



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE
MATERIALES AVANZADOS S. C.**

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS DE POSGRADO.

**Comportamiento de la Corrosión en
Aleaciones Expuestas a Nuevos Catalizadores.**

Tesis:

Como requisito para obtener el grado de:

Maestro en Ciencia de Materiales

Presenta:

Ing. Gabriela Reyes Durán

Director de Tesis:

M. C. Adán Borunda Terrazas

Chihuahua, Chih.

Abril 2013

Agradecimientos.

Al culminar un logro más en la vida, hay que reconocer a las personas que estuvieron detrás de ti aportando ánimo, consejos y sabiduría.

Por lo cual me permito agradecer a mi familia, la cual siempre a estado presente en cada una de mis metas y logros.

A mi director de tesis M. C. Adán Borunda Terrazas por su apoyo y motivación para llevar hasta el final esta investigación.

Al Dr. Facundo Almeraya por su apoyo y sus conocimientos, para así llevar a cabo este estudio.

Al Dr. José G. Chacón Nava por su disponibilidad y consejos para culminar este proyecto.

A la Ing. Karla Campos Venegas por su apoyo brindado en los análisis de microscopía electrónica de barrido.

Al M.C. Daniel Lardizábal, por su ayuda en la comprensión de los análisis térmicos.

A todo el equipo de análisis químicos, por su apoyo en el análisis elemental de las aleaciones.

A todo el equipo de corrosión y protección, por su ayuda, motivación, compañerismo y conocimiento compartido.

Al CONACYT, por el apoyo brindado en el desarrollo de esta tesis.

Contenido

Agradecimientos	2
INTRODUCCIÓN.....	4
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVO.....	5
OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
CAPITULO I: MARCO TEORÍCO	7
Tipos de procesos de corrosión.	7
Naturaleza electroquímica de la corrosión	9
Aceros.....	10
Catalizadores	12
Inhibidor	14
Tipos de inhibidores.	14
Eficiencia del inhibidor	15
Técnicas electroquímicas:	15
Resistencia a la polarización lineal (LPR).....	16
Ruido electroquímico (Rn).....	16
Pruebas de inmersión	17
Conductividad eléctrica.....	19
CAPITULO II: Metodología experimental.	20
Preparación de muestras.	20
Caracterización.....	25
CAPITULO III: Discusión y Resultados.....	27
CAPITULO IV: Conclusiones.....	44
Recomendaciones.	45
Bibliografía.	46
Anexo.	48

INTRODUCCIÓN.

En la actualidad las demandas por eficientar los procesos de producción van en aumento, donde en su mayoría los contenedores de proceso, tuberías y uniones entre las mismas son fabricadas con materiales como aceros al carbono y aceros inoxidables debido a sus propiedades y costos.

Por otro lado se utilizan sustancias químicas con el fin de llegar a las metas establecidas durante la planificación del proceso mismo. En este caso, los catalizadores son una pieza clave, ya que son ampliamente utilizados en la industria para acelerar una reacción química preferencial, la cual es aquella que se quiere mejorar, buscando con ello un aumento ya sea en producción o simplemente en la calidad de los reactivos producidos por la misma. Los cuales pueden contribuir en algunas ocasiones a un incremento en la velocidad de corrosión del material en el cual se lleva a cabo dicha reacción. Por lo que en el presente estudio, se evaluarán materiales comerciales para conocer el comportamiento que tendrá el metal en contacto con estas sustancias, lo anteriormente dicho se llevará a cabo con la ayuda de técnicas electroquímicas entre las cuales destacan ruido electroquímico (R_n), pruebas de gravimetría.

En una segunda etapa se evalúan en un medio agresivo, ya que comúnmente los materiales no solo son expuestos a los catalizadores por si solos, si no a una amplia combinación de medio, por lo que se expondrán en una salmuera elaborada con base en el “procedimiento para evaluación de inhibidores de corrosión”. Teniendo ya un medio agresivo como el anteriormente mencionado, se tomará a la tarea de variar las concentraciones de los catalizadores para así conocer su comportamiento, así como realizar diferentes pruebas con un inhibidor de corrosión, habiendo terminado esto, se utilizará una combinación de catalizador – inhibidor, con el fin de observar si la velocidad de corrosión en los materiales decrece, evaluándose con la técnica de resistencia a la polarización lineal (LRP).

JUSTIFICACIÓN.

El uso de nuevos materiales dentro de la industria exige el estudio de las propiedades y comportamientos en los procesos antes de ser aplicados en los mismos.

En este estudio, surgió la interrogante de evaluar el comportamiento corrosivo de nuevos catalizadores a ser utilizados en ambientes industriales. Debido a lo anterior el proveedor, vio la necesidad de llevar a cabo dicho estudio

HIPÓTESIS.

Se espera que este tipo de catalizadores no tendrán ningún efecto en la formación de productos de corrosión en el material, es decir, los catalizadores retardaran la cinética de corrosión. Más al cambiar de medio se espera que la velocidad de corrosión se incremente y se pueda controlar con la adición un inhibidor.

OBJETIVO.

El objetivo principal de este trabajo es determinar el comportamiento posible de deterioro de aleaciones al exponerlas a diferentes catalizadores, utilizando una salmuera y un inhibidor de corrosión, mediante el uso de las técnicas de Ruido Electroquímico (R_n), Gravimétrica o Pérdida de Peso y Resistencia a la Polarización Lineal (LRP).

OBJETIVOS PARTICULARES.

Conocer el comportamiento de los materiales a evaluar, inmersos en los catalizadores, por medio de la técnica de Ruido Electroquímico.

Determinar la pérdida de peso en los materiales a evaluar, al mantenerlos inmersos en los catalizadores, por medio de gravimetría.

Conocer el comportamiento en la velocidad de corrosión en los materiales a evaluar, en un medio de salmuera por medio de la técnica de Resistencia a la polarización lineal (LRP).

Conocer el comportamiento de los materiales, en un medio de salmuera – inhibidor por medio de la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal (LRP).

Conocer el comportamiento de los materiales, en un medio: salmuera - catalizador – inhibidor.

CAPITULO I: MARCO TEORÍCO

Los metales se encuentran en la naturaleza de manera cotidiana en forma de óxidos, sulfuros, sulfatos, carbonatos, etc. Solo los metales nobles aparecen en estado puro. Los demás metales antes de ser utilizados en forma elemental, se necesita aplicarles un proceso de reducción, dicho proceso demanda cierta cantidad de energía para llevarse a cabo. Para que el metal vuelva a su estado termodinámico más estable tendrá que perder dicha energía. El proceso por el cual el metal vuelve a su estado natural es por medio de una oxidación conocida como corrosión [1].

La corrosión se define simplemente como la reacción de un metal o no metal con su medio, llevándose a cabo la destrucción del material bajo una acción química o electroquímica del ambiente al que está expuesto, afectando sus propiedades físicas y químicas [2].

La corrosión de metales se puede considerar como una metalurgia a la inversa, donde dicho metal trata de regresar a su estado de menos energía, que es como se encontraba en la naturaleza antes de ser trabajado [3].

Tipos de procesos de corrosión.

Son dos los mecanismos por los que se puede llevar a cabo el proceso de corrosión:

- a) Oxidación directa o corrosión seca de toda la superficie metálica: Éste proceso implica reacciones químicas, donde el material reacciona con un medio no electrolito [4]. Normalmente este mecanismo ocurre en metales a altas temperaturas donde no hay la posibilidad de que exista agua en su estado líquido. Supone una oxidación (donde el metal sufre de pérdida de electrones (e^-)) de toda la superficie por igual. Es característico que los productos de corrosión se adhieran en la superficie, incluso pueden llegar a formar una barrera física que se opone al proceso del ataque posterior [1].

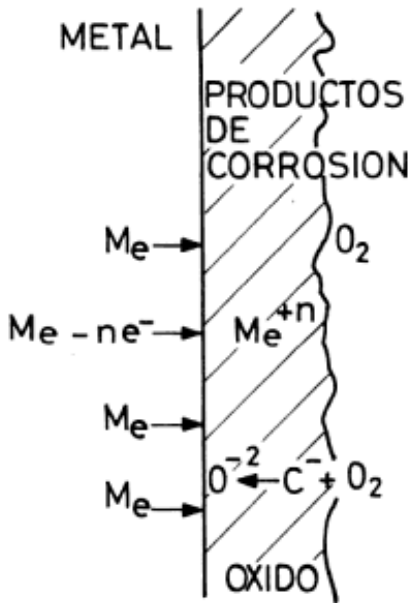


Fig 1. Muestra el fenómeno de corrosión en un metal.

- b) Mediante la intervención de una solución acuosa o corrosión húmeda: El metal se disuelve en un electrolito formando cationes metálicos, lo cual implica la transferencia de cargas eléctricas a través de la interfase metal/medio [4]. Ocurre en la mayoría de los casos ya que el agua se encuentra presente en todos los medios naturales y/o sintéticos que nos rodean (suelo, atmosfera, mar, ácidos, sales, etc.). Se forma así una 'pila' que para que funcione constantemente exige que el ánodo y el cátodo se encuentren unidos por medio de un contacto eléctrico y es indispensable que el circuito se mantenga cerrado a través del electrolito mediante la circulación de iones. En cuanto a los productos de corrosión se distribuyen heterogéneamente por la superficie del metal y no pueden tener ningún carácter protector [1]

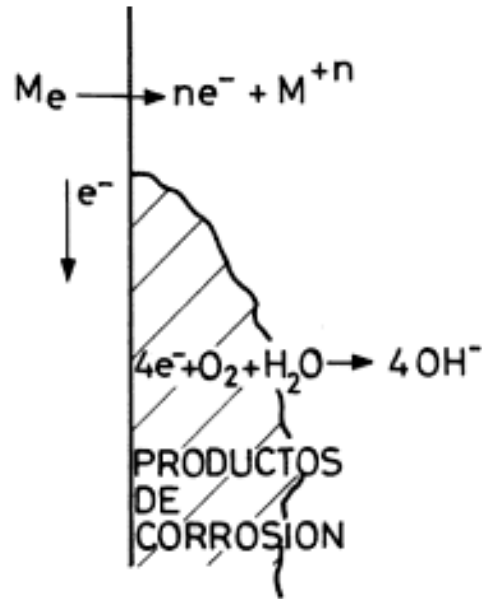


Fig 2. Muestra el fenómeno de corrosión electroquímica de un metal.

Naturaleza electroquímica de la corrosión

La corrosión en metales y aleaciones en soluciones acuosas o en cualquier otra solución iónicamente conductiva se lleva a cabo por un mecanismo electroquímico. Esto requiere de cuatro elementos: Ánodo, Cátodo, Conductor metálico y Electrolito conductor.

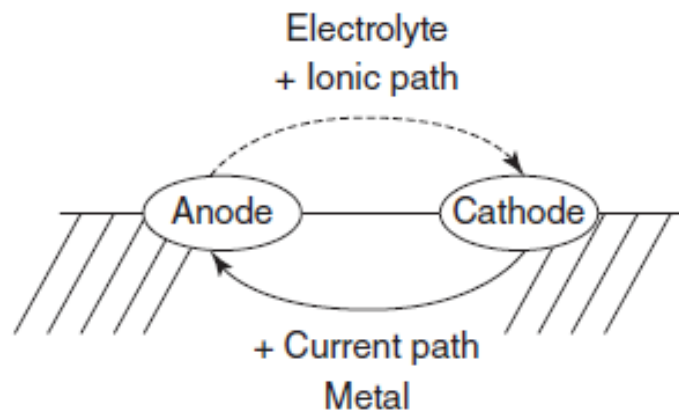


Fig . Los cuatro elementos para el proceso de corrosión.

El ánodo metálico libera iones de la superficie del metal que van hacia la solución. En este proceso se dejan electrones en la superficie del metal. Por lo tanto, el

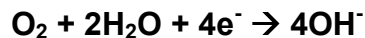
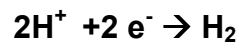
metal se oxida y pierde electrones en el ánodo, la reacción anódica se puede escribir, como:



Los iones metálicos son llevados del ánodo al cátodo mediante el electrolito conductor. El electrolito es normalmente líquido, y al tener una alta concentración de iones tiene una mayor conductividad lo que lo hace mejor electrolito.

Existen dos tipos de iones: aniones y cationes. Los aniones con carga negativa se mueven hacia el ánodo, mientras los cationes con carga positiva se mueven hacia el cátodo.

Las reacciones que ocurren normalmente en el cátodo son: reducción de ion hidrogeno o reducción del oxígeno.



Los electrones dejados por los iones del metal en el sitio anódico son transportados hacia el sitio catódico por medio del conductor metálico.

La corrosión electroquímica se lleve a cabo los cuatro procesos deben ocurrir simultáneamente. Por lo que el rango de la reacción anódica es igual a la reacción catódica [4].

Aceros

El acero es un aleación de dos elementos: el hierro y el carbón, siendo este último el que varía en pocas centésimas de uno por ciento, a cerca de 1.60 por ciento. Todos los aceros contienen valores variables de manganeso y silicio, lo mismo que pequeñas cantidades de fósforo y azufre. Pueden contener de la misma manera pequeñas cantidades de otros elementos de aleación que le conferirán propiedades especiales.

Los aceros al carbono son regulados por la cantidad presente de este elemento, las clasificaciones varían desde aceros dulces que contienen 0.1% de carbono, a

los aceros duros que contienen hasta 1.6% de carbono [5]. Estos aceros cuentan con una buena solubilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores. Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria [6].

	Elemento	%W
Acero al Carbono	C	0.15 - 0.20
	Mn	0.6 - 0.9
	P	0.04 max
	S	0.06

Tabla 1. Composición química de un típico acero al carbono.

La utilización de los aceros al carbono es mucho mayor que los aceros aleados y especiales. Se produce en una gran variedad de formas y dimensiones, se puede utilizar en una gran variedad de artículos, maquinas, construcciones, artefactos y objetos [7].

El acero inoxidable 304 es el más versátil y uno de los más usados de la serie 300. Cuenta con excelentes propiedades para conformado y soldadura. No requiere de recocido tras la soldadura para que tenga un buen desempeño y amplia gama de condiciones corrosivas. La resistencia a la corrosión es excelente, en condiciones de servicio intermitente hasta de 870°C y en condiciones de servicio continuo hasta 925°C [8].

	Elemento	%W
Acero 304	C	0.08 min
	Mn	2
	Si	1
	Cr	18 - 20
	Ni	8 - 10.5
	P	0.045
	S	0.03

Tabla 2. Composición química del acero inoxidable 304.

Catalizadores

Un catalizador es una sustancia que introducida en pequeñas cantidades origina un cambio significativo en un sistema reaccionante. De esta forma se puede definir como una sustancia que aumenta la velocidad a la que la reacción química se acerca al equilibrio sin intervenir permanentemente en la reacción.

El catalizador puede estar en la misma fase que los reactantes o no, debido a esto se puede catalogar la catálisis como homogénea, heterogénea o enzimática.

En el caso de la catálisis homogénea, el catalizador se encuentra en la misma fase que al menos uno de los reactantes, éste tipo de catálisis suele ser selectiva y con rendimientos elevados en el producto deseado. Para las aplicaciones comerciales, las reacciones en fase líquida presentan limitaciones de temperatura y presión, y problemas al momento de separar el catalizador de los productos de reacción. El 20% de las reacciones catalíticas comerciales se basan en la catálisis homogénea.

En la catálisis heterogénea los reactantes y el catalizador se encuentran en diferente fase. La situación más común es la catálisis por sólidos con reactantes en fase líquida o sólida. En éste tipo de catálisis la velocidad de reacción a la que transcurre el proceso puede incluir el efecto de la velocidad de los fenómenos de transferencia entre fases sobre la velocidad de la reacción propiamente dicha. Aproximadamente el 80% de los procesos catalíticos comerciales se basan en catálisis heterogénea. La importancia de la catálisis por sólidos es enorme, pues el 90% de la producción de todos los procesos catalíticos está basada por reacciones catalizadas por sólidos.

Las enzimas son proteínas o aminoácidos de tamaño coloidal, intermedio entre el catalizador homogéneo (molecular) y el heterogéneo (sólido macroscópico). Sin ellos las reacciones bioquímicas y biológicas no ocurrirían. Se caracterizan solo por eficacias y selectividades muy altas [9].

Cabe mencionar que la función del catalizador es acelerar las reacciones químicas directa e inversa en la misma proporción y como consecuencia disminuir el tiempo que se tarda en alcanzar el equilibrio. Si E_1 y E_{-1} son las energías de activación de las reacciones directa e inversa, el catalizador reduce la altura de la barrera de energía activación a un valor E ; por lo que:

$$E_1(\text{cat}) = E_1 - E$$

$$E_{-1}(\text{cat}) = E_{-1} - E$$

Esto es, que las energías de activación de las reacciones directa e indirecta se han reducido en la misma proporción.

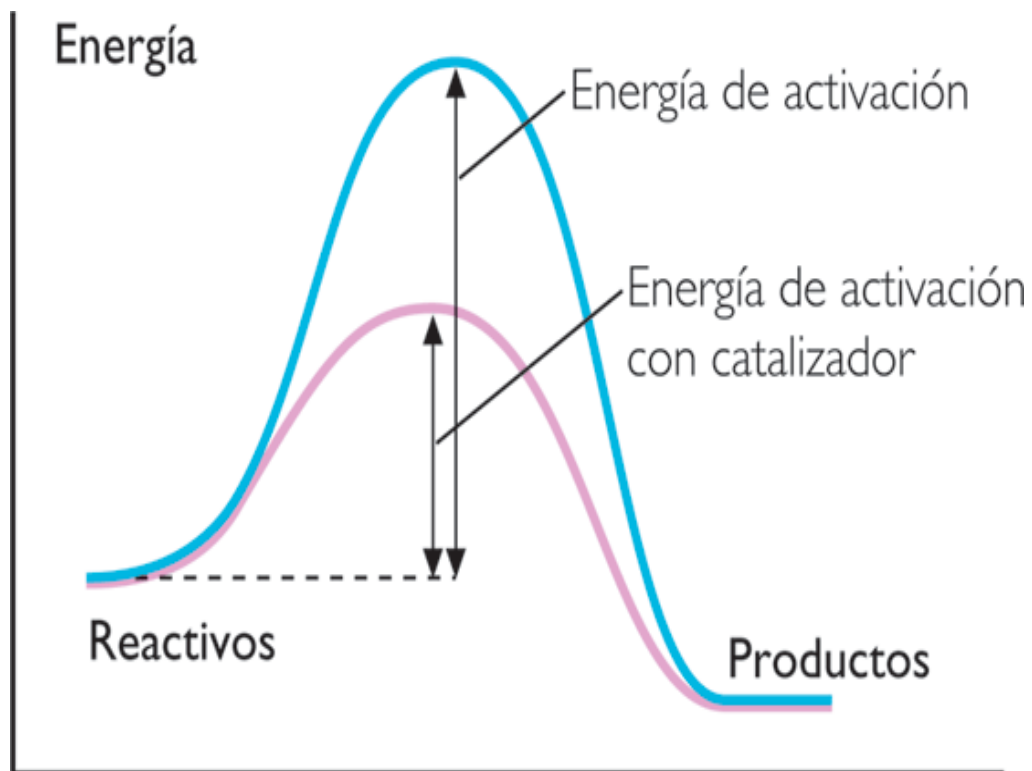


Fig 4. Diagrama de energía potencial mostrando el descenso de la barrera de energía de activación para una reacción catalizada..

La adición de una sustancia llamada inhibidor hace decrecer la velocidad de la reacción química [10].

Inhibidor

Un inhibidor de corrosión es una sustancia química que al ser agregado en un sistema reduce la velocidad de corrosión, es decir, disminuye la densidad de corriente de corrosión.

Tipos de inhibidores.

Los inhibidores de la corrosión pueden clasificarse en:

Los inhibidores anódicos tienden a aumentar la polarización del ánodo mediante la formación de una capa pasiva de producto de corrosión, por lo que son llamados pasivantes. La capa de pasividad formada depende de la naturaleza del inhibidor y de las condiciones termodinámicas. Algunos de estos, al ser oxidantes pueden ser perjudiciales si son agregados en concentraciones insuficientes, ya que incrementan el proceso corrosivo sin llegar a formar la capa de pasividad.

Los inhibidores catódicos por su lado incrementan la polarización del cátodo, por alguno de los siguientes procedimientos:

- Dificultando la descarga de los iones H^+ en medio ácido, o del hidróxido en medio básico.
- Reaccionando con el oxígeno disuelto, impidiendo la formación del hidróxido necesario para formar productos de corrosión con el metal.
- Reduciendo las reacciones catódicas por depósito de productos insolubles.

Los inhibidores mixtos son aquellos capaces de inhibir las reacciones catódicas y anódicas simultáneamente.

Los inhibidores de absorción son compuestos orgánicos, normalmente de cadenas largas con grupos laterales, capaces de ser absorbidos por la superficie metálica.

Pueden actuar por alguno de los siguientes mecanismos:

- Aumentando la sobretensión de hidrógeno en las zonas catódicas
- Dificultando la difusión del oxígeno a través de la capa formada
- Dificultando la difusión de los iones metálicos

Eficiencia del inhibidor

Una de las maneras más comunes de evaluación es en función de la reducción porcentual de pérdidas de peso por corrosión, mediante la expresión:

$$\varepsilon = \frac{P_o - P_i}{P_o} * 100$$

Donde P_o y P_i , representan las pérdidas de peso por efecto de la corrosión sin inhibidor y con inhibidor, respectivamente. De este modo, si la pérdida de peso aun vez agregado el inhibidor desciende a valores prácticamente nulos ($P_i \approx 0$) la eficiencia del inhibidor se aproximaría al 100%. Por el contrario, si el efecto del inhibidor fuera inapreciable se observaría una pérdida de peso similar a la que se tenía sin el ($P_i \approx P_o$), por lo que la eficiencia en este caso resultaría prácticamente nula [11].

Técnicas electroquímicas:

Las técnicas electroquímicas son un conjunto de métodos analíticos cuantitativos y cualitativos basado en las propiedades eléctricas que poseen los analitos cuando se encuentran disueltos en una solución. Las técnicas electroquímicas se basan en la imposición de una perturbación al sistema en estudio, registrando la respuesta obtenida. La medición de las variables de corriente y voltaje obtenidas por medio de alguna técnica electroquímica puede proporcionar información sobre velocidad de corrosión, comportamiento de recubrimientos y películas, pasividad, tendencias a picaduras y otros parámetros importantes.

Con el objetivo de determinar la velocidad de corrosión se han aplicado diferentes técnicas electroquímicas, las cuales se basan en las leyes de Faraday, que relacionan el flujo de masa por unidad de área y tiempo, con el flujo de corriente.

La velocidad en los procesos de corrosión depende de la velocidad de dos reacciones, la anódica (oxidación) y la catódica (reducción) [12].

Durante la corrosión, puntos discretos en la superficie del metal que se corroe, tendrán diferentes potenciales electroquímicos. Ya que están unidos

eléctricamente por la masa del metal, la corriente fluirá de uno hasta el otro, mientras que ambos permanezcan en el mismo arreglo.

Resistencia a la polarización lineal (LPR).

La resistencia a la polarización lineal (LPR) es definida como el recíproco de la corriente requerida para producir una unidad de separación en el potencial de ánodo y cátodo.

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i}$$

La teoría de corrosión muestra que la corriente de corrosión es inversamente proporcional a la resistencia a la polarización:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

Donde, B es la constante de Stern – Geary.

La técnica de resistencia a la polarización lineal (LPR) implica la aplicación de un pequeño voltaje (típicamente 10 – 20 mV) a la muestra bajo estudio, mientras es monitoreada la respuesta en corriente. La corriente fluye a través del sistema en estado estacionario y medido, así como la resistencia a la polarización calculada. Los instrumentos comerciales cuentan con un factor de Stern – Geary que permite obtener lecturas directamente en mm/año o m. p. y. (milésimas por año). Esta técnica funciona de manera óptima con electrolitos de alta conductividad, pero no debe de ser utilizada para monitoreo de corrosión en hidrocarburos o sistemas de gas [13].

Ruido electroquímico (Rn).

El ruido electroquímico se denomina a las fluctuaciones en corriente o potencial de naturaleza electroquímica. La mayoría de los procesos de corrosión de metales con de naturaleza electroquímica por lo que tienden a generar este tipo de señales [14].

Este término es utilizado para describir las fluctuaciones de corriente y potencial que ocurren en el electrodo que se está corroyendo. Es producido por los mismos

procesos que producen la corrosión y se realiza entre dos electrodos nominalmente idénticos [15].

Las señales de corriente son medidas por un amperímetro de resistencia cero (ZRA) las cuales no son constantes con el tiempo. EL proceso de corrosión es un proceso estocástico. Esta técnica es no-destructiva y típicamente involucra mediciones a bajas frecuencias de corriente [13].

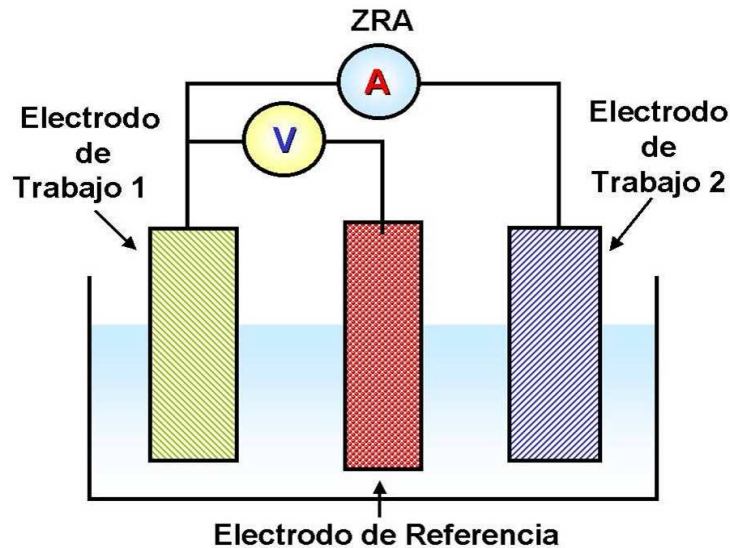


Fig 5. Arreglo de tres electrodos para pruebas de ruido electroquímico [15].

Pruebas de inmersión

Existen diferentes factores que pueden influenciar las pruebas de inmersión realizadas en el laboratorio particularmente las de pérdida de masa. Estos factores incluyen la preparación del espécimen, instrumentos, condiciones de la prueba, los métodos de limpieza del espécimen, la evaluación de resultados, el cálculo y reporte de las velocidades de corrosión.

Los productos de corrosión pueden tener efectos indeseables en el producto químico. La cantidad de posible contaminación puede ser estimado por la pérdida de masa del espécimen, con la adecuada aplicación de las relaciones entre: el área de la superficie corroyéndose, la masa del producto químico manejado y la

duración de contacto de la unidad de masa del producto químico con la superficie que se corroe.

El tamaño y forma de los especímenes variará con el propósito de la prueba, la naturaleza del material y los aparatos usados. Todos los especímenes deben de ser medidos cuidadosamente para permitir el cálculo de las áreas expuestas. El cálculo del área geométrica con variación de $\pm 1\%$ es usualmente adecuado.

Resultados más uniformes pueden ser esperados si la capa substancial del metal es removida para eliminar variaciones en la condición original de la superficie del metal. Esto se puede realizar mediante tratamientos químicos, remoción electrolítica o por desbaste con abrasivos (lijas). Después de la preparación los especímenes deberán ser almacenados en el desecador hasta el momento de ser utilizados.

Los especímenes deberán ser desengrasados, enjuagados con agua, y un adecuado solvente, y secados. Los especímenes secos deberán ser pesados en una balanza analítica con una exactitud de ± 0.5 mg. Si se sospecha que continúan presentes residuos en la pieza, se deberá limpiar y secar de nuevo hasta obtener un peso constante.

Cortos tiempos de exposición pueden dar engañosos resultados en aleaciones que formen capas pasivas, como el acero inoxidable. En estas condiciones se necesitan un tiempo prolongado de prueba, que permitirá romper dicha capa de pasividad, subsecuentemente un ataque más rápido. Consecuentemente, las pruebas de períodos largos son consideradas como más realistas que aquellas que son realizadas en períodos cortos.

Si previstos tasas de corrosión son moderadas o baja, la ecuación siguiente muestra la duración del ensayo propuesto [16]:

:

$$\text{Horas} = \frac{2000}{\text{velocidad de corrosión en milésimas por año}}$$

Conductividad eléctrica

La conductometría es la técnica analítica basada en la reacción lineal que existe entre la concentración de sustancia de un ión en solución y la conductancia eléctrica de estas solución.

La conductividad eléctrica se define como la capacidad de que una sustancia pueda conducir la corriente eléctrica, y por tanto es lo contrario de la resistencia eléctrica, generalmente expresada en microSiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

La conductividad del electrólito varía con la concentración y con la constante dieléctrica de la solución [17].

En general, el flujo de electricidad a través de un conductor es debido a un transporte de electrones. Según la forma de llevarse a cabo este transporte, los conductores eléctricos pueden ser de dos tipos: conductores metálicos o electrónicos y conductores iónicos o electrolíticos, a este segundo tipo pertenecen las disoluciones acuosas.

CAPITULO II: Metodología experimental.

Preparación de muestras.

Se prepararon muestras de acero al carbono y acero inoxidable 304 para las diferentes pruebas que se llevaron a cabo.

Se prepararon las probetas que se utilizarían en las pruebas con las siguientes dimensiones.

<i>Prueba</i>	<i>Dimensiones</i>	<i>Muestra</i>
Estática Acero al carbono e Inoxidable)	Cilindros: 9.5 mm (diámetro) 13 mm (altura) Área de exposición: 5.131 cm ²	

Tabla 3. Electrodo de trabajo empleados en el presente estudio.

Teniendo las probetas, éstas tuvieron una preparación superficial que consistió en desbastarlas desde lija 60 hasta lija 600, hecho esto se enjuagó cada una de ellas con agua corriente, agua destilada y para finalizar con alcohol y fueron secadas con la ayuda de una secadora de aire caliente.

La apariencia final de las probetas se muestra en la figura 6.



Fig 6. Muestra las probetas utilizadas para las pruebas de ruido electroquímico en el estudio.

Se comenzó con la realización de las pruebas de ruido electroquímico (Rn), donde el arreglo experimental consta de dos electrodos de trabajo nominalmente idénticos, un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar. El electrolito que se maneja en éstas fueron los catalizadores.

Las condiciones en las que se llevaron a cabo:

- 1) Temperatura ambiente
- 2) Estático

Las pruebas se realizaron en cada uno de los catalizadores como electrólito. Y midiéndolas fluctuaciones entre ellos para calcular la velocidad de corrosión.

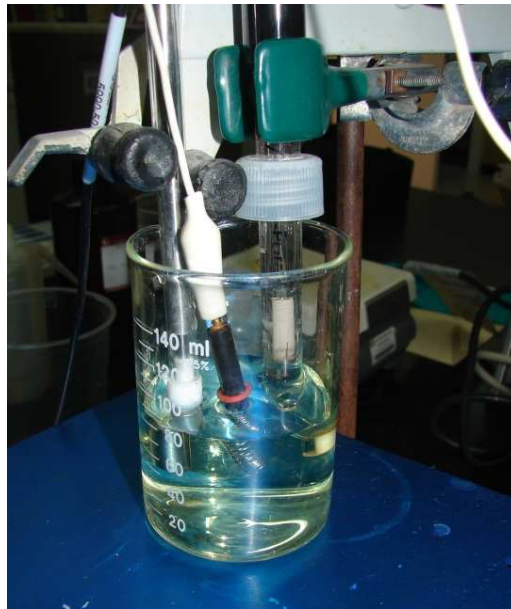


Fig 7. Arreglo experimental

Para las pruebas de gravimetría se prepararon las probetas de las dimensiones que se muestran en la tabla 3.

Teniendo las probetas listas para la prueba cada una ellas fueron introducidas en un tubo de ensayo, en el cual se colocó cada uno de los diferentes catalizadores asegurándose de que la probeta estuviera cubierta por el líquido.

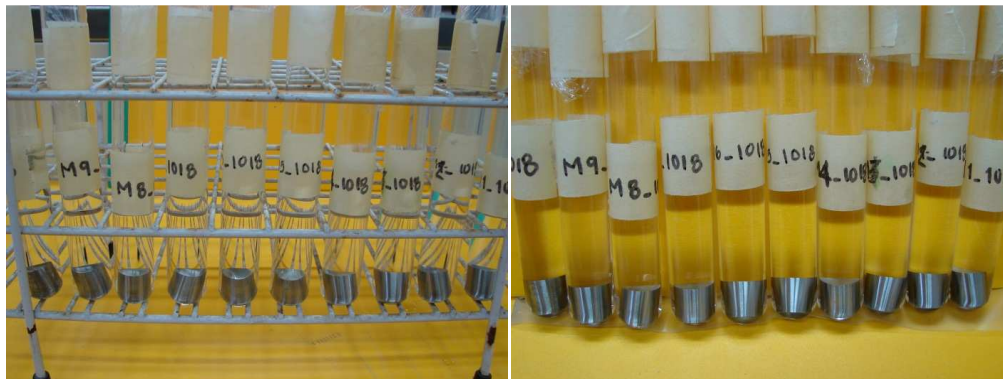


Fig 8. Probetas para pruebas de gravimetría de acero al carbono, a) probetas en tubo de ensayo limpias y secas; b) probetas sumergidas en cada uno de los diferentes catalizadores.

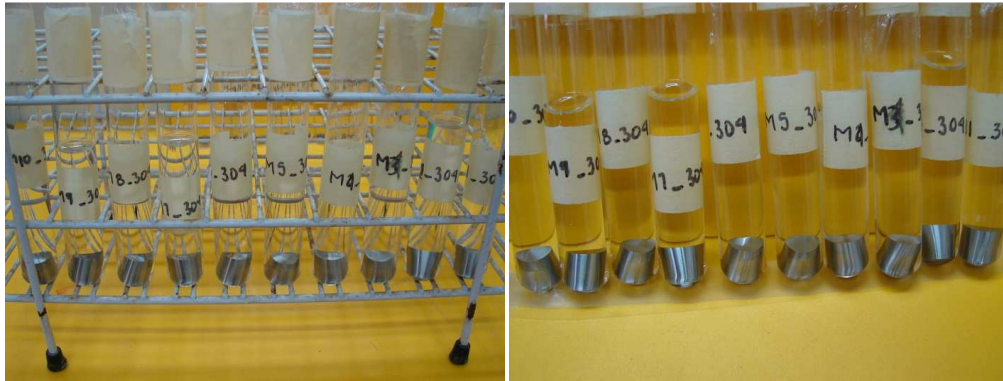


Fig 9. Probetas para pruebas de gravimetría de acero inoxidable 304, a) probetas en tubo de ensayo limpias y secas; b) probetas sumergidas en cada uno de los diferentes catalizadores.

Al tener las probetas inmersas en los diferentes catalizadores fueron colocadas en una gaveta privadas de la luz del sol a temperatura ambiente, el tiempo de exposición fue de dos meses, transcurrido este tiempo se extrajeron las probetas, fueron limpiadas y pesadas repetidas veces [16].

Debido a las bajas velocidades de corrosión obtenidas en las pruebas de ruido electroquímico y las pruebas gravimétricas, se realizaron las pruebas en salmuera con diferentes concentraciones tanto del catalizador como del inhibidor.

Las Pruebas de Resistencia a la polarización lineal se realizaron en un potenciostato – galvanostato, con la ayuda del programa Gill 8.



Fig 10. Muestra las probetas utilizadas para las pruebas de resistencia a la polarización lineal en el estudio.

Las pruebas se corrieron a temperatura ambiente y con un intervalo de potencial de -20mV a 20 mV. Utilizando un arreglo experimental como se muestra en la figura 10, las probetas de ambos aceros fueron montadas en resina y se les incorporo un cable de cobre como conductor eléctrico, se utilizaron un electrodo de referencial de calomel y un electrodo auxiliar de platino. [18]

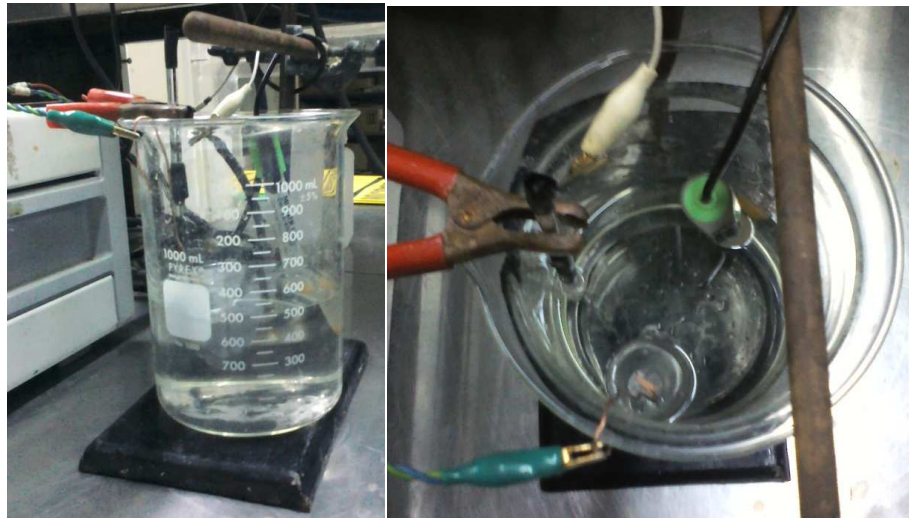


Fig 11. Arreglo electroquímico para las pruebas de resistencia a la polarización lineal.

La metodología de las diferentes combinaciones se expone a continuación:

	PRUEBA	MEDIO	BLANCO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	
	Acero al Carbono	Ruido electroquímico	Catalizador		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Gravimetría		Catalizador		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
RPL		Salmuera	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
			20ppm inhib		20 ppm de cat y 20 ppm de inhib									
		Salm+Inhib	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
RPL		Salmuera			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
			50ppm inhib		20 ppm de cat y 50 ppm de inhib									
		Salm+Inhib	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

304	PRUEBA	MEDIO	BLANCO	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
	Ruido electroquímico	Catalizador		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	Gravimetría	Catalizador		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
				20 ppm									
	RPL	Salmuera	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
			20ppm inhib	20 ppm de cat y 20 ppm de inhib									
		Salm+Inhib	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
				50 ppm									
	RPL	Salmuera		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
			50ppm inhib	20 ppm de cat y 50 ppm de inhib									
Salm+Inhib		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	

Tabla. 4. Matriz experimental.

Materiales y equipos.

- Acero al carbono.
- Acero inoxidable 304
- Lijas
- Pulidora
- Potenciostato - Galvanostato
- Electrodo de platino (EA, electrodo auxiliar)
- Electrodo de calomel (ER, electrodo de referencia)
- Microscopio óptico
- Reactivos de ataque
- Microscopio electrónico de barrido
- ICP-MS Espectrometría de plasma con detector de masas
- AA = Espectrofotometría de Absorción Atómica

Caracterización

Se realizó la caracterización de ambos aceros mediante análisis químicos, ICP-MS = Espectrometría de plasma con detector de masas, AA = Espectrofotometría de Absorción Atómica (EAA). Y con la ayuda del microscopio electrónico de barrido (MEB) obteniendo de éste imágenes de la microestructura y EDAX que nos proporciona información de la cantidad de elementos presentes en porcentaje en peso (%W).

Por otro lado el inhibidor se llevo a TGA para conocer el porcentaje en peso de descomposición de tanto de agua, compuestos orgánicos e inorgánicos. Y a IR obteniendo el espectro IR y así compararlo con la base de datos.

CAPITULO III: Discusión y Resultados.

Para la realización del presente se llevo a cabo en primera instancia la caracterización de los aceros, utilizando el microscopio electrónico de barrido SEM, (por sus siglas en ingles), el microscopio óptico y análisis químicos.

Se prosigió a analizar químicamente los elementos característicos de cada uno de los aceros utilizados, como se muestra:

Composición química del acero al carbono		Composición química del acero 304	
Elemento	% W	Elemento	% W
0.142	% C	0.06	%C
0.278	% Mn	13.303	%Cr
0.018	%S	1.634	%Mn
		6.502	%Ni
		0.052	%S
		0.029	%Si

Fig 12. Muestra el análisis químico obtenido por absorción atómica así como por ICP - masas.

Los resultados obtenidos en el microscopio electrónico de barrido W (SEM) se muestran a continuación.

La microestructura del acero al carbono se muestra a continuación y se observan las dos fases presentes en éste acero, las cuales son ferrita y perlita.

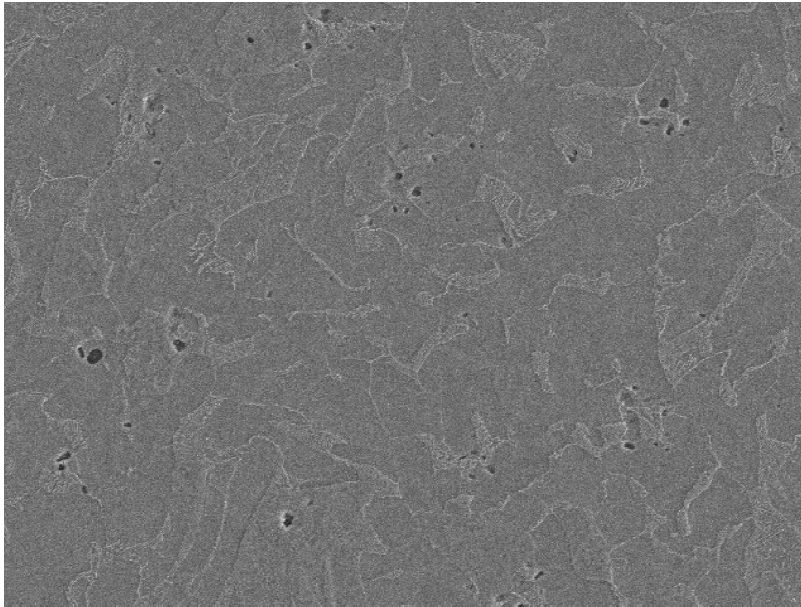


Fig 13. Micrografía del acero al carbono tomada a x1,500 observada en el microscopio electrónico de barrido (SEM), atacada con Nital al 2%.

Y obteniendo un EDAX de su composición química.

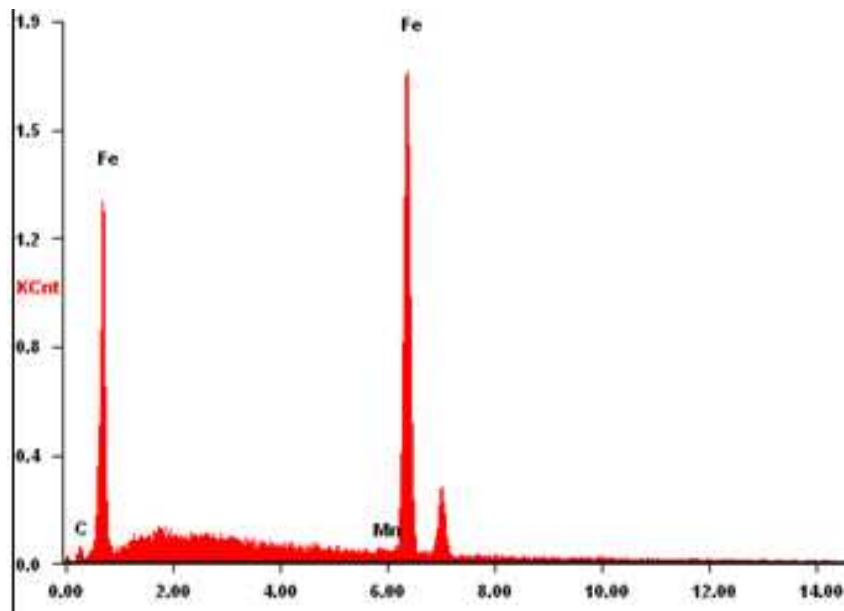


Fig 14. EDAX del acero al carbono tomado en el microscopio electrónico de barrido (SEM), que muestra los %W de los principales elementos en este acero.

	Elemento	%W	%At
Acero al carbono	C K	11.46	37.57
	Mn K	1.05	0.75
	Fe K	87.49	61.68

Tabla 5. Muestra los porcentajes en peso y atómico de los elementos de aleación para el acero, obtenido del MEB.

Se realizó el mismo procedimiento de análisis para el acero inoxidable 304, en el que se observan los granos de austenita de éste acero.

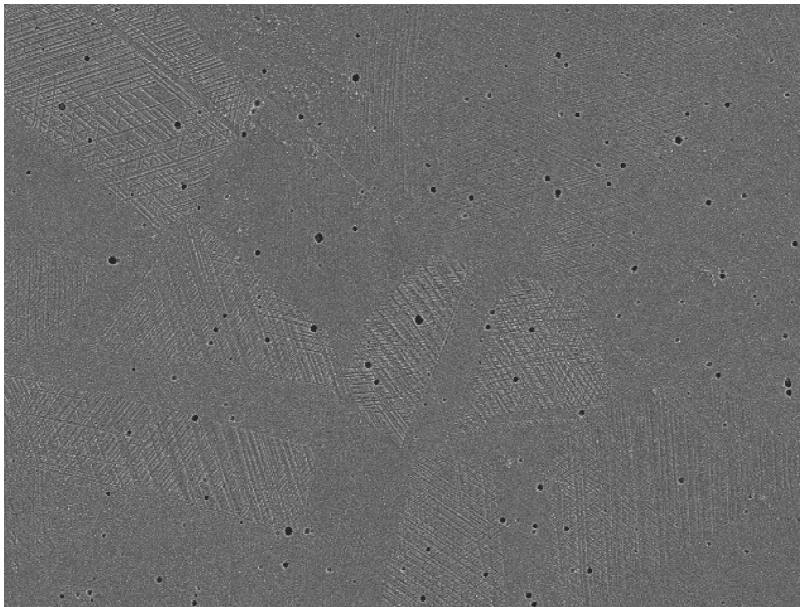


Fig 15. Micrografía del acero inoxidable 304 tomada a x700 en el microscopio electrónico de barrido (SEM), atacada 10mL HNO₃, 20mL HCl y 30mL H₂O.

El EDAX obtenido para este acero se muestra en la siguiente imagen.

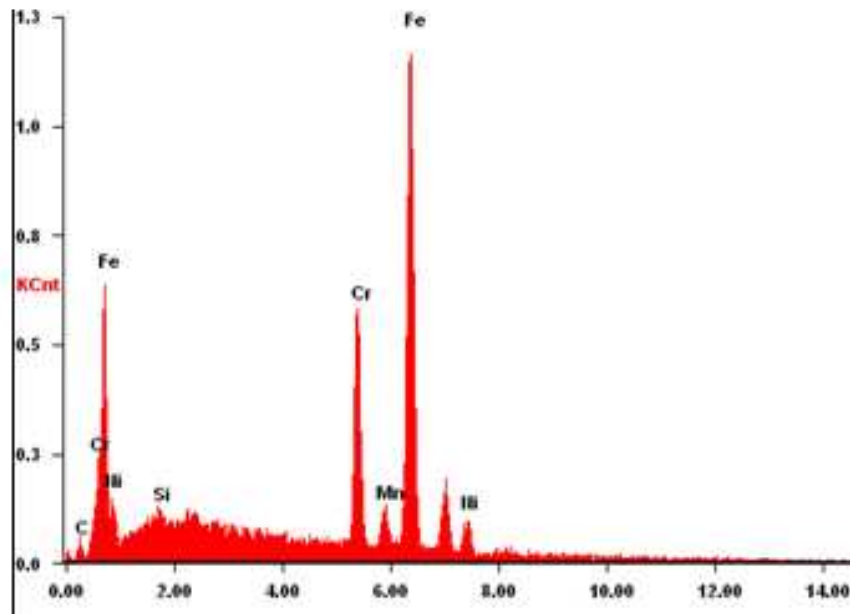


Fig 16. EDAX del acero inoxidable 304 tomado en el microscopio electrónico de barrido (SEM), que muestra los %W de los principales elementos de aleación de este acero.

	Elemento	%W	%At
Acero 304	C K	8.74	30.25
	Si K	1.41	2.08
	Cr K	18.54	14.82
	Mn K	1.8	1.36
	Fe K	62.8	46.74
	Ni K	6.71	4.75

Tabla 6. Muestra los porcentajes en peso y atómico de los elementos de aleación para el acero inoxidable 304, obtenido del MEB.

Se analizaron las muestras en el microscopio óptico a diferentes aumentos, habiendo previamente preparado la muestra y atacado químicamente.

Se obtuvieron las imágenes del acero al carbono caracterizado por presentar dos fases en su microestructura siendo éstas ferrita (α) y perlita.

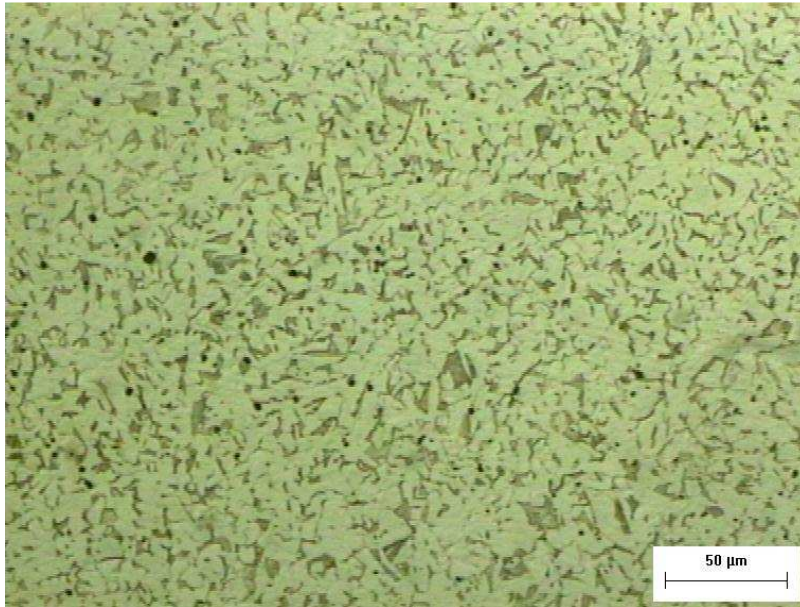


Fig 17. Micrografía del acero al carbono tomada a 200X, atacada con Nital al 2%.

De la misma manera, se obtuvieron las micrografías del acero inoxidable 304, que se caracteriza por presentar los granos de austenita (γ), así como las maclas que se observan de un color oscuro.

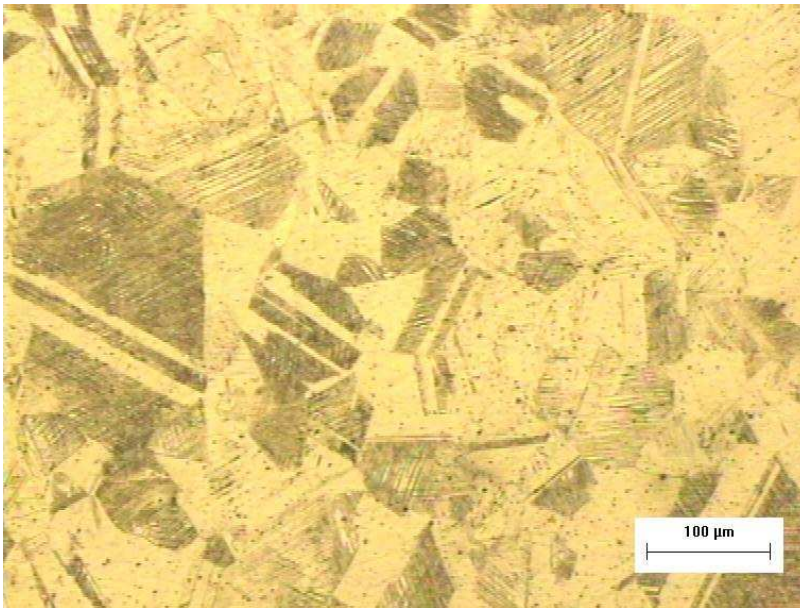


Fig 18. Micrografía del acero inoxidable 304 tomada a 100X, atacada 10mL HNO₃, 20mL HCl y 30mL H₂O.

Por medio de la técnica de Ruido Electroquímico se obtuvieron las siguientes gráficas donde se observan las fluctuaciones en corriente obtenidas en los

materiales de estudio siendo expuestos a cada uno de los catalizadores, cabe destacar que los valores de corriente observados durante el análisis se encuentran en el orden de 10^{-7} mA/cm².

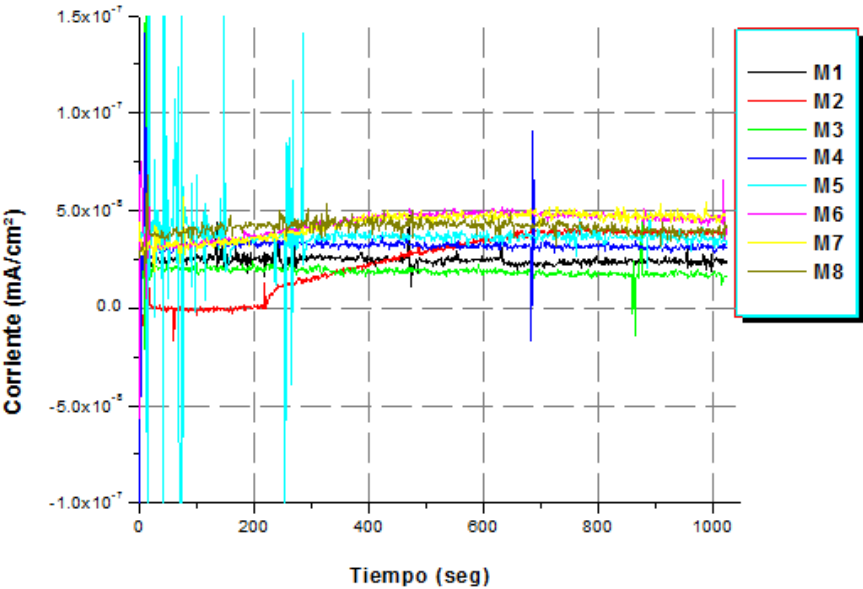


Fig 19. Comportamiento de la corriente de corrosión en el acero al carbono al carbono.

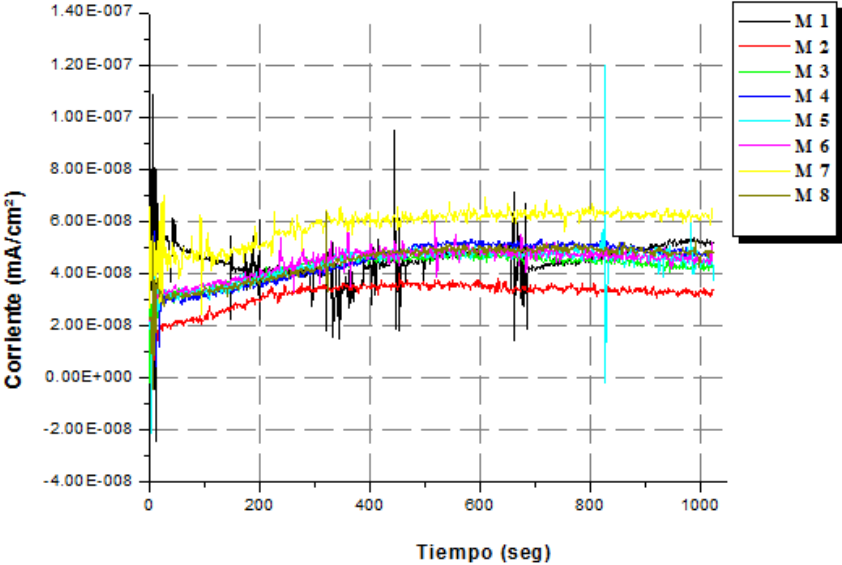


Fig 20. Comportamiento de la corriente de corrosión en el acero inoxidable 304.

Otro valor estadístico utilizado para el análisis del ruido en corriente, es el cociente de la desviación estándar con la raíz media cuadrática, llamado “Índice de localización ó picado” (L.I ó I.P).

$$L.I = \frac{\sigma_I}{i_{rms}}$$

Dependiendo de los valores obtenidos del índice de localización se puede establecer si el proceso de corrosión es localizado, generalizado o mixto como se muestra en la tabla 7.

Índice de Localización	Tipo de Corrosión
0.001 0.01	Generalizada
0.01 – 0.1	Mixta
0.1 – 1.0	Localizada
>1.0	Iniciación de picado

Tabla. 7. Tipo de corrosión en función del índice de localización [19].

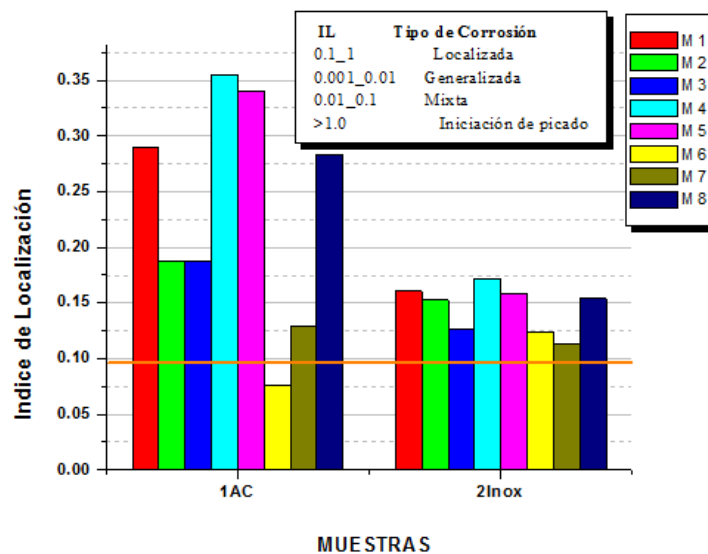


Fig 21. Comportamiento del Índice de Localización para los especímenes.

Habiendo obtenido los resultados analizados con anterioridad, se prosiguieron a realizar las pruebas de inmersión o pérdida de peso, para las cuales se

maquinaron pizas cilíndricas de dimensiones mencionadas en la tabla 3 , las cuales llevaron una preparación superficial de desbaste con papel abrasivo, así como su respectiva limpieza antes de ser expuestas al medio con agua corriente y alcohol, éste con el fin de eliminar los rastros de humedad en las piezas, este mismo procedimiento fue efectuado para los dos materiales analizados.

Transcurrido el tiempo previamente determinado de dos meses de exposición de los materiales en cada uno de los catalizadores, se procedió con la limpieza de las muestras, utilizando diferentes soluciones de limpieza [ASTM G-1 Estándar Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens].

Soluciones de limpieza.

Acero al carbono	Reactivo	Cantidad
	HCl	500mL
	Hexametilentetramina	3.5g
	Agua destilada	Aforé a 1000mL

Tabla 8. Reactivo de limpieza empleado en el acero 1018.

Acero 304	Reactivo	Cantidad
	HNO ₃	100mL
	HF	20mL
	Agua destilada	Aforé a 1000mL

Tabla 9. Reactivo de limpieza empleado en el acero 304.

Por lo que a continuación se muestran los condensados de dichas pruebas. En la tabla 10 se muestra un condensado de los resultados de la prueba de inmersión o pérdida de peso, después de transcurridos los dos meses de exposición, para cada uno de los materiales, encontrándose valores de la velocidad de corrosión en el orden de 10^{-8} - 10^{-9} mm/año, en todos los casos bajo el estudio.

Acero al carbono	Area (mm ²)	m _i (g)	m _f (g)	m _i - m _f (g)	V _{corr} (mm/año)
1	504.201039	6.8415	6.8346	0.0069	2.11833E-08
2	497.128669	6.6409	6.6397	0.0012	3.73647E-09
3	500.756117	6.7683	6.7666	0.0017	5.25499E-09
4	505.866715	6.8666	6.8658	0.0008	2.44795E-09
5	507.175702	6.8493	6.848	0.0013	3.96766E-09
6	503.140788	6.7686	6.7681	0.0005	1.53826E-09
7	500.303138	6.6709	6.6701	0.0008	2.47517E-09
8	503.162622	6.7804	6.7797	0.0007	2.15347E-09

Tabla. 10. Velocidad de corrosión del acero al carbono, obtenida de las pruebas de inmersión.

De la misma manera en la tabla 11 se muestra un condensado de los datos obtenidos por medio de gravimetría en las probetas de acero inoxidable 304, así como la velocidad de corrosión, los valores adquiridos por medio de esta técnica se encuentran en el orden de 10^{-9} mm/año.

Acero 304	Área (mm ²)	m _i (g)	m _f (g)	m _i - m _f (g)	V _{corr} (mm/año)
1	505.988806	6.8973	6.8965	0.0008	2.4227E-09
2	497.167821	6.716	6.7145	0.0015	4.62316E-09
3	506.833071	6.9075	6.906	0.0015	4.535E-09
4	508.565389	6.9524	6.9508	0.0016	4.82086E-09
5	504.846481	6.8498	6.8489	0.0009	2.73171E-09
6	511.281577	7.0317	7.0303	0.0014	4.19584E-09
7	507.036804	6.9613	6.9599	0.0014	4.23097E-09
8	510.839279	7.0059	7.0043	0.0016	4.7994E-09

Tabla. 11. Velocidad de corrosión del acero 304, obtenida de las pruebas de inmersión.

Con los valores obtenidos de las pruebas de inmersión se obtuvo la velocidad de corrosión en los diferentes materiales, expuestos a cada uno de los catalizadores, como se muestra en la figura 22, mostrándose velocidad de corrosión en el orden de 10^{-8} y 10^{-9} mm/año.

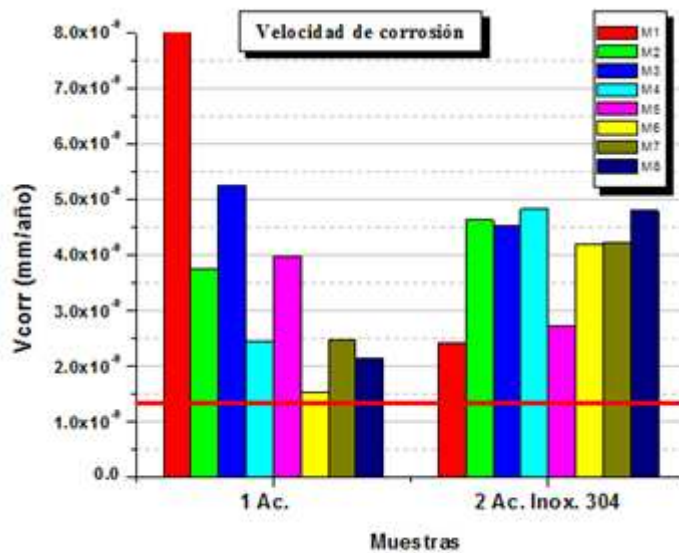


Fig 22. Comportamiento de la velocidad de corrosión en base a las pruebas gravimétricas para los especímenes.

Habiendo obtenido valores considerablemente pequeños por estos métodos se realizó una serie de combinaciones, ahora utilizando un medio altamente corrosivo como lo es una salmuera y un inhibidor de corrosión para conocer el comportamiento de ambos.

En esta ocasión se utilizó la prueba de resistencia a la polarización lineal RPL (por sus siglas en inglés), para obtener las velocidades de corrosión de cada combinación, las cuales se llevaron a cabo con repetitividad de tres.

Se corrieron las muestras de acero al carbono en los diferentes medio con una repetitividad de tres.

Acero al Carbono			
Muestra	Salmuera Vcorr mm/y	Cat 20ppm Vcorr mm/y	Cat 50ppm Vcorr mm/y
S	2.42E-02		
M1		2.35E-02	1.05E-01
M2		1.34E-02	2.81E-02
M3		1.99E-02	2.92E-02
M4		3.95E-02	5.04E-02
M5		3.16E-02	3.25E-02
M6		1.29E-01	6.53E-02
M7		3.10E-02	2.84E-02
M8		4.47E-02	2.33E-02

Tabla. 12. Muestra la velocidad de corrosión al exponer el acero al carbono a dos concentraciones de catalizadores.

En la figura 23, se muestran los resultados de la técnica de resistencia a la polarización lineal, de las combinaciones realizadas en el estudio en el acero al carbono.

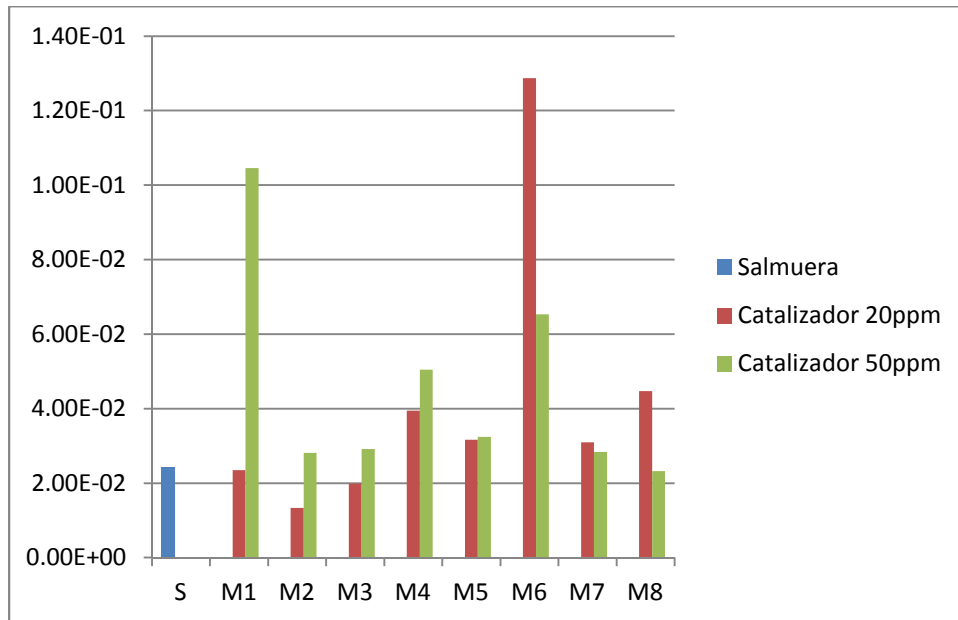


Fig 23. Muestra las velocidades de corrosión del acero al exponerlo a concentraciones de 20ppm y 50ppm de los diferentes catalizadores.

La velocidad de corrosión obtenida de exponer el acero 1018 a la salmuera, nos sirve como valor patrón, por lo que podemos observar que al añadir 20ppm de los diferentes catalizadores solo en M4, M5, M6, M7 y M8 la velocidad de corrosión se incremento, mientras en M1, M2 y M3 se observo una disminuci3n en la misma. Al a1adir 50ppm de los diferentes catalizadores en M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7 se noto un incremento en la velocidad de corrosi3n, mientras que en M8, el cambio fue muy peque1o.

En este mismo acero se prob3 un inhibidor de corrosi3n en dos concentraciones distintas como se muestra en la tabla:

Acero al Carbono					
Muestra	Salmuera Vcorr mm/y	S + I (20ppm) Vcorr mm/y	S + I(50ppm) Vcorr mm/y	Cat20 + Inhi 20 Vcorr mm/y	Cat 20 + Inhi 50 Vcorr mm/y
S	2.42E-02				
S + I (20ppm)		1.89E-02			
S + I(50ppm)			3.60E-02		
M1				2.15E-02	3.08E-02
M2				1.02E-02	2.82E-02
M3				7.01E-03	2.39E-03
M4				3.26E-02	5.23E-02
M5				1.44E-02	1.91E-02
M6				4.88E-02	3.64E-02
M7				7.19E-02	2.13E-01
M8				3.64E-02	1.81E-02

Tabla. 13. Muestra la velocidad de corrosión al exponer el acero al carbono a las dos combinaciones de catalizador - inhibidor.

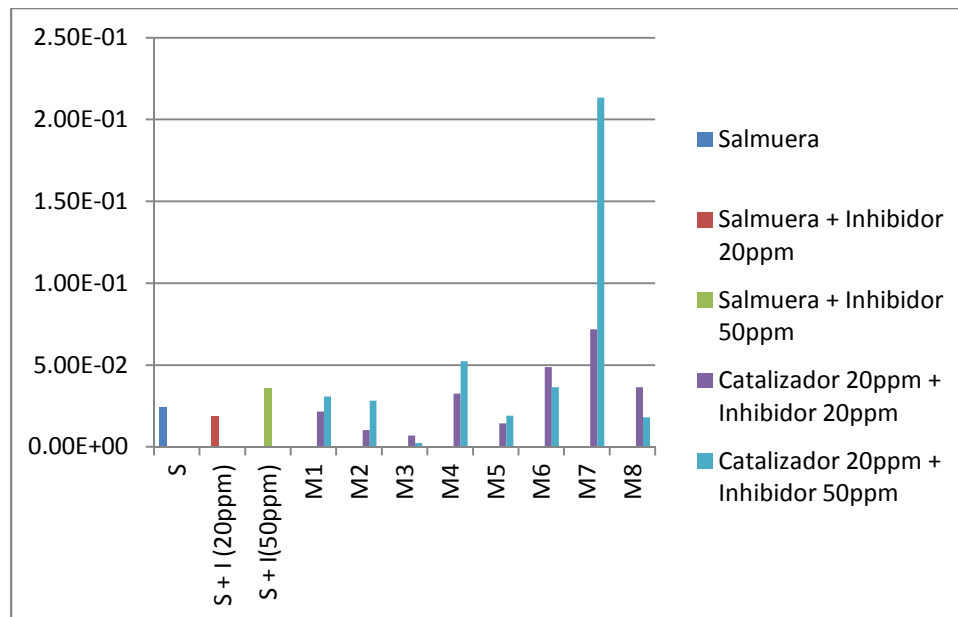


Fig 24. Muestra las velocidades de corrosión del acero al carbono, al exponerlo a las combinaciones de catalizador 20ppm con 20ppm de inhibidor, y la combinación de catalizador 20ppm con inhibidor 50ppm.

Una vez más nuestro valor patrón es el valor obtenido del acero al carbono expuesto a la salmuera, en un principio se agregó 20ppm de inhibidor a la salmuera y se obtuvo una disminución en la velocidad de corrosión, sin embargo, al agregar 50ppm de inhibidor la velocidad de corrosión obtenida fue mayor a la del patrón. Habiendo obtenido estos resultados se prosigió con la combinación

de catalizador e inhibidor, al tener la combinación de catalizador 20ppm + inhibidor 20ppm en M1, M2, M3 y M5 se noto una disminución en la velocidad de corrosión respecto al patrón, mientras que en M4, M6, M7 y M8 se noto un incremento en la misma. Sin embargo, se realizo una combinación de catalizador 20ppm + inhibidor 50ppm, donde en M1, M2, M4, M6 y M7 se obtuvo un incremento en la velocidad de corrosión, observando una disminución de la misma en M3, M5 y M8.

Se hubiera esperado que al adicionar una cantidad mayor de inhibidor la velocidad de corrosión fuera menor que la del patrón, sin embargo este comportamiento no se cumple para los diferentes catalizadores.

Para el acero inoxidable 304 se utilizo de la misma manera la técnica de Resistencia a la Polarización Lineal, con repetitividad de tres.

Se expuso el material a los diferentes catalizadores en dos concentraciones, 20ppm y 50ppm.

Acero inoxidable 304			
Muestra	Salmuera Vcorr mm/y	Cat 20ppm Vcorr mm/y	Cat 50ppm Vcorr mm/y
S	2.36E-03		
M1		4.19E-03	2.01E-03
M2		4.26E-04	1.61E-03
M3		6.75E-04	2.25E-03
M4		1.94E-03	2.28E-03
M5		7.90E-03	3.57E-03
M6		3.97E-03	1.82E-03
M7		3.01E-03	7.41E-03
M8		3.28E-03	3.48E-03

Tabla. 14 Muestra la velocidad de corrosión al exponer el acero 304 a dos concentraciones de catalizadores.

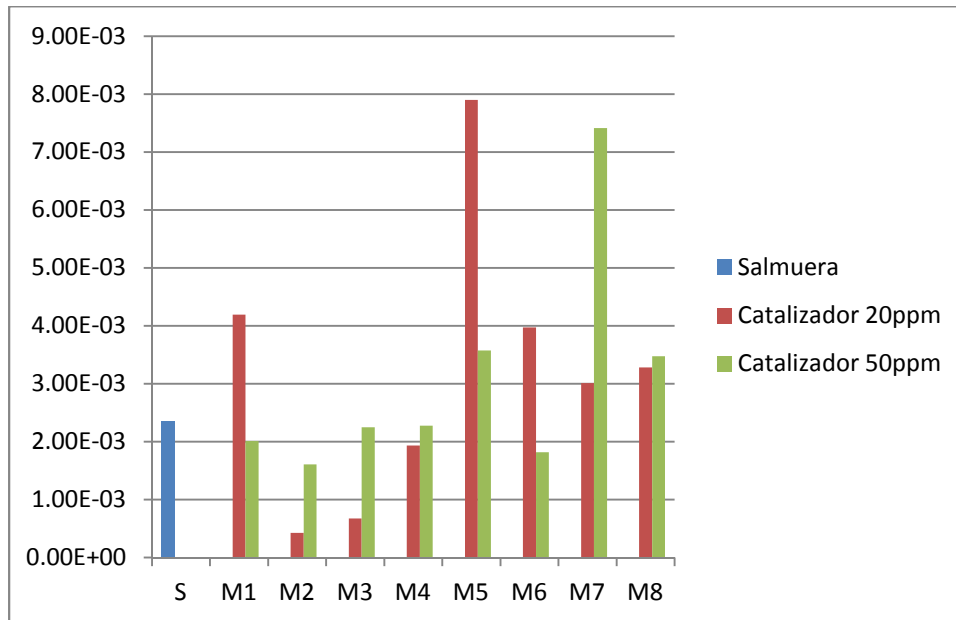


Fig 25. Muestra las velocidades de corrosión del acero 304 al exponerlo a concentraciones de 20ppm y 50ppm de los diferentes catalizadores.

De la misma manera se aplico la técnica al acero inoxidable 304 expuesto solo a la salmuera para así contar con un valor patrón, habiendo obtenido este valor se prosiguió con la exposición del acero a los diferentes catalizadores en un principio, se expuso a una concentración de 20ppm de los diferentes catalizadores donde podemos observar que en M1, M5, M6, M7 y M8 se incremento la velocidad de corrosión del material al ser expuesto a estos catalizadores, mientras que en M2, M3 y M4 la velocidad de corrosión se vio disminuida, sobresaliendo M2 con el valor mínimo. Por consiguiente, fue expuesto el material a 50ppm de los diferentes catalizadores, donde, en M5, M7 y M8 muestran un incremento en la velocidad de corrosión, mientras que, M1, M2 y M6 notan una disminución en la misma y M3 y M4 sufren un cambio muy pequeño en la velocidad de corrosión respecto al patrón.

Se continuó con la combinación de catalizador e inhibidor en el acero inoxidable 304, donde se manejaron dos concentraciones de inhibidor, 20ppm y 50ppm.

Acero inoxidable 304					
Medio	Salmuera Vcorr mm/y	S + I (20ppm) Vcorr mm/y	S + I (50ppm) Vcorr mm/y	cat 20 + Inhib 20 Vcorr mm/y	cat20+inhi 50 Vcorr mm/y
S	2.36E-03				
S + I (20ppm)		1.08E-02			
S + I (50ppm)			7.46E-03		
M1				1.07E-03	3.98E-03
M2				8.46E-04	9.52E-04
M3				2.70E-03	1.30E-03
M4				3.39E-03	8.72E-04
M5				1.63E-03	2.67E-03
M6				3.62E-03	1.54E-03
M7				4.80E-03	4.47E-04
M8				2.09E-03	5.79E-03

Tabla. 15 Muestra la velocidad de corrosión al exponer el acero 304 a las dos combinaciones de catalizador - inhibidor.

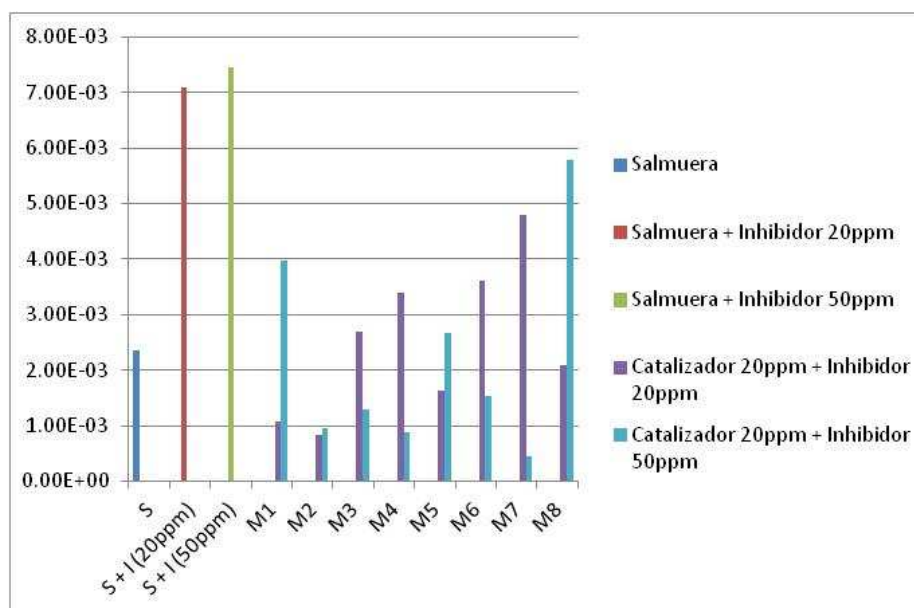


Fig 26. Muestra las velocidades de corrosión del acero 304 al exponerlo a las combinaciones de catalizador 20ppm con 20ppm de inhibidor, y la combinación de catalizador 20ppm con inhibidor 50ppm.

Se prosiguió con la evaluación de las dos diferentes concentraciones de inhibidor en el acero inoxidable 304, el cual al agregarle 20ppm de inhibidor a la salmuera se noto un incremento muy considerable respecto al patrón de comparación, al añadir 50ppm a la salmuera también hubo un incremento respecto al patrón pero un decremento respecto a la concentración de 20ppm de inhibidor. Habiendo

obtenido estos datos, se continuó con la evaluación de las combinaciones de catalizador + inhibidor.

En la combinación catalizador 20ppm + inhibidor 20ppm, se obtuvieron incremento en la velocidad de corrosión en M3, M4, M6 y M7 respecto al patrón de comparación, mientras que M1, M2, M5 y M8 mostraron un decremento en la velocidad de corrosión.

En la combinación catalizador 20ppm + inhibidor 50ppm, M1, M5 y M8 mostraron un incremento en la velocidad de corrosión, mientras que M2, M3, M4, M6 y M7 muestran una disminución en la velocidad de corrosión, obteniéndose en M7 el valor mínimo.

Desde la evaluación del inhibidor mismo en la salmuera se noto un comportamiento completamente diferente al esperado, siendo que éste en lugar de retrasar la velocidad de corrosión, la acelero. Pero, al combinarlo con los diferentes catalizadores las velocidades de corrosión obtenidas solo con los inhibidores se vieron abatidas.

CAPITULO IV: Conclusiones.

En la primer parte de este estudio se encontró que los catalizadores por si solos no son un problema respecto a los niveles de corrosión que producen en los metales utilizados ya que los valores que arrojaron las pruebas de ruido electroquímico así como las pruebas gravimétricas nos muestran valores de velocidad de corrosión en el orden de 10^{-8} y 10^{-9} mm/año, los cuales son valores muy pequeños, este comportamiento se debe a su nula conductividad eléctrica, estos valores son obtenidos bajo las condiciones experimentales evaluadas en el laboratorio, cualquier cambio en los medios provocará un cambio en el comportamiento de los mismos.

De acuerdo con los resultado obtenidos por las pruebas llevadas a cabo, tanto las diferentes pruebas electroquímicas como prueba de gravimetría, se concluye que los catalizadores estudiados bajo estas condiciones, no presentan influencia significativa en el aspecto de la corrosión, al ser evaluados por si solos así como en las diversas combinaciones desarrolladas durante el estudio.

Se observo que existe una excelente correlación entre los resultados obtenidos con R_n y gravimetría

Debido a las bajas velocidades de corrosión que se obtuvieron durante el estudio, estos catalizadores pueden ser utilizados en este tipo de materiales, ya que no provocan daño significativo en los mismos.

En base a los resultados que se obtuvieron por LPR, y tomando como base el valor de la velocidad de corrosión de la salmuera en los diferentes aceros, se observa un cambio en la misma, mas no de manera significativa, encontrándose el acero 1018 en el orden de 10^{-2} mm/año y en el acero 304 en el orden de 10^{-3} mm/año. Destacando que este incremento mostrado en la cinética es originado únicamente por la presencia del medio salino.

No están diseñados para inhibir o acelerar, las reacciones de oxidación de los aceros.

Recomendaciones.

De ser posible, evaluar los diferentes catalizadores en los medios donde vayan a ser utilizados.

Generar una matriz más amplia para las dosificaciones de la sustancia inhibidora.

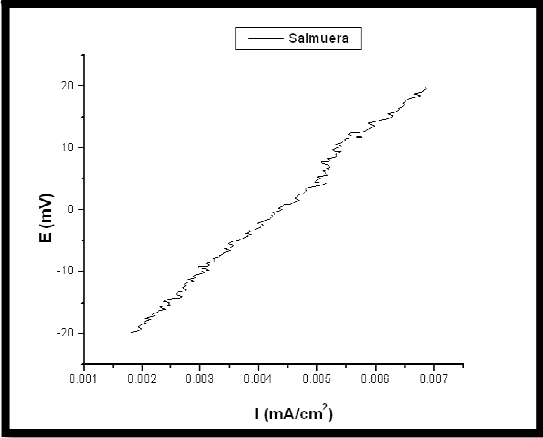
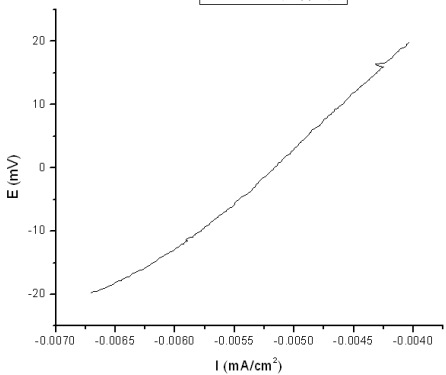
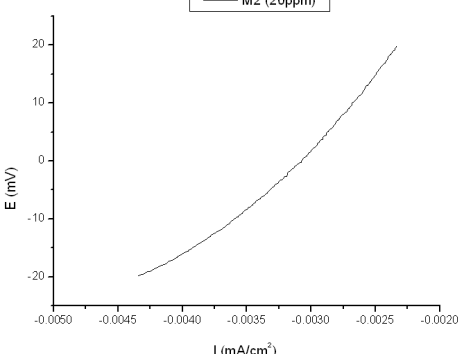
Bibliografía.

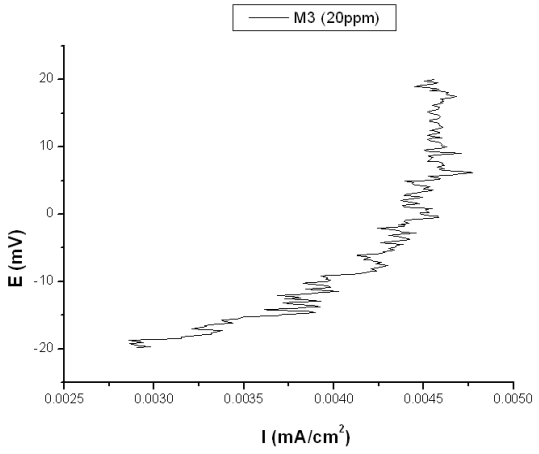
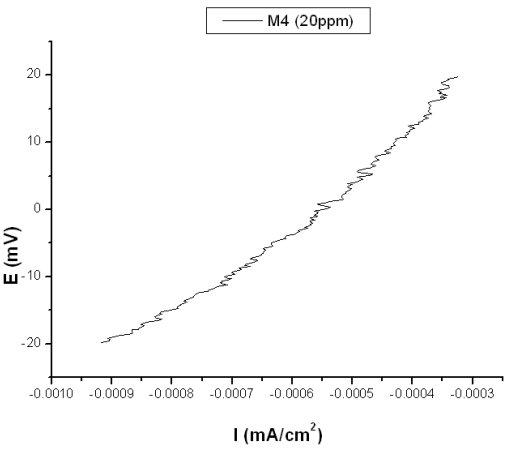
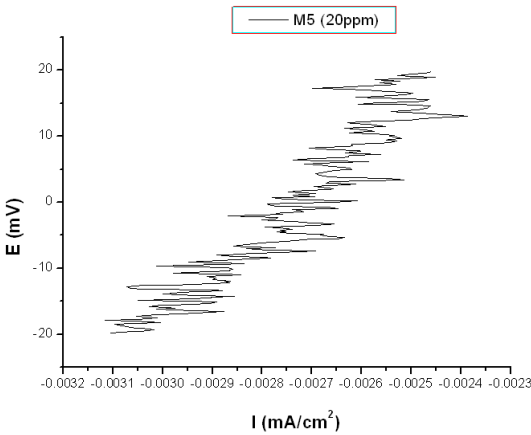
- [1] Corrosión y protección metálica, Feliu S., Andrade M. C., Consejo superior de investigaciones científicas.
- [2] Corrosion, Shreir L. ,Newnes-Butterworths London Boston, 1963/Lectures on electrochemical corrosión, Pourbaix M., 1973/ Handbook of corrosion engineering, Roberge P. McGraw Hill, 2000.
- [3] Mars G., “Corrosion engineering”, third edition, Pp 4,5, 14-16 McGraw Hill Inc
- [4] Yang, L. Techniques for corrosion monitoring, Woodhead publishing , 2008].
- [5] Ernitz A., Manual de hierro y aceros, Pp 5, 8, Alsina, 1995].
- [6] ACERO AISI-SAE 1018 (UNS G10180), <http://www.sumiteccr.com>
- [7] Bernau R., Elementos de metalografía y de aceros al carbono, Andrés Bello, Pp 213, 1958.
- [8] ACERO INOXIDABLE 304(UNS S30400), <http://www.sumiteccr.com>.
- [9] Izquierdo F., et. al., Cinética de las reacciones químicas, ediciones de la universidad de Barcelona, Pp 144- 146, 2004].
- [10] Avery H. E., Química básica y mecanismo de reacción, Reverté S.A., Pp 125-126, 1982.
- [11] Gómez de León Hijes F., Manual básico de corrosión para ingenieros, Universidad de Murcia, Pp 92-97, 2004.
- [12] Sánchez M., Efectos de la temperatura en la corrosión por sales fundidas de la super aleación 718, Pp 18 – 20, 2008.
- [13] Bruyn H. J., Current Corrosion Monitoring Trends in the Petrochemical Industry, Elsevier p. 293-303, 1996.

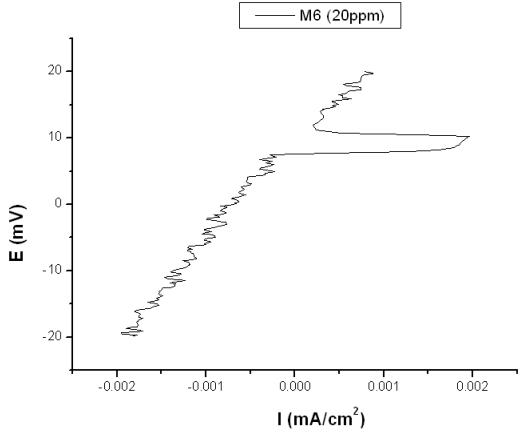
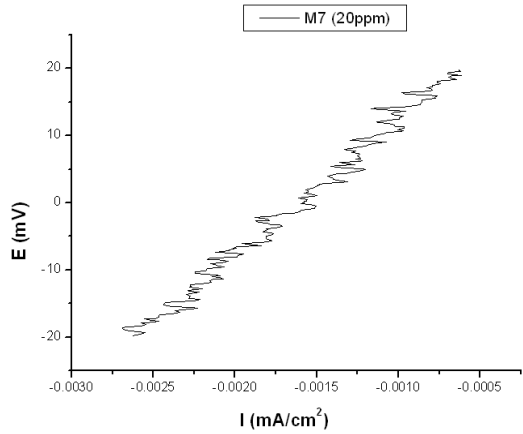
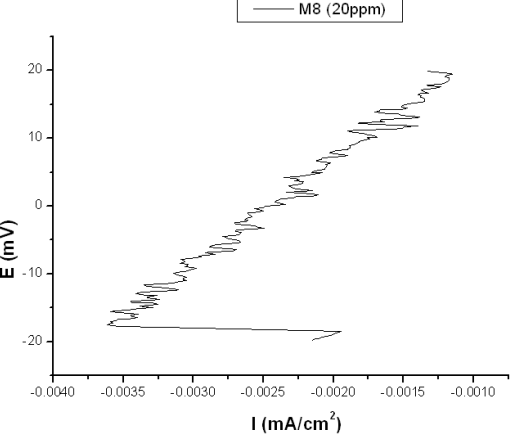
- [14] Pedemonte J. et al, Ruido electroquímico, métodos de análisis, Septem Ediciones S. L., 2002.
- [15] L Yang, Southwest Research Institute, USA
- [16] ASTM G1 – 90 Standard Practices for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.
- [17] Fuentes X. et al., Bioquímica clínica y patología molecular, Pp 308, Reverté, 1998.
- [18] ASTM G 59 – 97 Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements].
- [19] Kelly, Inman y Hudson., Electrochemical Noise Measurement for Corrosion Applications, ASTM SP-1277. ASTM. (1996).

Anexo.

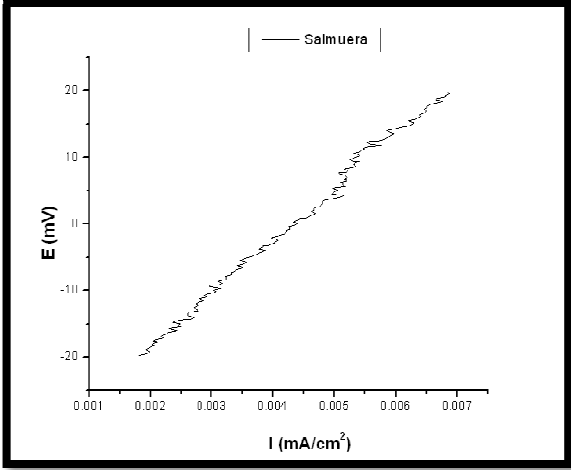
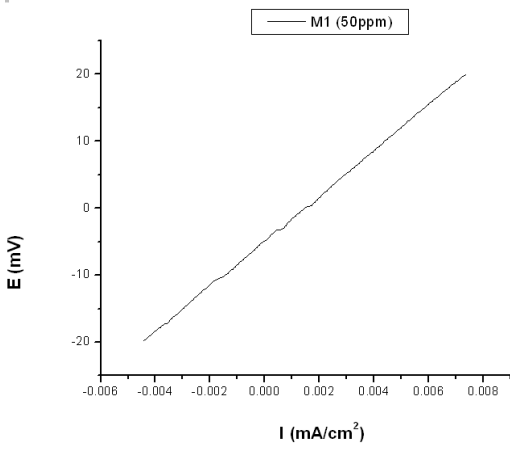
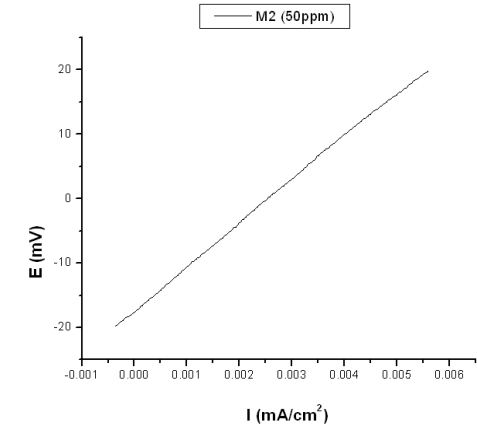
Acero al carbono expuesto a 20 ppm de catalizador.

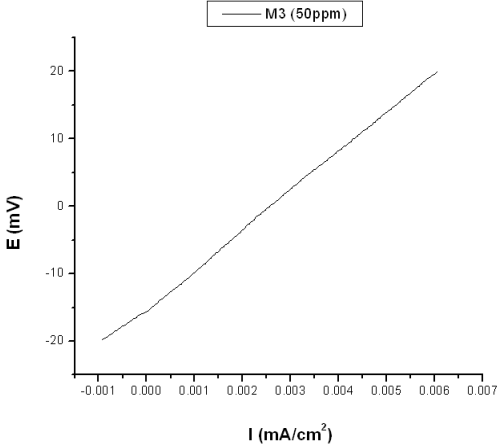
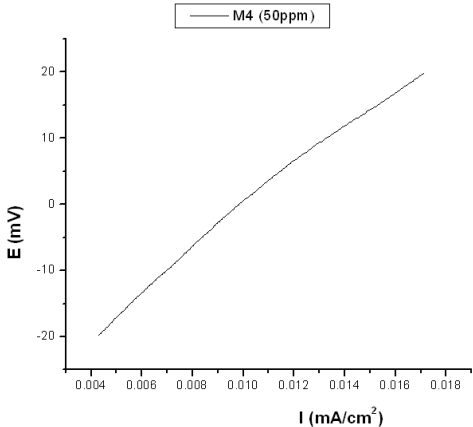
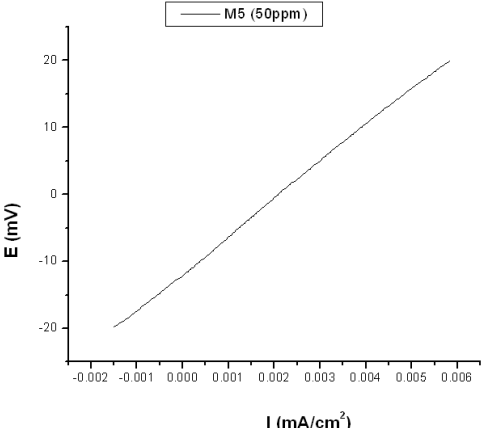
Muestra	Vcorr mm/y
<p data-bbox="662 373 776 401">Salmuera</p>  <p data-bbox="672 449 802 476">— Salmuera</p>	2.42E-02
<p data-bbox="695 896 743 924">M1</p>  <p data-bbox="672 953 818 980">— M1 (20ppm)</p>	2.35E-02
<p data-bbox="695 1379 743 1407">M2</p>  <p data-bbox="672 1436 818 1463">— M2 (20ppm)</p>	1.34E-02

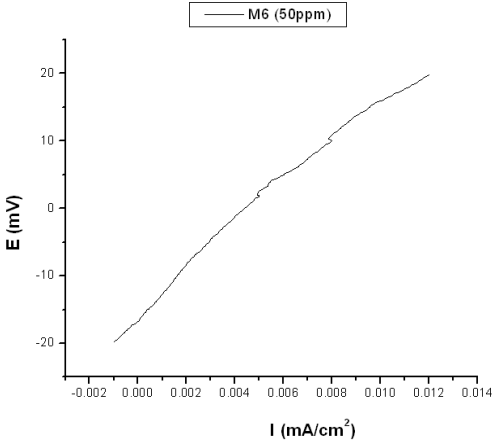
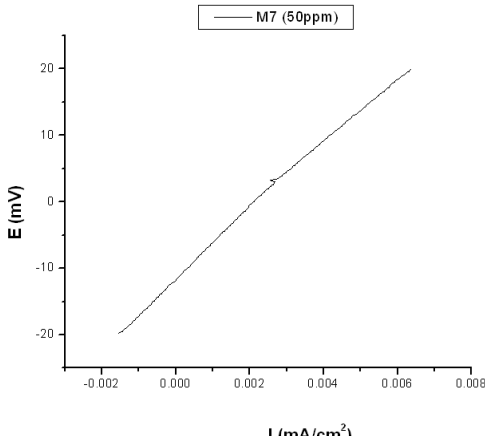
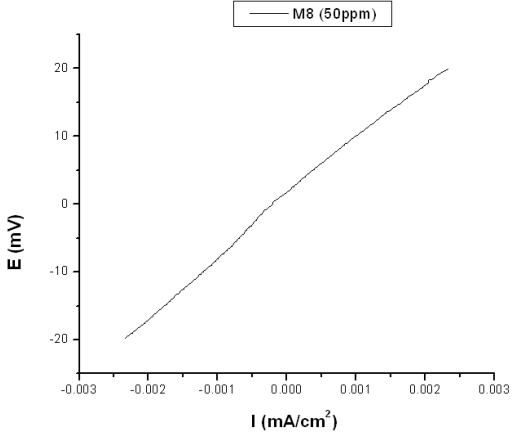
<p style="text-align: center;">M3</p>  <p style="text-align: center;">M3 (20ppm)</p>	<p>1.99E-02</p>
<p style="text-align: center;">M4</p>  <p style="text-align: center;">M4 (20ppm)</p>	<p>3.95E-02</p>
<p style="text-align: center;">M5</p>  <p style="text-align: center;">M5 (20ppm)</p>	<p>3.16E-02</p>

<p style="text-align: center;">M6</p>  <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>	<p>1.29E-01</p>
<p style="text-align: center;">M7</p>  <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>	<p>3.10E-02</p>
<p style="text-align: center;">M8</p>  <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>	<p>4.47E-02</p>

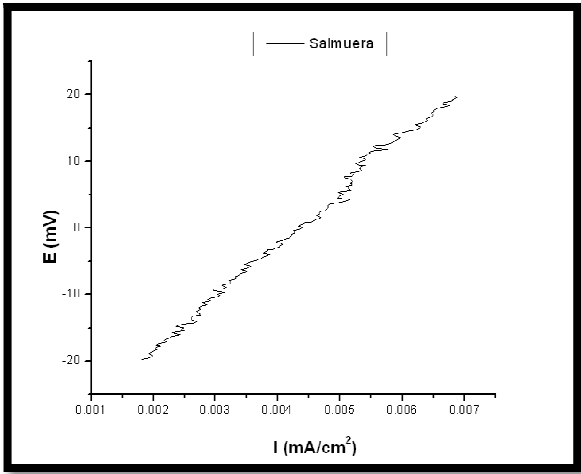
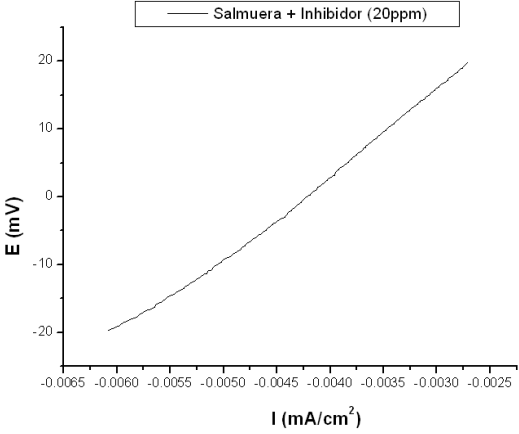
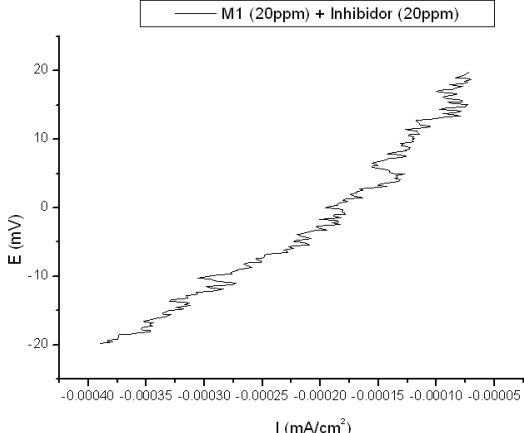
Acero al carbono expuesto a 50 ppm de catalizador

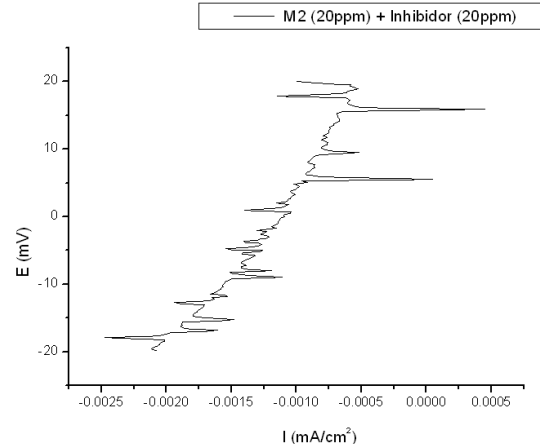
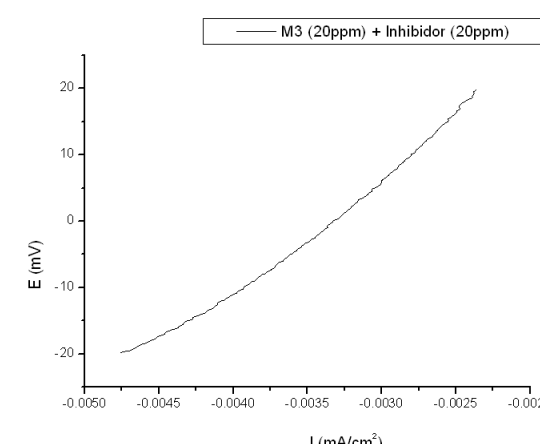
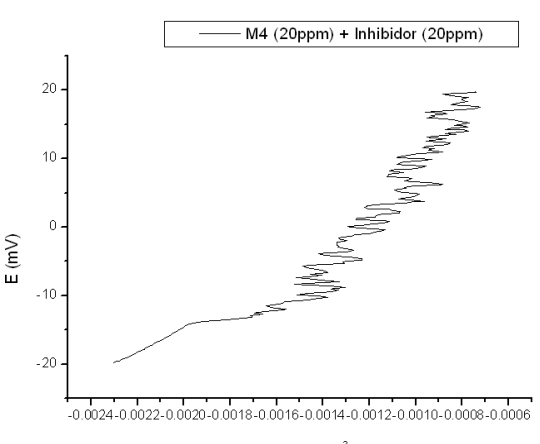
Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.42E-02
<p style="text-align: center;">M1</p> 	1.05E-01
<p style="text-align: center;">M2</p> 	2.81E-02

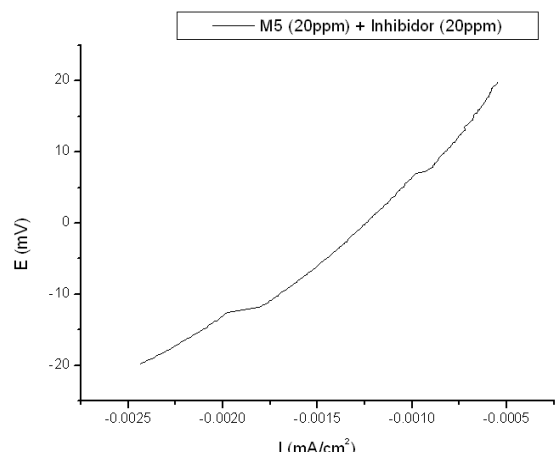
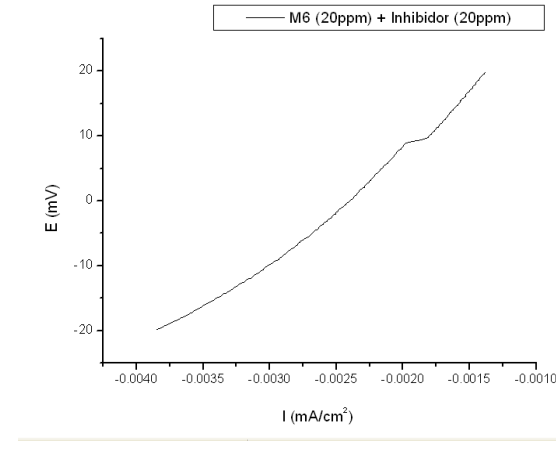
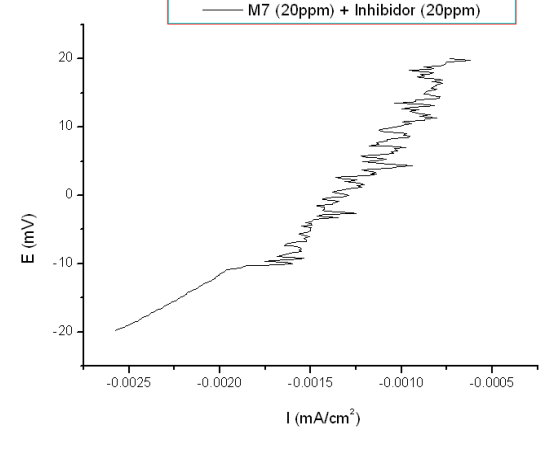
<p style="text-align: center;">M3</p>  <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>	<p>2.92E-02</p>
<p style="text-align: center;">M4</p>  <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>	<p>5.04E-02</p>
<p style="text-align: center;">M5</p>  <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>	<p>3.25E-02</p>

<p style="text-align: center;">M6</p>  <p style="text-align: center;">M6 (50ppm)</p>	<p>6.53E-02</p>
<p style="text-align: center;">M7</p>  <p style="text-align: center;">M7 (50ppm)</p>	<p>2.84E-02</p>
<p style="text-align: center;">M8</p>  <p style="text-align: center;">M8 (50ppm)</p>	<p>2.33E-02</p>

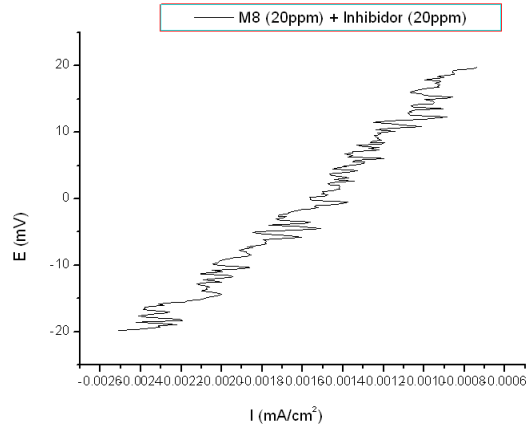
Acero al carbono expuesto a 20 ppm de catalizador + 20ppm de inhibidor

Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.42E-02
<p style="text-align: center;">Salmuera + inhibidor</p> 	1.89E-02
<p style="text-align: center;">M1</p> 	2.15E-02

<p style="text-align: center;">M2</p> 	<p>1.02E-02</p>
<p style="text-align: center;">M3</p> 	<p>7.01E-03</p>
<p style="text-align: center;">M4</p> 	<p>3.26E-02</p>

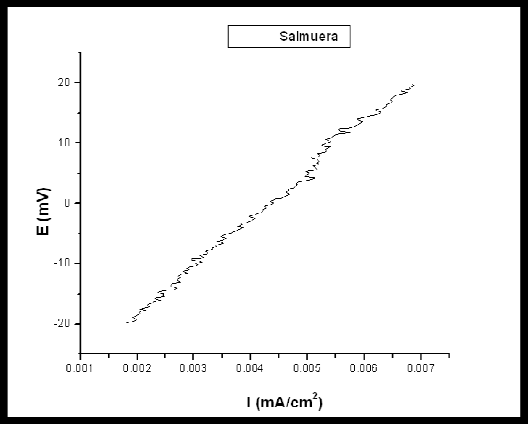
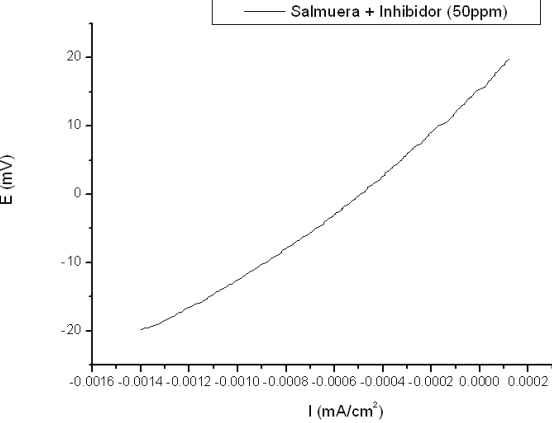
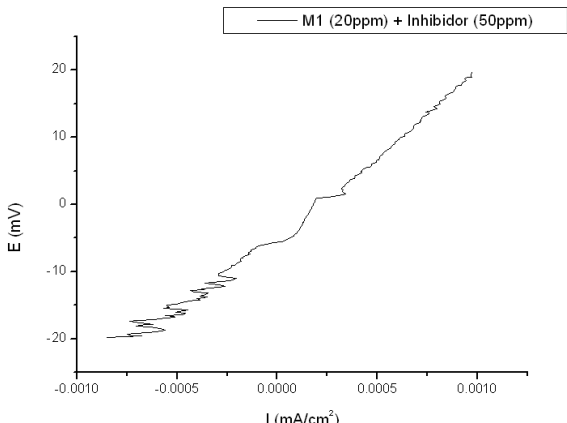
<p style="text-align: center;">M5</p> 	<p>1.44E-02</p>
<p style="text-align: center;">M6</p> 	<p>4.88E-02</p>
<p style="text-align: center;">M7</p> 	<p>7.19E-02</p>

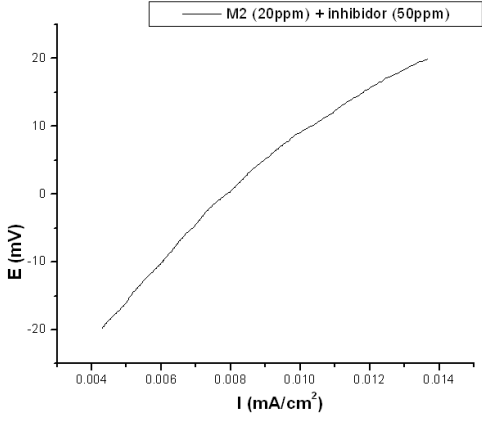
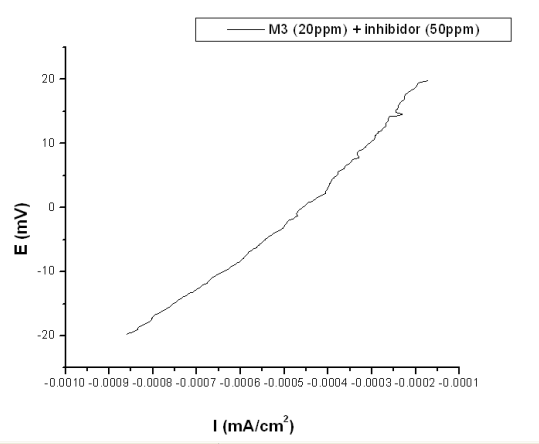
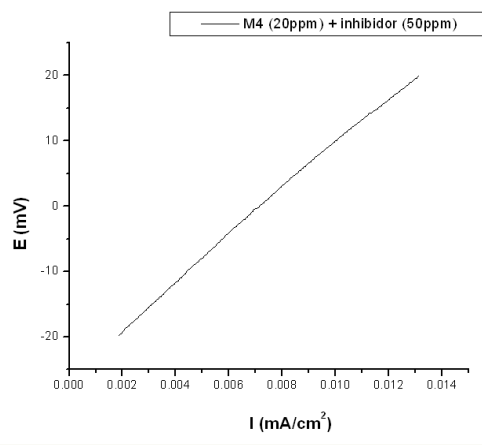
M8

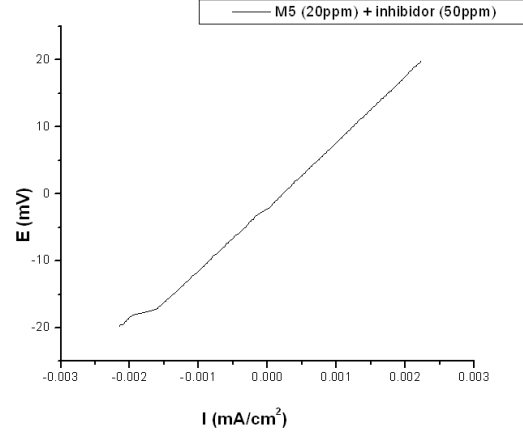
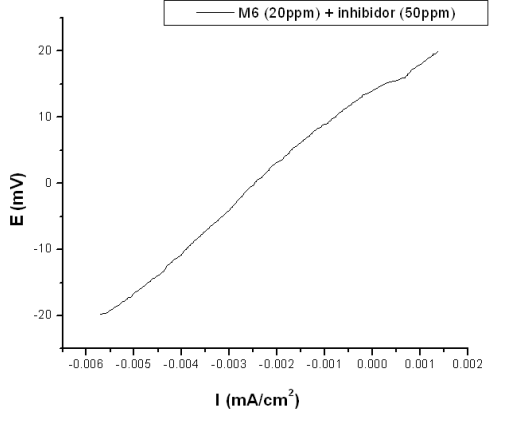
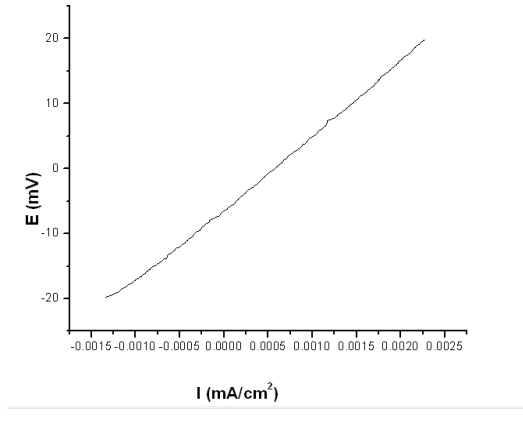


3.64E-02

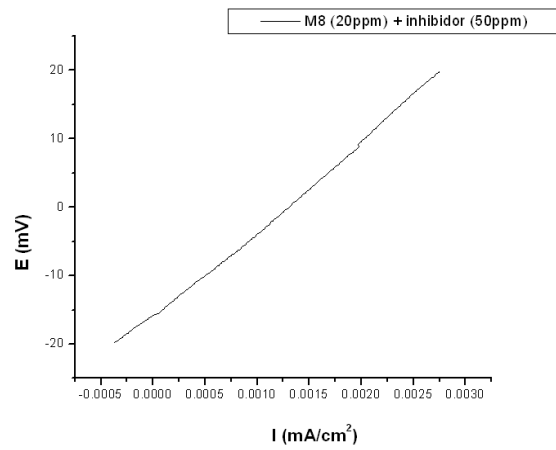
Acero al carbono expuesto a 20 ppm de catalizador + 50 ppm de inhibidor

Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.42E-02
<p style="text-align: center;">Salmuera + inhibidor</p> 	3.60E-02
<p style="text-align: center;">M1</p> 	3.08E-02

<p style="text-align: center;">M2</p>  <p style="text-align: center;">2.82E-02</p>	
<p style="text-align: center;">M3</p>  <p style="text-align: center;">2.39E-03</p>	
<p style="text-align: center;">M4</p>  <p style="text-align: center;">5.23E-02</p>	

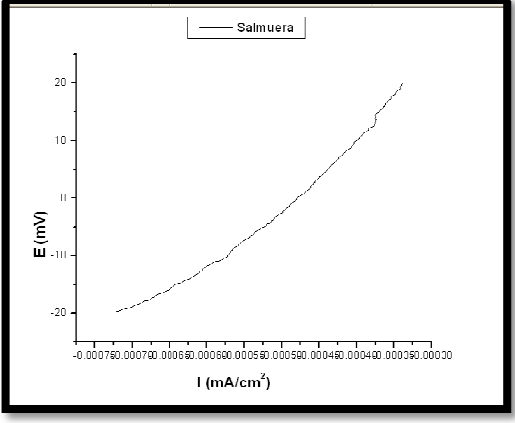
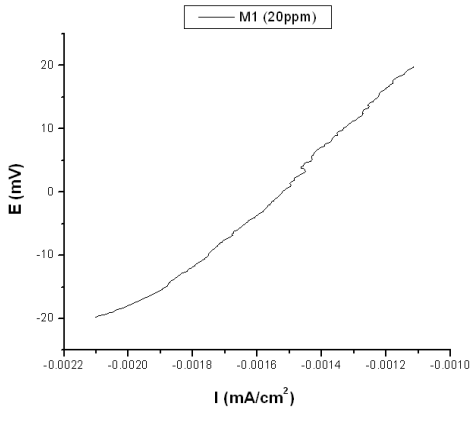
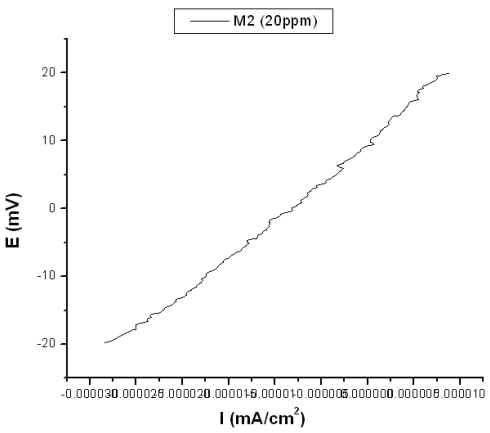
<p style="text-align: center;">M5</p> 	<p>1.91E-02</p>
<p style="text-align: center;">M6</p> 	<p>3.64E-02</p>
<p style="text-align: center;">M7</p> 	<p>2.13E-01</p>

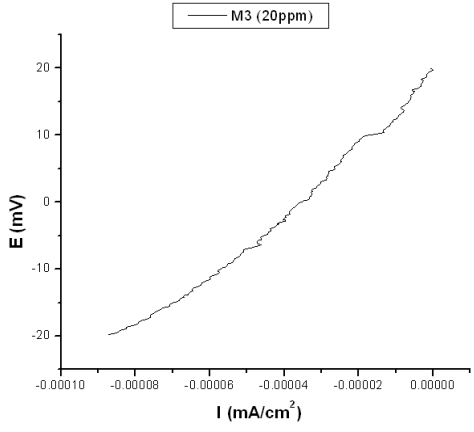
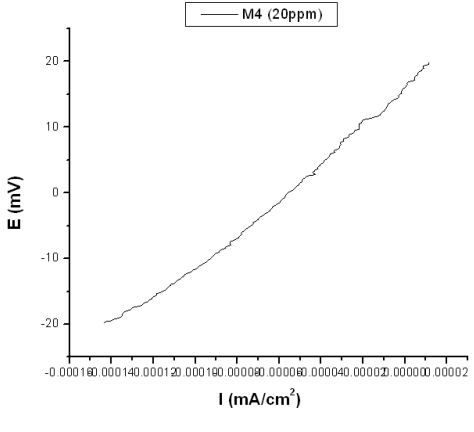
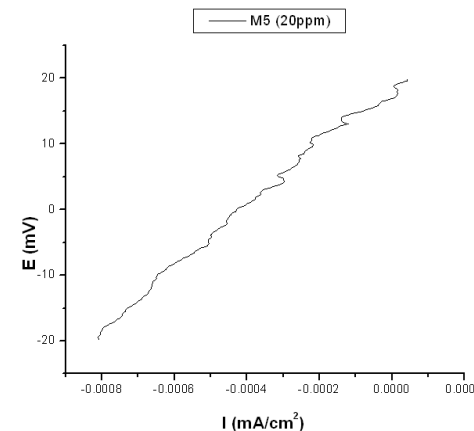
M8

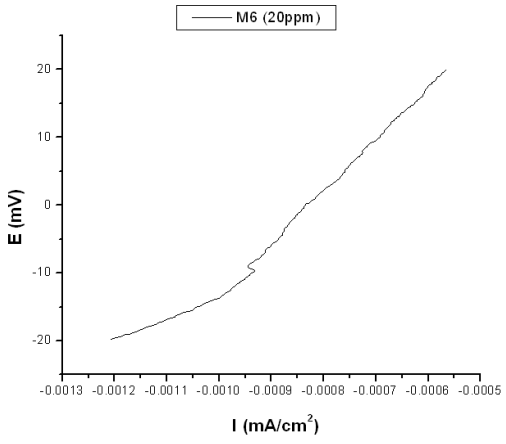
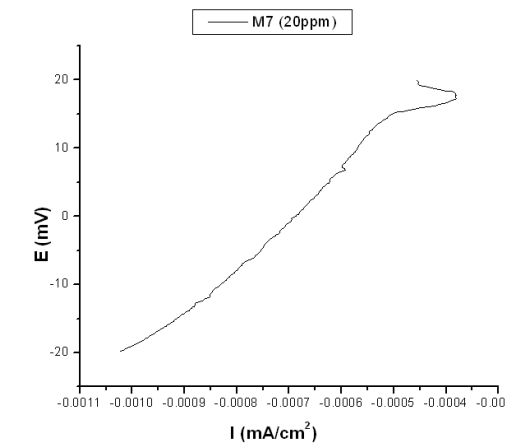
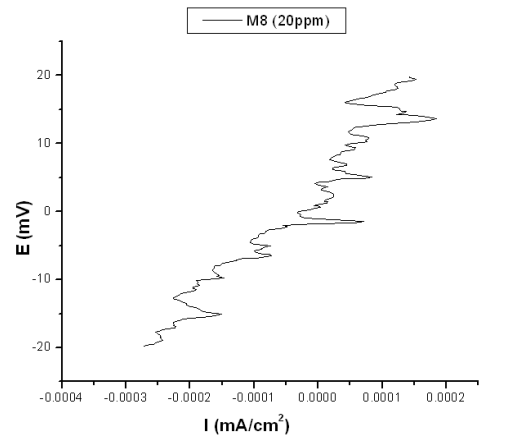


1.81E-02

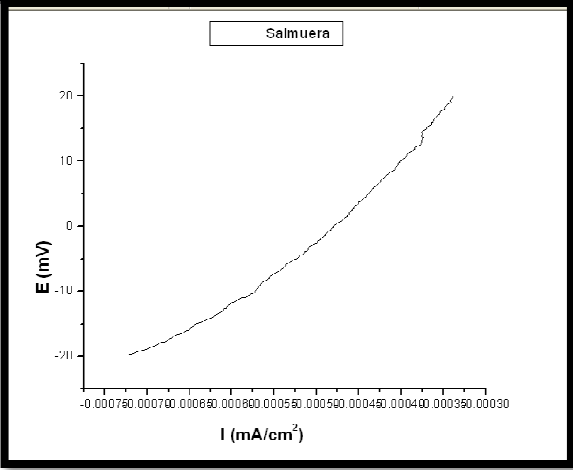
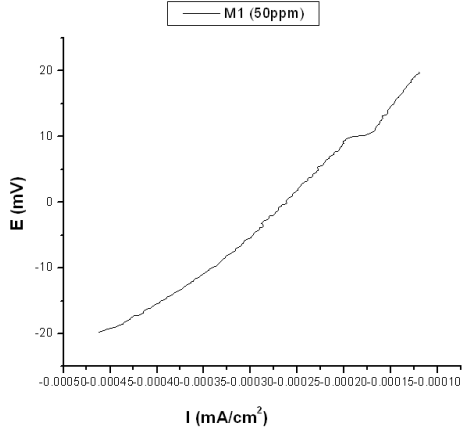
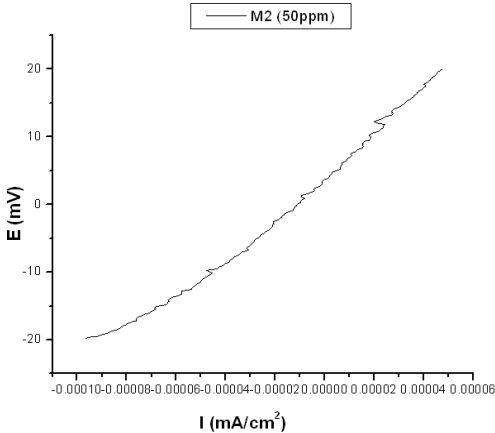
Acero 304 expuesto 20 ppm de catalizador

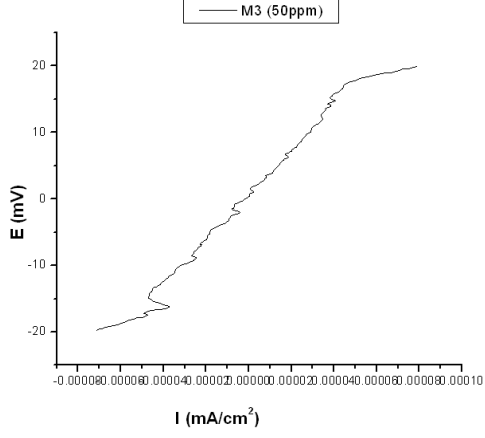
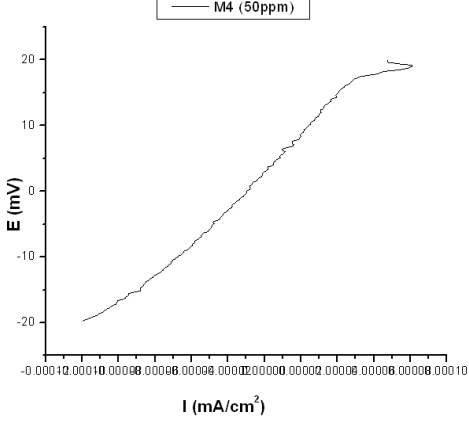
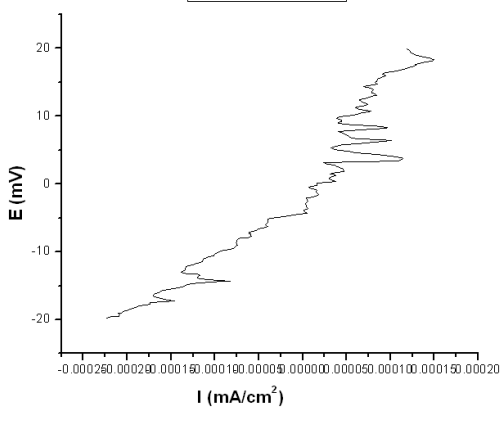
Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.36E-03
<p style="text-align: center;">M1</p> 	4.19E-03
<p style="text-align: center;">M2</p> 	4.26E-04

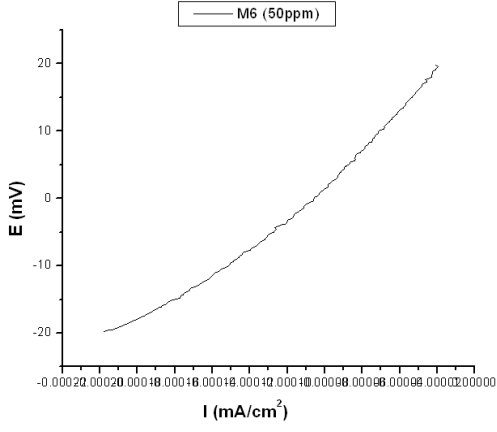
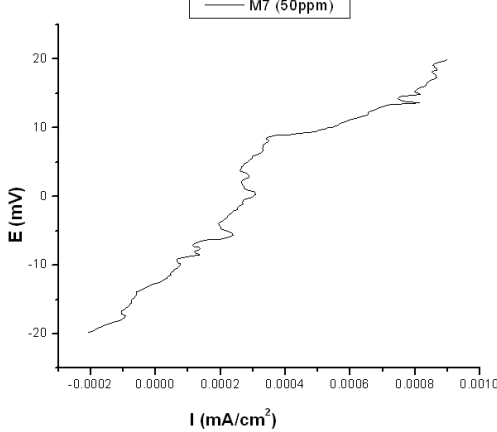
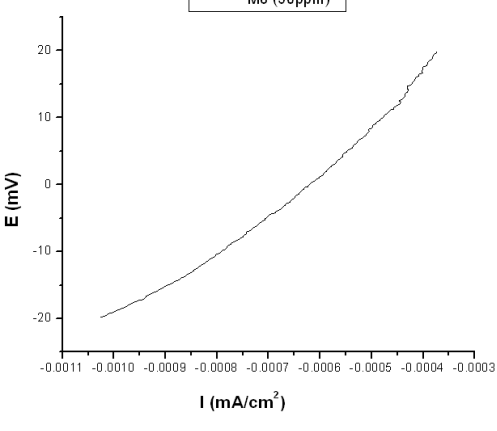
<p style="text-align: center;">M3</p>  <p style="text-align: right;">6.75E-04</p>	<p style="text-align: center;">M3</p> <p style="text-align: center;">— M3 (20ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>
<p style="text-align: center;">M4</p>  <p style="text-align: right;">1.94E-03</p>	<p style="text-align: center;">M4</p> <p style="text-align: center;">— M4 (20ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>
<p style="text-align: center;">M5</p>  <p style="text-align: right;">7.90E-03</p>	<p style="text-align: center;">M5</p> <p style="text-align: center;">— M5 (20ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>

<p style="text-align: center;">M6</p>  <p style="text-align: center;">3.97E-03</p>	<p style="text-align: center;">3.97E-03</p>
<p style="text-align: center;">M7</p>  <p style="text-align: center;">3.01E-03</p>	<p style="text-align: center;">3.01E-03</p>
<p style="text-align: center;">M8</p>  <p style="text-align: center;">3.28E-03</p>	<p style="text-align: center;">3.28E-03</p>

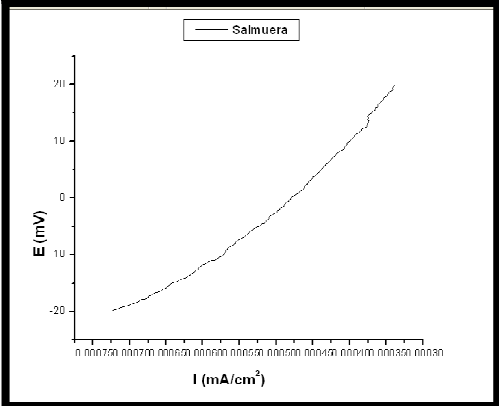
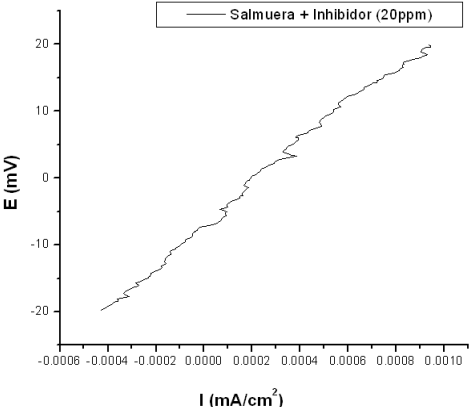
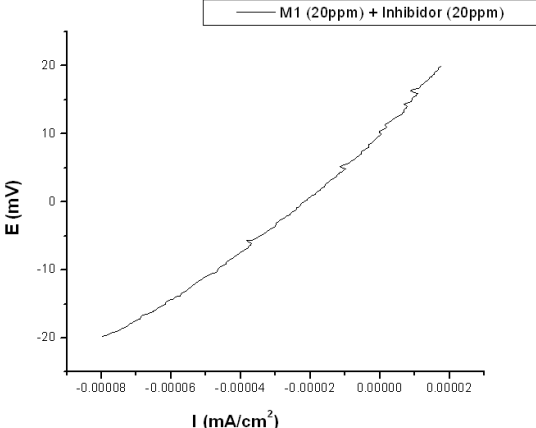
Acero 304 expuesto a 50 ppm de catalizador

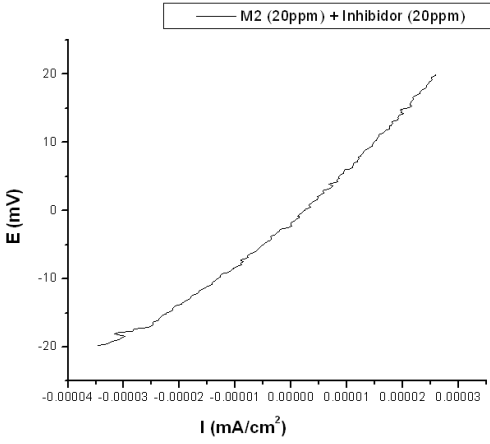
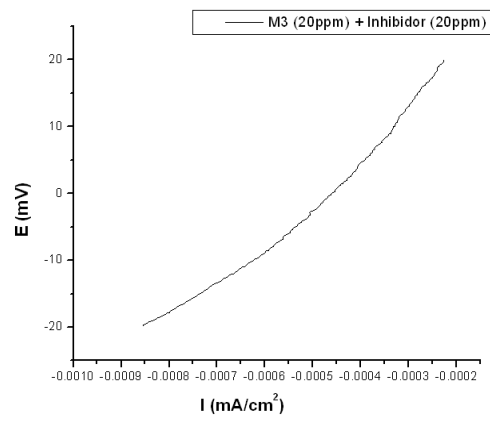
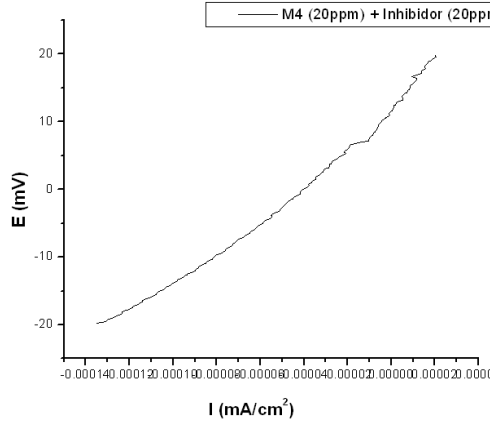
Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.36E-03
<p style="text-align: center;">M1</p> 	2.01E-03
<p style="text-align: center;">M2</p> 	1.61E-03

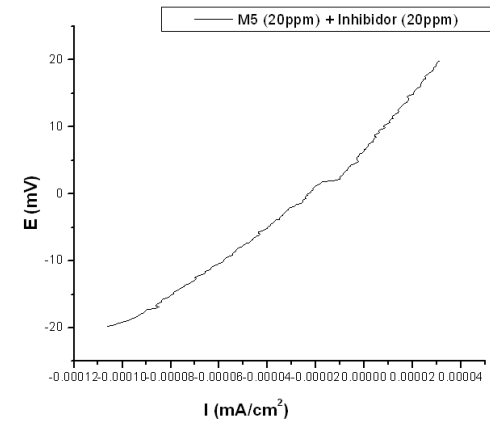
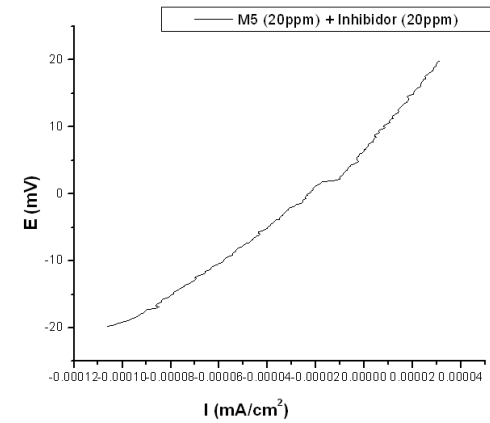
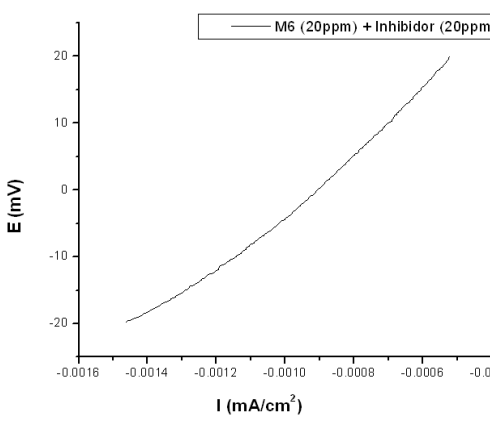
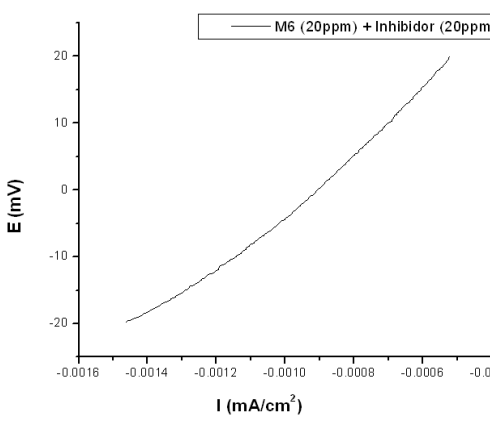
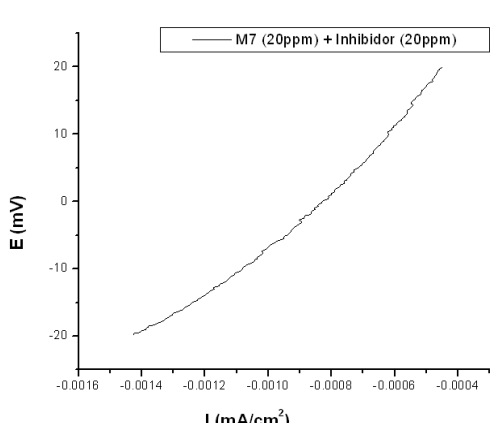
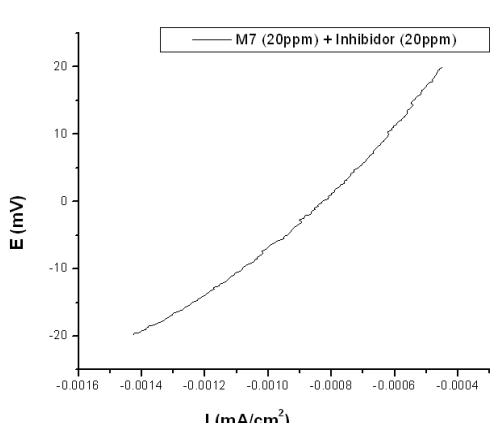
<p style="text-align: center;">M3</p>  <p style="text-align: center;">2.25E-03</p>	<p style="text-align: center;">M3</p> <p style="text-align: center;">— M3 (50ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>
<p style="text-align: center;">M4</p>  <p style="text-align: center;">2.28E-03</p>	<p style="text-align: center;">M4</p> <p style="text-align: center;">— M4 (50ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>
<p style="text-align: center;">M5</p>  <p style="text-align: center;">3.57E-03</p>	<p style="text-align: center;">M5</p> <p style="text-align: center;">— M5 (50ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>

<p style="text-align: center;">M6</p>  <p style="text-align: right;">1.82E-03</p>	<p style="text-align: center;">M6</p> <p style="text-align: center;">— M6 (50ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>
<p style="text-align: center;">M7</p>  <p style="text-align: right;">7.41E-03</p>	<p style="text-align: center;">M7</p> <p style="text-align: center;">— M7 (50ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>
<p style="text-align: center;">M8</p>  <p style="text-align: right;">3.48E-03</p>	<p style="text-align: center;">M8</p> <p style="text-align: center;">— M8 (50ppm)</p> <p style="text-align: center;">E (mV)</p> <p style="text-align: center;">I (mA/cm²)</p>

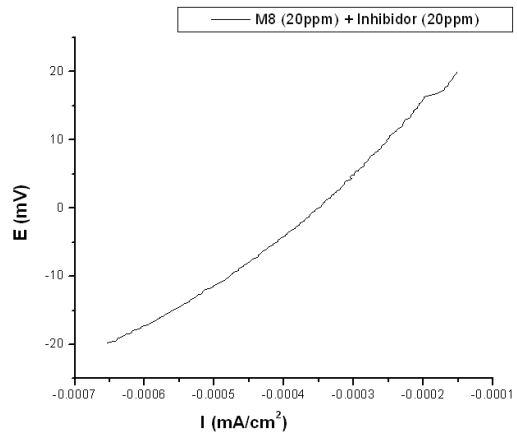
Acero 304 expuesto a 20 ppm de catalizador + 20ppm de inhibidor

Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.36E-03
<p style="text-align: center;">Salmuera + inhibidor</p> 	1.08E-02
<p style="text-align: center;">M1</p> 	1.07E-03

<p style="text-align: center;">M2</p>  <p style="text-align: center;">8.46E-04</p>	<p style="text-align: center;">M2</p> <p style="text-align: center;">— M2 (20ppm) + Inhibidor (20ppm)</p> <p style="text-align: center;">8.46E-04</p>
<p style="text-align: center;">M3</p>  <p style="text-align: center;">2.70E-03</p>	<p style="text-align: center;">M3</p> <p style="text-align: center;">— M3 (20ppm) + Inhibidor (20ppm)</p> <p style="text-align: center;">2.70E-03</p>
<p style="text-align: center;">M4</p>  <p style="text-align: center;">3.39E-03</p>	<p style="text-align: center;">M4</p> <p style="text-align: center;">— M4 (20ppm) + Inhibidor (20ppm)</p> <p style="text-align: center;">3.39E-03</p>

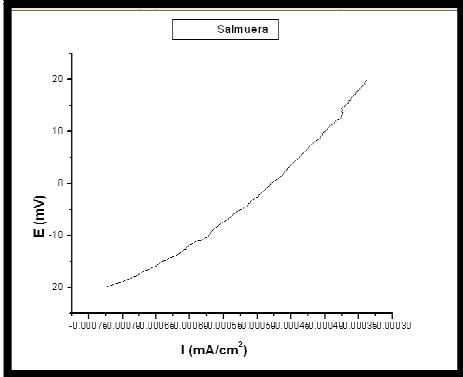
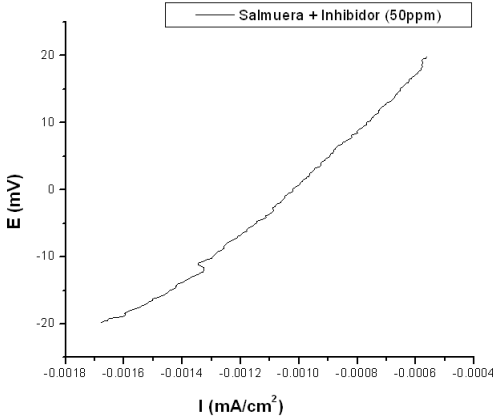
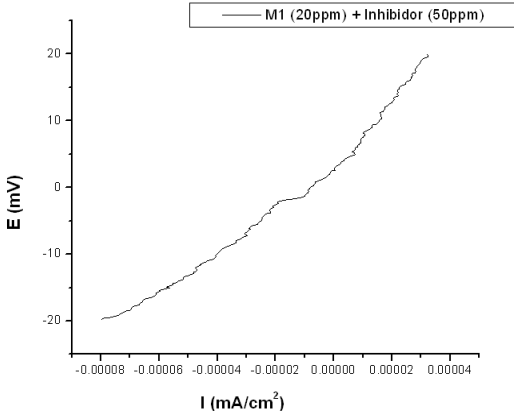
<p style="text-align: center;">M5</p>  <p style="text-align: center;">1.63E-03</p>	<p style="text-align: center;">M5</p>  <p style="text-align: center;">1.63E-03</p>
<p style="text-align: center;">M6</p>  <p style="text-align: center;">3.62E-03</p>	<p style="text-align: center;">M6</p>  <p style="text-align: center;">3.62E-03</p>
<p style="text-align: center;">M7</p>  <p style="text-align: center;">4.80E-03</p>	<p style="text-align: center;">M7</p>  <p style="text-align: center;">4.80E-03</p>

M8

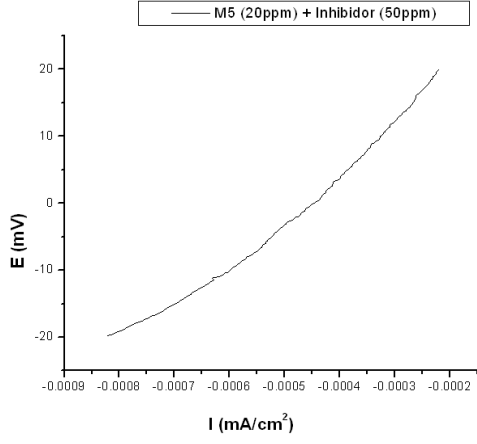
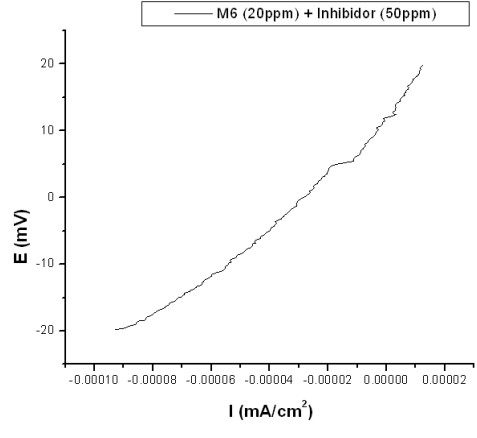
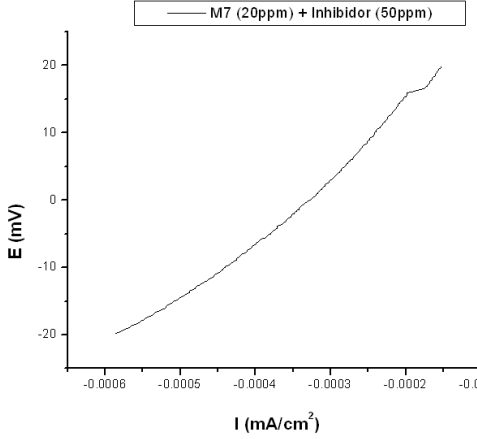


2.09E-03

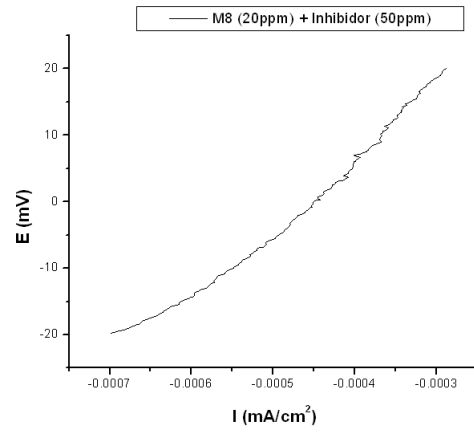
Acero 304 expuesto a 20 ppm de catalizador + 50 ppm de inhibidor

Muestra	Vcorr mm/y
<p style="text-align: center;">Salmuera</p> 	2.36E-03
<p style="text-align: center;">Salmuera + inhibidor</p> 	7.46E-03
<p style="text-align: center;">M1</p> 	3.98E-03

<p style="text-align: center;">M2</p> <p style="text-align: center;">9.52E-04</p>	<p style="text-align: center;">M2</p> <p style="text-align: center;">9.52E-04</p>
<p style="text-align: center;">M3</p> <p style="text-align: center;">1.30E-03</p>	<p style="text-align: center;">M3</p> <p style="text-align: center;">1.30E-03</p>
<p style="text-align: center;">M4</p> <p style="text-align: center;">8.72E-04</p>	<p style="text-align: center;">M4</p> <p style="text-align: center;">8.72E-04</p>

<p style="text-align: center;">M5</p> 	<p>2.67E-03</p>
<p style="text-align: center;">M6</p> 	<p>1.54E-03</p>
<p style="text-align: center;">M7</p> 	<p>4.47E-04</p>

M8



5.79E-03