1} + 1)\Delta b - 2(\delta_{i-1} + 1)\Delta a + 2\Delta b - \Delta a \\ &= \nabla_i + 2\Delta b - 2\Delta a.\end{aligned}$$

If $\nabla_i < 0$,

$$\delta_i = \delta_{i-1},$$

so that

$$\begin{aligned}\nabla_{i+1} &= 2(a_{i-1} + 1)\Delta b - 2\delta_i\Delta a + 2\Delta b - \Delta a \\ &= \nabla_i + 2\Delta b.\end{aligned}$$

Thus (1) has been shown to hold.

other
octants

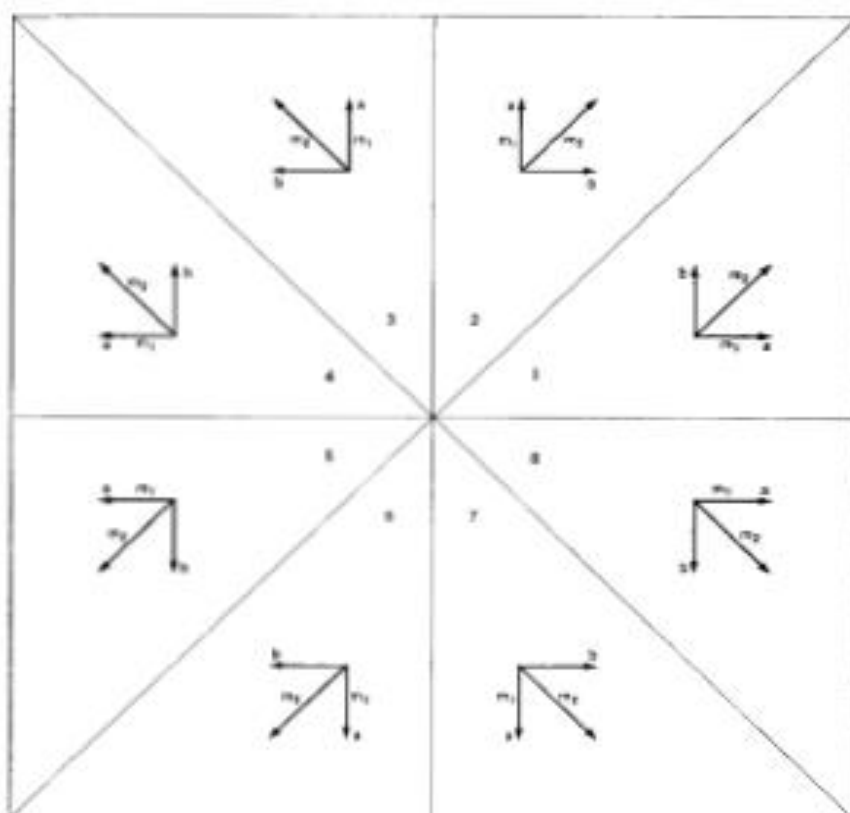
The second data point has been assumed to be in the first octant with respect to the first data point. If the second data point lies in another octant, an (a, b) rectangular coordinate system is again chosen with origin at the first data point, but with the axes oriented individually for each octant, as shown in Figure 5. Directions associated with the plotter movements m_1 and m_2 are also indicated. This information is summarized in the left columns of Table 1 together with the assignments made to m_1 and m_2 . Thus, the variants of Equations (1) and (4) have been specified for each of the eight octants, and the reader may verify that, in conjunction with (2) and (3) as previously stated, they comprise a correct formulation for the general case.

To complete the algorithm, a computational procedure is needed to determine the applicable octant for an arbitrary pair of data points so that the appropriate forms of (2) and (4) can be determined. The form of (2) depends on the sign of $|\Delta x| - |\Delta y|$.

Table 1 Determination of form of Equations 2 and 4

Δx	Δy	$ \Delta x - \Delta y $	OCT	Δa	Δb	X	Y	Z	m_1	F	m_2	G
≥ 0	≥ 0	≥ 0	1	$ \Delta x $	$ \Delta y $	1	1	1	M_1	(1, 0, 0, 0)	M_2	(1, 0, 0, 0)
≥ 0	≥ 0	< 0	2	$ \Delta y $	$ \Delta x $	1	1	0	M_2	(0, 1, 0, 0)	M_1	(1, 0, 0, 0)
≥ 0	< 0	≥ 0	8	$ \Delta x $	$ \Delta y $	1	0	1	M_1	(1, 0, 0, 0)	M_3	(0, 0, 0, 1)
≥ 0	< 0	< 0	7	$ \Delta y $	$ \Delta x $	1	0	0	M_1	(0, 0, 0, 1)	M_3	(0, 0, 0, 1)
< 0	≥ 0	≥ 0	4	$ \Delta x $	$ \Delta y $	0	1	1	M_2	(0, 0, 1, 0)	M_4	(0, 1, 0, 0)
< 0	≥ 0	< 0	3	$ \Delta y $	$ \Delta x $	0	1	0	M_2	(0, 1, 0, 0)	M_4	(0, 1, 0, 0)
< 0	< 0	≥ 0	5	$ \Delta x $	$ \Delta y $	0	0	1	M_3	(0, 0, 1, 0)	M_4	(0, 0, 1, 0)
< 0	< 0	< 0	6	$ \Delta y $	$ \Delta x $	0	0	0	M_3	(0, 0, 0, 1)	M_4	(0, 0, 1, 0)

Figure 5 Axes orientation



To find the form of (4), Boolean variables X , Y , and Z , corresponding to Δx , Δy , and $|\Delta x| - |\Delta y|$, are introduced. As shown in Table 1, these variables assume the value 0 or 1, depending on whether or not the correspondent is negative. To determine the assignment of m_i , the function

$$F(X, Y, Z) = (XZ, YZ, \bar{X}Z, \bar{Y}Z),$$

found by inspection of Table 1, is introduced. Correspondence between values assumed by F and the assignment of m_i is indicated by columns headed F and m_i . Similarly,

$$G(X, Y) = (XY, \bar{X}Y, X\bar{Y}, \bar{X}\bar{Y})$$

is used in conjunction with the G - and m_i -columns of Table 1 to make the appropriate assignment to m_i .

The algorithm can be programmed without the use of multiplication or division. It was found that 333 core locations were sufficient for an IBM 1401 program (used to control an IBM 1627). The average computation time between successive incrementations was approximately 1.5 milliseconds.

A functionally similar algorithm reported in the literature³ is described as requiring 513 core positions and 2.4 milliseconds between successive incrementations.⁴

concluding
remarks