



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES



**EFFECTO DEL BIODIESEL EN EL COMPORTAMIENTO A
LA CORROSIÓN EN ACEROS DE ULTRA ALTA
RESISTENCIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS
SUSTENTABLES**

PRESENTA

I.M. SAÚL ARTURO VALENZO MACÍAS

DIRECCIÓN: DR. ÁLVARO TORRES ISLAS

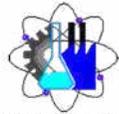
CO DIRECCIÓN: DR. ARTURO MOLINA OCAMPO



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 5 de diciembre de 2023.

DR. JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
DR. HORACIO MARTINEZ VALENCIA
DR. ALVARO TORRES ISLAS
DR. ADRIAN DEL POZO MARES
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta **SAÚL ARTURO VALENZO MACÍAS**, titulada: EFECTO DEL BIODIESEL EN EL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN EN ACEROS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA, realizada bajo la dirección del **DR. ALVARO TORRES ISLAS** del Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DR. JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ	APROBADO	
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO	APROBADO	
DR. HORACIO MARTINEZ VALENCIA	APROBADO	
DR. ALVARO TORRES ISLAS	APROBADO	
DR. ADRIAN DEL POZO MARES	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2023-12-07 10:38:10 | Firmante

tBKLKn9CSuuznjeMBcZetesgijlja8DxXHYqqxUJYJiJaEKE6o/AEUek9d1N8qFzBy6+/GtLuVvy6L11HblmXAgEd+w5otc6op+O3Z4b94p8ZRLyGhvCZ5E5Mx5XjL572TN6RcDdZ0jTTkgUu/G0OSSH4tZnH3GmQv+4k3v23c12/AGQ9B28PYvNXAPL6JVlpQvEMMLtcLqm8kTHeZFAthc78anzEgNBsXjyos4xCL+LBWJ2/UfK2XBynGw888VomHEQt7IPC4IQco+gJNhSBRY3SgVA/xeyFLWeQ3O/3I94NJ/OuUo1g+CzZnzGtaNCHRSfBLEVvL177GdGYPnNA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



0EmtOSzjV

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/s9S7TtrDUpYHdUi8eho9TMZSV08aLR3y>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ALVARO TORRES ISLAS | Fecha:2023-12-07 15:18:23 | Firmante

eUaCKzXUAoyD0W/X4IbOw5eQeMPWkSmCLmiTJWcqr3KXNC0iAVwqpWDtgf7ij8ui12zOSU+BPTbEOHk9NWx5pKiy1uTXiXIPCKVfGPBRHKpa3RCEVtJt9jPhUNevKX4TKy
bPp7AqzRiVhMVjn+yRMrXWzYxm/II2DhSTtHLM1D2zmWPYxv7aK4bqKtnOUcpTui+Eetlv48rpWARw9YObDxnMLx2umvPiMbkRBU+iSCeqobfZoSHp9cBM1UYHAbix4bedfDfR/T
tS+K159yCr0On3KolXhqlmqVYitd0itfEAvjs7Ya2AdZTSa/ffRh/FmSssSadxO6Ec1cMPYA==

ADRIAN DEL POZO MARES | Fecha:2023-12-07 15:20:36 | Firmante

5QBYCn7D+XnGFF43jGxn5hDoAjbV9AD1MuXnNVQyGPz1kcZi9iCh+9/gFKZT1v4fTjV97Aar64+0agOuyUWj/Wi9/tNgiDQJHGSQkxZHNWHwuMxCz6WuOQDc2WK33i/16Oq
TzloLbjAeHMnPxLcoEmShQJn388DcMJW0gCIPiUlyrQ1ksYKowdk492r7YMiGaEiiTzC/VlZ5gZBAdwbAG94QqEelMTiePwFb5d1rijXIFuDIxkVAzYJTiP58ozcWSr6rc/nYcbEbU6o
gka1Eyo0lKpk4i3inpDzOK7V5FKQHtsfnith9BJNoJUuUHaxXNeJgVz2g9MABY707w==

JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ | Fecha:2023-12-07 15:31:31 | Firmante

gHx2eUEqvDjYZtd+ke7nHy+9gcYrlE86Ky1AQRnF3G3eWtlggwnsEl62yLLbqID+KxTYPDB5IEiVhxlqgqI7r1JDixY8QRBra2Ldl762dLurprCJ1NY6BHik3z7a9jW/FZtGfXf8181+z9
bh8BmKbNt5ZOeWU5r+euVLP8+e5F6ujcgJh1fXIAJgN4G5KpCrodVV9YySdUoqh2Uqv58ilBR74g3cMBYHQonPVyYyyw8NgyLQDnn4MBYBG4WfMHFLfWGjF8SSOjVDd+HB63
JWY5l/p45UzvTaj+AlkrtMKHGZN49QWOIs5LZ9Cxz8EgfhmgHxz9xQh6mwXb3/0RPyw==

HORACIO MARTINEZ VALENCIA | Fecha:2023-12-07 16:06:01 | Firmante

nTHOxOkuxc1VNqRyzNbx2r27INrySOXVRbLTzOhGfJQEIVVBzceWAqgFB46lesX9RK1ISVOf5kTJzgbMsn4NEsifVtrEfvbWbqRPARBbB8fprgYnDrc5+YVH0RjdPHhNQU9TL1
5sRuajBuFegtC5AuAMo8dQz2e3MQqoRSLfNspHEZC+kHf4pa4TzUzgoJuch5gZ74DzNVhyz1pTi4xPRbHrw//4LAREKxQlGhNH/FravCleJ8ouJ0y1695VbqA2U/vT3JSDfscamm
0r/FKqb9NdrfXAWEbOuCVrijckYWPuafdbiZ7qUzrudsxkSdlnoV6KZY27aeBNSpSPbw==

ARTURO MOLINA OCAMPO | Fecha:2023-12-07 16:16:35 | Firmante

q2HszK4V5a+fy8LZ6ylrpChjLmWNxskkpdqMw1M6m+rBsNhlZqpYXd8rLIQj7+t92DIslRlQ8b8p5E+BplfYkr0wldStDsvKDUbdtFtyL+vbQ/0spZODY9cICBrxLvwU5nW18ofrV
mBlkGJX5ggakqNEH2AhAjlxDjfnNucK8JfAzqyOUNiwXGsodAf/JqJYli2K5ccOArjUniCkVrNADiRimszRyuDXMleF+b5akfeiHbQJLvV4TNvWDLRTIw1XsFMml6noSRcgZCs8VZJA
bQpOil2wqkC3xvbs54dvoNEqZkizilBaFUapiRFgiTEMtW6/eomvCu+ZOBTAA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[n8vSVIUla](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/xKDN3hISRWz3tUsFTgXvGABvwODCrX>



CONTENIDO.

I. INTRODUCCIÓN.....	5
II. ANTECEDENTES.....	7
III. MARCO TEÓRICO.....	14
III.1 Biodiesel.....	14
III.2 Corrosión.....	15
Tipos de corrosión.....	16
Diagramas de Pourbaix.....	16
III.4 Aceros ultra alta resistencia.....	17
III.5 Tratamientos térmicos.....	18
III.5.1 Templado.....	18
III.5.2 Revenido.....	19
III.6 Técnicas electroquímicas.....	20
Técnica de polarización potenciodinámica.....	20
Espectroscopia de impedancia electroquímica.....	21
IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
V. JUSTIFICACIÓN.....	23
VI. HIPÓTESIS.....	24
VII. OBJETIVOS.....	25
Objetivo General.....	25
Objetivos particulares.....	25
VII.i. METAS.....	26
VIII. METODOLOGÍA.....	27
Tratamientos térmicos.....	27
Metalografía.....	27
Síntesis del biodiesel.....	29
Preparación de las muestras para pruebas electroquímicas.....	30
Pruebas electroquímicas.....	30
IX. RESULTADOS.....	31
Síntesis y caracterización del biodiesel.....	32
Caracterización microestructural de aceros.....	33
.....	34
.....	34

.....	34
.....	34
.....	34
Pruebas electroquímicas.....	41
Polarización potenciodinámica aleación L1.....	41
Espectroscopia de impedancia electroquímica aleación L1.....	43
Curvas de polarización potenciodinámicas aleación L2.....	50
Espectroscopia de impedancia electroquímica aleación L2.....	52
X. CONCLUSIONES.....	57
XI. REFERENCIAS.....	58
XII. LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	62

I. INTRODUCCIÓN.

El auge de la industria petroquímica ha permitido un gran avance en la evolución de la sociedad, introdujo un sinfín de productos y beneficios. Sin embargo, cada vez es más evidente que su empleo ocasiona graves daños a los ecosistemas. Los combustibles fósiles generados a partir de esta industria generan gases nocivos para nuestra atmósfera y los subproductos contaminan el agua y el suelo de nuestro planeta. Debido a esta crisis, globalmente se están buscando soluciones para reducir el impacto ambiental de nuestras acciones. El biodiesel es una alternativa a los combustibles extraídos a partir del petróleo, su uso ha aumentado significativamente, sin embargo, los motores y sus partes que están en contacto con este biocombustible y los recipientes donde se almacena son susceptibles al proceso de corrosión, esto debido a que contiene fracciones de oxígeno y por su higroscopicidad. Por ello es importante seguir innovando en materiales resistentes al biodiesel y de alto desempeño como lo son los aceros de ultra alta resistencia. Estos aceros están diseñados para aplicaciones donde la resistencia es un factor importante como en la industria automotriz y de la construcción. Estos aceros de ultra alta resistencia no solo son resistentes a los esfuerzos de tensión y compresión, también son resistentes a la corrosión y al desgaste. Además, su producción requiere menos energía y son menos costosos que otros materiales de ultra alta resistencia como por ejemplo. el aluminio. Finalmente, en un futuro ya se plantea la idea de la fabricación de aceros “libres de combustibles fósiles” para una producción más sustentable.

II. ANTECEDENTES.

Recientemente, Rocabruno- Valdes (Rocabruno-Valdes, C. I., et al. 2020) estudiaron un biodiesel sintetizado a partir de grasa de pollo, ellos evaluaron el mecanismo de corrosión de Cu, Al, acero 1018 y acero inoxidable 304 mediante técnicas electroquímicas. Para todos estos materiales se observó un único semicírculo deprimido capacitivo, lo que indicó un mecanismo principal de corrosión de transferencia de carga. A partir de 120 días y más el semicírculo apareció a frecuencias altas e intermedias, además de un segundo bucle inductivo, indicando un proceso de corrosión controlado por relajación debido a la adsorción y desorción de especies. El estudio concluyó que la tasa de corrosión aumentó a través del tiempo, el acero 304 y Al mostraron una corrosión localizada, mientras que el acero 1018 y Cu mostraron ambos tipos de corrosión: uniforme y localizada. El proceso de corrosión fue debido a la oxidación del biodiesel, por el contacto con los diferentes metales, incrementando su acidez, viscosidad y la formación de nuevos compuestos agresivos.

En el trabajo de (Fazal et al., 2013) realizado en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Malasia se estudió el comportamiento del cobre 99.9% puro en contacto con biodiesel de palma mediante pruebas de inmersión a temperatura ambiente (25-27°C) durante diferentes periodos de tiempo (200, 300, 600, 1200 y 2880h). Mediante FTIR se analizó la capa de corrosión, encontrando enlaces característicos de CuO, Cu₂O y grupos hidroxilos (OH). Para el biodiesel se obtuvieron estiramientos de grupos O-H, CH₂, C=O, O-C-O. La tasa máxima de corrosión de cobre en biodiesel se obtuvo dentro de los periodos de inmersión 600-1200h. En este estudio se concluyó lo siguiente:

- Los radicales libres son los principales factores de la mayor corrosividad del biodiesel.
- La presencia de picos característicos de grupos O-H después de un periodo de inmersión indica que existe una mayor cantidad de H₂O.
- La corrosión del cobre en biodiesel aumenta con el aumento del tiempo de inmersión. Pero después de un cierto período de inmersión, la formación de compuestos oxigenados en la superficie de cobre expuesta al biodiesel reduce la tasa de corrosión.

El trabajo de (Chew et al., 2013) tuvo como objetivo investigar la corrosión comparativa de metales livianos como el aluminio y el magnesio en biodiesel de palma.

En esta investigación se utilizó biodiesel de palma, aluminio 5086 y Magnesio puro 99.9%.

La prueba de inmersión estática se realizó sujetando las probetas con hilo de seda para permitir la máxima exposición de la superficie. Antes de la inmersión, las probetas se desengrasaron con acetona y se pesaron en una balanza electrónica con precisión de 0,01 mg, el tiempo de inmersión fue de 720 y 1440h.

El magnesio exhibió una tasa de corrosión más alta en comparación con el aluminio. Esto podría atribuirse a la mayor reactividad del magnesio con el biodiesel y a que el magnesio es menos noble en comparación con el aluminio en la serie galvánica.

Tras la exposición al biodiésel el magnesio presento una cubierta similar a un gel, mientras que la superficie de aluminio permaneció limpia.

Mediante analisis FTIR en el biodiesel se encontraron enlaces correspondientes a compuestos portadores de oxígeno (C-OH), aminas (N-H), y alcoholes y fenoles (O-H).

Las conclusiones de este trabajo se enlistan a continuación:

- El magnesio exhibe una tasa de corrosión mucho más alta en biodiesel en comparación con el aluminio.
- La morfología de la superficie de la probeta de magnesio cambio significativamente.
- El biodiesel sufre una degradación significativa al exponerse a los metales.
- No se pudo detectar oxido u otro producto de corrosión mediante XRD.

(Akhábue et al., 2014) estudió las tasas de corrosión del aluminio y acero al carbono en contacto con biodiesel de *jatropha* y mezclas con diésel de petróleo (B0, B50 y B100).

La corrosión de estos materiales se evaluó mediante pruebas de inmersión estática a temperatura ambiente y por un periodo de 18 semanas con los vasos de precipitado abiertos al medio ambiente.

Las probetas se mecanizaron y pulieron en tiras: las de acero al carbono (40 mm de largo × 20 mm de ancho × 1 mm de espesor) y aluminio (40 mm de largo × 25 mm de ancho × 0,9 mm de espesor).

Los resultados mostraron que la corrosión del acero al carbono en biodiesel (B100) es superior a la del diésel. Esta tasa de corrosión pudo ser debido a la presencia de fracciones de oxígeno, ácidos grasos y contenido de agua.

Las tasas de corrosión para el acero al carbón y Al en biodiesel de *jatropha* al final del estudio fueron 0.026 y 0.016 mpy (milésimas de pulgada por año) respectivamente, mientras que, en diésel convencional, las tasas de corrosión fueron 0.011 y 0.0025 mpy para acero al carbón y Al respectivamente. Esto sugiere una resistencia superior del Al sobre el acero expuesto al biodiesel de *jatropha*.

Además, se observó un incremento superior en el índice de acidez del biodiesel de *jatropha* B100 respecto a las mezclas B50 y B0 al final de la investigación. El aumento de este es una indicación de que el combustible está experimentando degradación y formando hidroperóxidos debido a la descomposición del metal, estos se descomponen e interactúan para formar numerosos productos de oxidación, como ácido carboxílico de cadena corta, aldehídos, alcoholes y oligómeros.

El estudio concluyo lo siguiente:

- La corrosión de acero al carbono y Al en estos combustibles aumenta con el aumento del tiempo de inmersión hasta un máximo y luego tiende a una tasa de corrosión de equilibrio.
- Las tasas de corrosión de acero al carbono y Al en el combustible tuvieron la siguiente tendencia B100 > B50 > B0. La mayor tasa de corrosión en el biodiesel podría atribuirse a la presencia de ácidos grasos, fracción de oxígeno y moléculas de agua.
- El índice de acidez fue útil para monitorear la degradación del biodiesel durante el almacenamiento. Indica que estos combustibles experimentan diversos grados de

degradación a lo largo del tiempo. Este incremento fue mayor en los combustibles en los que se encontraban inmersos los aceros al carbono.

(Rocabruno-Valdés, C. I., et al. 2018) estudio el comportamiento de acero al carbono 1018, acero inoxidable 304, aluminio y cobre en biodiesel de canola. Este estudio se realizó mediante las técnicas electroquímicas: ruido electroquímico y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS). El biodiesel se caracterizó mediante FTIR. Para todos los materiales en EIS se observaron semicírculos capacitivos, se realizó una inmersión a diferentes horas para observar si el mecanismo principal de corrosión cambiaba a través del tiempo, sin embargo, el mecanismo de transferencia de carga se mantuvo. A 48 h se observó un aumento en el diámetro de los círculos, esto sugirió que los productos de corrosión protegían a los metales. Después de 48 h el semicírculo disminuyó, esto debido a la degradación del biodiesel con algunos de los productos de corrosión en la superficie de los metales. Se explica que hay dos constantes en el tiempo debido a dos pendientes en el diagrama de Bode.

En este estudio se concluyó que las tasas de corrosión fueron más altas en el acero 1018. Las más bajas fueron las de Cu, seguido del Al. El acero 304L mostró alta susceptibilidad a la corrosión por picadura, mientras el acero 1018 sufrió una corrosión uniforme.

(Komariah, L. N., et. al 2021) realizó un estudio con biodiesel de palma en contacto con materiales de tanques de almacenamiento construidos con acero al carbón, acero galvanizado y acero inoxidable. Estos materiales estuvieron en contacto con el biodiesel en un periodo de 210 días. La oxidación del biodiesel cambió sus parámetros de índice de acidez (TAN), viscosidad y contenido de agua a través del tiempo además del color debido a los óxidos metálicos disueltos. También se observó que el acero inoxidable y el acero galvanizado son propensos a sufrir corrosión por picadura, mientras que el acero al carbón sufre un tipo de corrosión uniforme. Este trabajo remarca la importancia de utilizar aleaciones metálicas de alto rendimiento para lidiar con el agresivo proceso de corrosión que genera el biodiesel.

(Oni, B. A., et al. 2022) realizó un trabajo sintetizando biodiesel a partir un alga llamada *schizochytrium*, primero extrajeron el aceite con hexano, después realizaron el proceso de transesterificación para la obtención del biodiesel. Una vez sintetizado el biodiesel, acero al carbón, Cu y Al fueron inmersos estáticamente en B100, B50, y D100 para comparar las tasas de corrosión en un tiempo de 1200h a una temperatura de 60°C.

Como en otros trabajos la oxidación de biodiesel propicio cambio en los parámetros de TAN, densidad, contenido de agua y viscosidad.

Este trabajo concluyo lo siguiente: el biodiesel puro fue el combustible más corrosivo entre los 3 combustibles que se utilizaron en todos los metales.

El Cu fue el metal más susceptible a la corrosión en el biodiesel de las microalgas *schizochytrium*.

La presencia de O₂, humedad y ácidos grasos incremento la tendencia de los metales a la corrosión cuando están en contacto con B100 y B50.

Aunque el acero al carbón mostro mejor compatibilidad con el biodiesel, también es susceptible a generar cambios en las propiedades del combustible.

Las tasas de corrosión más grandes fueron en el Cu, seguido del acero al carbón y por último el Al.

Mediante un análisis de XRD se determinaron los productos de corrosión, tales como: Fe₂O₃, CuCO₃, Cu(OH), FeO(OH), CuO, FeCO₃ y AlO(OH).

(Dharma, S., et al. 2023) evaluó aceros de medio carbono en mezclas de biodiesel con diésel convencional B50, B40, B30, B20, B10 y B0. El biodiesel evaluado fue sintetizado a partir de aceite de *jatropha curcas* y las pruebas de corrosión se realizaron mediante inmersión estática en periodos de 800h a temperatura ambiente. Como se ha observado en otros trabajos el contenido de biodiesel es directamente proporcional a la tasa de corrosión por año, siendo la tasa de corrosión más alta para la mezcla de B50 y la más baja para el B10, sin tomar en cuenta el diésel de petróleo puro, que fue la más baja de todas las condiciones.

En este estudio se concluyó que además de acelerar el proceso de corrosión, el biodiesel tiende a cambiar la viscosidad y el TAN de las mezclas de combustibles, aun así, estos parámetros permanecieron en los límites establecidos por la norma ASTM D6751. Además, se concluyó que la tasa de corrosión de la mezcla B10 es similar a la del diésel de petróleo.

Este trabajo analizó la corrosión en los aceros de medio carbono mediante la técnica de SEM, esta prueba mostro corrosión la aparición de un tipo de huecos redondos en la superficie del metal.

Importancia de las investigaciones en biodiesel y la corrosión.

El crecimiento poblacional y la demanda exorbitante de energía han provocado el agotamiento acelerado las reservas de combustibles fósiles. Además, la quema de estos genera contaminantes atmosféricos que a su vez al ser respirados por los seres vivos pueden generar problemas de salud en la población, principalmente en el sistema respiratorio. Debido a la problemática los investigadores han buscado alternativas que prometan una relación armoniosa con el ambiente, con el desarrollo sustentable, la eficiencia energética y la salud. El biodiesel es un combustible prometedor para cumplir esta necesidad. Algunas ventajas que tiene este biocombustible son: es biodegradable, no tóxico, reduce las emisiones de gases contaminantes, se produce a partir de materias primas renovables y es compatible con motores antiguos y de nueva generación sin realizar alguna modificación.

Sin embargo, a pesar de ser una alternativa prometedora posee algunas características desfavorables como: inestabilidad oxidativa, proporciona energía y torque ligeramente más bajos, mayor consumo de combustible y es higroscópico, lo cual genera condiciones adecuadas para el proceso de corrosión en los materiales donde se utiliza y almacena.

Lo anterior se asocia con investigaciones que involucran metales y no metales en contacto con biodiésel. Cada autor menciona diferentes resultados, sin embargo, la mayoría de los autores coinciden que el principal factor para generarse el fenómeno de corrosión es el agua y los ácidos grasos encontrados en forma natural, que al estar en contacto con distintos materiales reaccionan de acuerdo con su composición química (Pérez et al., 2013).

III. MARCO TEÓRICO.

III.1 Biodiesel.

El biodiesel es un combustible líquido producido a partir de materia renovable, como los aceites vegetales o grasas animales, que actualmente sustituye parcial o totalmente al diésel de petróleo en los motores, al incorporarlo a un motor convencional se reducen las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de azufre, hidrocarburos aromáticos y partículas sólidas.

Para lograr que el biodiesel se convierta en una alternativa energética real, se necesita que este producto no sólo presente características equivalentes a las del petrodiesel, sino también que, en el conjunto de procesos de obtención, se consigan balances energéticos positivos y llegue al mercado con un costo similar al del diésel de petróleo. Actualmente, éste es el principal obstáculo para la comercialización del biodiesel. Por ejemplo, en los Estados Unidos de América, el precio aproximado del biodiesel es de US\$ 0.5/l, contra US\$ 0.35/l del petrodiesel. La principal causa del elevado costo de este biocombustible radica en el empleo de aceites comestibles vírgenes para su producción; por lo que recientemente se ha explorado la utilización de aceites reciclados o aceites no comestibles en la producción de biodiesel.

El biodiesel se describe químicamente como una mezcla de ésteres de alquilo (metilo y etilo, principalmente), con cadenas largas de ácidos grasos. Estas cadenas, al estar oxigenadas, le otorgan al motor una combustión mucho más limpia. Este combustible puede utilizarse puro (B100, conocido como “gasoil verde”), o en mezclas de diferentes concentraciones con el diésel de petróleo. La mezcla más utilizada en nuestros días es a 20%, es decir, 20 partes de biodiesel y 80 partes de petrodiesel. Cuando es utilizado como aditivo, sus concentraciones normalmente no superan 5% (Ramírez 2012).

Ventajas medio ambientales:

- Se trata de un combustible 100% vegetal y 100% biodegradable, es una energía renovable e inagotable, no genera residuos tóxicos ni peligrosos.

- Las emisiones de CO₂ están, entre un 20 y un 80% menos que las producidas por los combustibles derivados del petróleo tanto en el ciclo biológico en su producción como en su uso. Asimismo, se reducen las emisiones de dióxido de Azufre en casi 100%.
- El biodiésel, como combustible vegetal no contiene ninguna sustancia nociva, ni perjudicial para la salud, a diferencia de los hidrocarburos, que tienen componentes aromáticos y bencenos (cancerígenos). La no emisión de estas sustancias contaminantes disminuye el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias (Pérez et al., 2013).

III.2 Corrosión.

La corrosión es el ataque destructivo de un material por la reacción con el medio ambiente. Las serias consecuencias del proceso de corrosión se han convertido en un problema de trascendencia mundial. Además de los encuentros día a día de esta forma de degradación, la corrosión ocasiona paros de plantas industriales, pérdida o contaminación de producto, reducción de eficiencia, mantenimientos costosos y sobrediseño costoso.

El control de la corrosión se logra conociendo los mecanismos de este problema, mediante el uso de materiales y diseños resistentes, sistemas de protección, dispositivos y tratamientos.

Grandes corporaciones, industrias y agencias de gobierno han establecido grupos y comités para cuidar problemas relacionados con la corrosión, pero en muchos casos las responsabilidades son repartidas entre los fabricantes o productores de sistemas y sus usuarios. Tal situación puede generar fácilmente negligencia y ser bastante costosa en términos de dólares y vidas humanas, como el caso de la explosión del alcantarillado en Guadalajara Jalisco, México, en 1992, donde una fuga de gasolina en ductos provocada por corrosión hizo estallar el sistema de drenaje de esta ciudad, dejando más de 200 personas sin vida, 1800 personas heridas y daños materiales por aproximadamente 75 millones de dólares estadounidenses (Roberge., 2019).

Tipos de corrosión.

Una forma común de clasificar los tipos de corrosión es mediante las siguientes cuatro categorías: corrosión generalizada, corrosión localizada, corrosión combinada con un fenómeno físico, y otros tipos.

Corrosión uniforme: este tipo de corrosión ocurre sobre toda la superficie del material de manera homogénea. Este tipo de corrosión es la que mayor pérdida de material ocasiona, sin embargo, es fácil de predecir y controlar, por lo que un accidente debido a este tipo de corrosión es raro.

Corrosión localizada: este tipo de corrosión representa un mayor riesgo potencial, debido a su difícil detectabilidad, ya que se manifiesta en zonas específicas del material. Los procesos de corrosión localizada de mayor ocurrencia son: galvánica, por fisura, por picadura, por cavitación y microbiológica (Salazar-Jiménez, J. A. 2015)

Diagramas de Pourbaix.

M. Pourbaix ideó un resumen compacto de datos termodinámicos en forma de diagramas de potencial - pH, que se refieren al comportamiento electroquímico y de corrosión de cualquier metal en el agua. Estos diagramas, conocidos como diagramas de Pourbaix, están ahora disponibles para la mayoría de los metales comunes.

Tienen la ventaja de mostrar de un vistazo las condiciones específicas de potencial y pH en las que el metal no reacciona (inmunidad) o puede reaccionar para formar óxidos específicos o iones complejos; es decir, los diagramas de Pourbaix indican los valores de potencial - pH en el que cada especie es estable. Desde el punto de vista de la ingeniería de corrosión, el valor de los diagramas de Pourbaix es su utilidad para identificar los valores de potencial - pH en los que no se produce corrosión, es decir, en los que el propio metal está en fase estable. Controlando el potencial (por ejemplo, mediante protección catódica) y/o ajustando el pH en valores específicos de Pourbaix, puede evitarse la corrosión. Por ejemplo, en el potencial - pH denominado "Fe (inmunidad)" el hierro es estable y no se prevé que se produzca corrosión.

En general, la termodinámica es un excelente punto de partida para muchos estudios de corrosión, y los diagramas de potencial - pH son unas herramientas esenciales. Por esta razón, los diagramas de Pourbaix siguen desarrollándose para interpretar los estudios de corrosión en sistemas específicos de importancia para la ingeniería.

Sin embargo, como todo buen ingeniero sabe, las predicciones deben probarse experimentalmente y validarse antes de utilizarlas, y las predicciones obtenidas mediante diagramas de Pourbaix no son una excepción a esta regla general (Revie, R. W., 2008).

III.4 Aceros ultra alta resistencia.

Los aceros avanzados de alta resistencia son una nueva clase de materiales desarrollados para mantener altos niveles de resistencia con características de alta formabilidad requeridas para su procesamiento y que además representen costos de producción razonablemente bajos.

Entre los diferentes tipos de aceros avanzados de alta resistencia como lo son los aceros de fase dual, los aceros con transformación de fase inducida y los aceros de fases complejas, todos ellos se consideran como buenas opciones para tomarlos como base en el desarrollo de la tercera generación de aceros avanzados de alta resistencia en la actualidad conocidos como aceros de ultra alta resistencia (AUAR). Estos AUAR ofrecen excelente desempeño y ductilidad con una buena combinación de soldabilidad, maleabilidad y tenacidad, además ofrecen una amplia gama de aplicaciones como son en la fabricación de tuberías, automóviles, recipientes a presión, barcos, plataformas marinas, aeronaves, trenes, carcazas de motores de cohetes etc.

También, aseguran buenas características en cuanto a seguridad se refiere, elementos aleantes como el Ti, Ni y V combinados con bajas cantidades de C le proporcionan a este tipo de acero buenas propiedades mecánicas (Xie 2014) (Liu 2016). En tratamientos térmicos posteriores, estos elementos microaleantes se precipitan como carburos y/o carbonitruros los cuales son lo suficientemente finos para impedir el movimiento de las dislocaciones, lo cual resulta en un incremento significativo en la resistencia del acero (Chatterjee 2013). En el diseño práctico, sin embargo, se deben considerar otros factores para el desempeño adecuado

en características tales como: rigidez, resistencia a la corrosión, los choques, y fatiga (Sperle 1996).

III.5 Tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos son procesos de manufactura que permiten modificar las propiedades físico - mecánicas de los materiales sin afectar su composición química, facilitando de este modo un mayor campo de aplicación de estos. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita; la naturaleza y la apariencia de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero (Patino y Rosero, 2016).

III.5.1 Templado.

Se le llama temple, al proceso de calentamiento del acero hasta la temperatura austenítica para posteriormente mantener a esta temperatura durante un tiempo tal que se obtenga una estructura homogénea en la totalidad de la pieza y, por último, enfriar en un medio que proporcione una rapidez mayor a la crítica, que permita la transformación de la austenita a martensita en la mayor cantidad posible y así obtener el completo endurecimiento de la pieza (Palafox, 1996). Los factores que intervienen en el resultado de este tratamiento son: el calentamiento, la velocidad de enfriamiento que a su vez se ve afectada por el tamaño de la muestra y el medio de enfriamiento que puede ser agua, aceite y salmuera.

En la industria metalmecánica y especialmente en procesos que involucre el uso de aceros para herramientas, se hacen necesarias altas durezas, altas resistencias mecánicas, sin que se afecten demasiado las propiedades de resiliencia o tenacidad. Estas características pueden lograrse por medio del tratamiento térmico de temple (Patino y Rosero, 2016).

III.5.2 Revenido.

Los aceros posteriores al temple suelen quedar generalmente demasiado duros y frágiles para los diferentes usos a los que van a ser destinados. Estos inconvenientes se corrigen por medio del tratamiento térmico del revenido. El término revenido hace referencia a aquel proceso industrial en el que se emplean temperaturas no muy grandes como se menciona más adelante, y posteriormente dejándolo enfriar. Dependiendo del material en el que se apliquen estos procedimientos se puede variar la temperatura del revenido entre 160 y 500 °C o más alta. Se realiza normalmente después de un proceso de temple, con el objetivo de alcanzar la proporción de dureza y resistencia deseada. Normalmente este tratamiento se lleva a cabo en hornos de revenido, que se pueden equipar con gas protector opcional. El gas impedirá que la superficie del material se oxide durante el proceso. Para algunos tipos de acero, el tiempo de mantenimiento a la temperatura de revenido es de gran importancia, dependiendo del grado de acero y a determinados intervalos de temperatura pueden producirse un fenómeno conocido como fragilización por revenido, el cual es irreversible, ocurre en un rango aproximado entre 250-400°C y se denomina a menudo como “fragilidad azul”. Dentro de las principales ventajas de este tratamiento se encuentra que la dureza del material se reduce y a cambio aumenta la solidez, lo permite adaptar dichas propiedades (relación dureza/resistencia) para una aplicación específica (Becerra et al., 2021).

III.6 Técnicas electroquímicas.

Técnica de polarización potenciodinámica.

La polarización potenciodinámica es una técnica electroquímica que se utiliza para evaluar la resistencia de los materiales a la corrosión. Esta técnica implica la aplicación de un potencial de polarización variable y la medición simultánea de la corriente que fluye a través del sistema.

Las curvas de polarización resultan ser una importante herramienta en corrosión debido a que se puede obtener información valiosa acerca de los procesos que ocurren, y además se puede obtener la velocidad de corrosión (Estupiñan 2012). La técnica de polarización potenciodinámica, proporciona información acerca de la cinética de la corrosión y de la tendencia del electrodo de trabajo a pasivarse, mostrando la interdependencia entre el potencial de electrodo y la intensidad de corriente (relaciones i vs. E), obteniéndose i_{corr} sin más que una extrapolar cualquiera de las rectas de Tafel mostradas a polarizaciones grandes hasta la línea $E=E_{\text{corr}}$ (González 1989).

Espectroscopia de impedancia electroquímica.

La impedancia electroquímica es una técnica de caracterización electroquímica no destructiva que se utiliza para analizar la respuesta eléctrica de un sistema electroquímico. Esta técnica se utiliza comúnmente en estudios de corrosión, evaluación de recubrimientos, baterías, celdas de combustible, entre otros sistemas electroquímicos.

La técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés “Electrochemical Impedance Spectroscopy”), es un método electroquímico utilizado en estudios de corrosión, el cual se basa en el uso de una señal de corriente alterna (AC) aplicada a un electrodo que se quiere caracterizar para determinar su respuesta (Martín 2014). Las reacciones electroquímicas consisten en la transferencia de electrones hacia la superficie de un electrodo (metal), estas reacciones involucran principalmente la resistencia del electrolito, la adsorción de especies electroactivas y la transferencia de carga hacia la superficie del electrodo (Flores, 2013).

IV. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Una de las principales causas de la contaminación del aire es la quema de combustibles fósiles, ya que la combustión de estos produce grandes cantidades de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre), hidrocarburos no quemados y cenizas finas. Por ello el uso de biodiesel ha incrementado, ya que este combustible se produce a partir de materias renovables y genera menos gases contaminantes (CO_2 , NO_x , SO_x , CO) (Ramírez 2012).

Sin embargo, la mayor preocupación del uso de este combustible es que es más corrosivo que el propio diésel de petróleo por tener higroscopicidad, mayor conductividad eléctrica, mayor polaridad, mayor solvencia, y su presencia de agua y oxígeno promueven el crecimiento microbiano y finalmente su oxidación, además pueden generar agentes corrosivos como los ácidos carboxílicos (Hoang 2020). Lo anterior conlleva a una degradación inminente de los materiales metálicos empleados en las tuberías y elementos de almacenamiento causando fallas catastróficas lo cual no es para nada conveniente para el total aprovechamiento de este biocombustible.

V. JUSTIFICACIÓN.

Debido a al cambio climático y a la crisis energética, de manera global se están buscando alternativas para reducir el impacto que generan los humanos al planeta donde vivimos, el biodiesel es una alternativa de los combustibles generados a partir del petróleo crudo como gasolinas, diésel, gas natural, etc., que además de generar gases nocivos como SO_x , NO_x , SO_2 , CO_2 y CO al ser quemados, cuentan con una disponibilidad limitada. El biodiesel es un combustible generado a partir de materia prima renovable como: grasas animales, aceites vegetales vírgenes y aceites de reúso. Con esto la demanda de producción de biodiesel aumenta y por ende se multiplican sus métodos de almacenamiento y su uso en motores de combustión. El inconveniente del biodiesel es que tiene ciertas propiedades que hacen que sea más corrosivo que el propio diésel. Esto hace necesario un estudio para evaluar nuevos materiales de alto desempeño resistentes al proceso de degradación electroquímica en el sistema biodiesel-metal. Esto cumple con el objetivo 9 y 7 de la agenda 2030 de la ONU “Industria, innovación e infraestructura” y “Energía asequible y no contaminante”, respectivamente.

VI. HIPÓTESIS.

Los aceros experimentales de ultra alta resistencia L1 y L2 en contacto con el biodiesel sufrirán una menor degradación electroquímica en función de las fases presentes y el contenido de Molibdeno y Vanadio, los cuales están relacionado con la formación de pares galvánicos.

VII. OBJETIVOS.

Objetivo General.

Investigar el proceso de degradación electroquímica que produce el biodiesel en contacto con dos aceros de ultra alta resistencia de última generación.

Objetivos particulares.

- 1.- Determinar los mecanismos y procesos electroquímicos de degradación de 2 aceros experimentales de ultra alta resistencia con diferentes contenidos de Mo y V en contacto con biodiesel.
- 2.- Determinar cómo influyen las diferentes fases de los aceros en los mecanismos de corrosión.
- 3.- Determinar cómo influyen las moléculas del biodiesel en la corrosión de los aceros.

VII.i. METAS.

1. Sintetizar el biodiesel mediante la reacción de transesterificación a partir de un aceite de soya y caracterizarlo mediante espectroscopia Raman.
2. Realizar tratamientos térmicos de temple y revenido a los aceros L1 y L2.
3. Determinar las fases presentes en cada uno de los aceros y sus diferentes condiciones mediante microscopia óptica.
4. Realizar las pruebas electroquímicas con el equipo potenciostato Gill AC Instruments.
5. Establecer los mecanismos, procesos y tipo de corrosión de las dos aleaciones en contacto con el biodiesel, analizando los parámetros electroquímicos de densidad de corrosión (I_{corr}), potencial de corrosión (E_{corr}), módulo de impedancia $|Z|$, y ángulo de desfasamiento Θ .

VIII. METODOLOGÍA.

Se utilizaron dos aleaciones experimentales de aceros de ultra alta resistencia denominados L1 y L2, que fueron cortados en cubos de aproximadamente 1 x 1 x 1 cm para las pruebas. La composición química se obtuvo a partir de la técnica de espectroscopia de emisión de chispa de los aceros, dicha composición se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Composición (% peso) química de los aceros L1 y L2.

	C	Mn	Si	Ni	Cr	Al	Ti	Nb	S	P	Mo	V	Cu
L1	0.4	0.8	0.72	0.0071	0.95	0.03	0.0043	0.02	0.011	0.018	2.00	0.086	0.021
L2	0.4	0.7	0.74	0.0064	0.86	0.03	0.0035	0.02	0.011	0.018	2.44	0.101	0.022

Tratamientos térmicos.

Los aceros fueron templados en un horno a una temperatura de 850°C por 40 minutos, se enfriaron en agua estática.

Dos de las muestras además de ser templadas fueron revenidas en un horno a 350°C por 30 minutos enfriados a temperatura ambiente.

Metalografía.

Para realizar el análisis microestructural de los aceros fue necesario pulir las piezas desde lija 120 hasta 2000, terminando con paño y alúmina para obtener un acabado espejo (figura 1)). Se realizó una solución de nital al 2% para revelar la microestructura. La caracterización fue realizada en un microscopio óptico marca Olympus (figura 2).



Figura 1 Aceros L1 y L2 en sus diferentes condiciones en acabado espejo.



Figura 2 Microscopio óptico marca Olympus.

Síntesis del biodiesel.

El biodiesel utilizado en este estudio fue sintetizado en el Instituto de Ciencias Físicas a partir de una reacción de transesterificación en donde un triglicérido necesita reaccionar con 3 moléculas de metanol, en una reacción reversible para formar biodiesel (ésteres de metilo) y glicerol. En la figura 3 se muestra el proceso de la reacción.

Se utilizó alcohol metílico e hidróxido de sodio grado analítico y aceite de soya.

El biodiesel obtenido fue lavado con agua y posteriormente fue secado con sulfato de sodio anhidro.

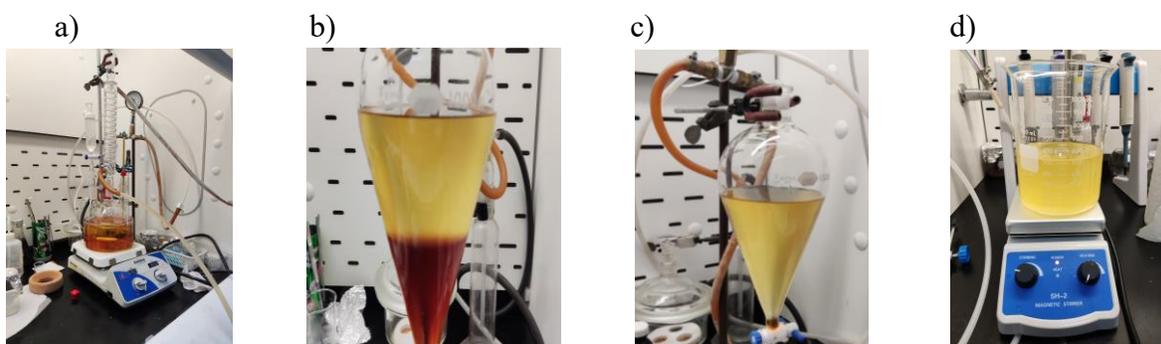


Figura 3 a) Proceso de transesterificación b) Embudo de decantación con glicerol y biodiesel c) Separación de fases d) Proceso de lavado y secado del biodiesel.

Preparación de las muestras para pruebas electroquímicas.

Las muestras para los ensayos de corrosión se prepararon cortando cada acero en cubos de 1 cm³ y encapsulando en resina cristal (figura 4). Por último, se taladro y se colocó un tornillo verificando que existiera continuidad con el acero para facilitar las pruebas electroquímicas. Se utilizaron 30ml de biodiesel por prueba y este se cambió en cada uno de los ensayos.



Figura 4 Preparación del encapsulado de las muestras para las pruebas electroquímicas en resina cristal.

Pruebas electroquímicas.

Se utilizaron las técnicas de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y polarización potenciodinámica con un potenciostato de instrumentos ACM Gill AC Instruments (figura 5). Las mediciones electroquímicas se realizaron en una celda típica de tres electrodos (figura 6), donde se utilizó un electrodo de referencia Ag/AgCl en una solución saturada de KCl, un electrodo auxiliar de grafito y los aceros de ultra alta resistencia L1 y L2 en sus tres diferentes condiciones (llegada, templado y revenido) como electrodos de trabajo. Antes de su inmersión los electrodos de trabajo fueron lijados con papel de lija de grado 600. Para las mediciones de impedancia se aplicó un rango de frecuencia de 0.01 hasta 10000 Hz. Se aplicó polarización de -400 a 800mV a una velocidad de barrido de 60mV/min. Cada ensayo se realizó por triplicado. Todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente.



Figura 6 Potenciostato para pruebas electroquímicas tipo Gill de ACM Instruments.

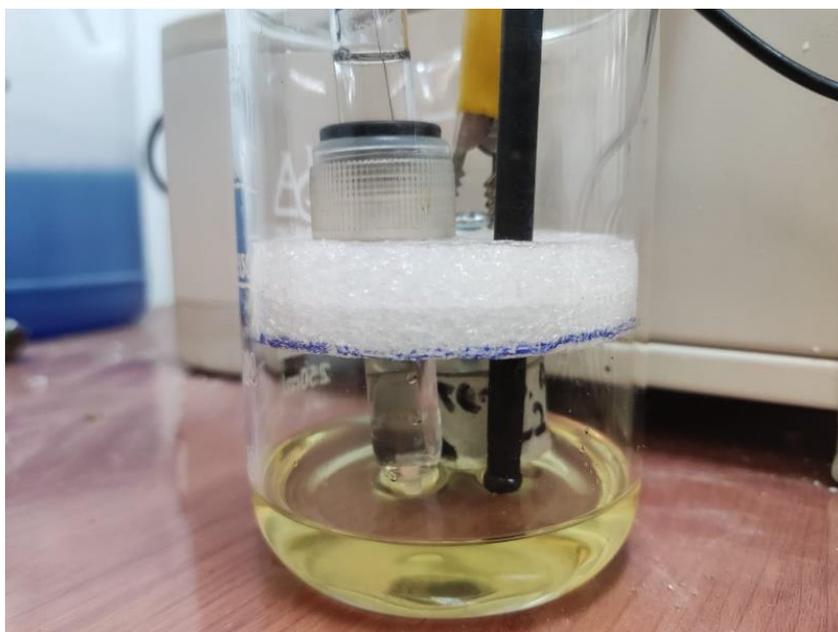


Figura 5 Celda electroquímica de 3 electrodos utilizada para las pruebas; electrodo de trabajo (aceros L1 y L2), auxiliar de grafito y Ag/AgCl de referencia.

IX. RESULTADOS.

Síntesis y caracterización del biodiesel.

La caracterización del biodiesel se realizó mediante espectroscopia Raman. En la tabla 2 se muestra el porcentaje en peso de ácidos grasos del biodiesel producido a partir de aceite de soya (Bajpai, D., & Tyagi, V. K. 2006), en esta tabla se puede observar que el biodiesel de soya está compuesto principalmente por ácidos grasos insaturados y en menor medida ácidos grasos saturados, esto también ha sido reportado en (Fazal, M. A., Rubaiee., et al 2019) donde se menciona que alrededor del ~80% del biodiesel de soya son ácidos grasos insaturados y ~19% son saturados. En la tabla 3 se muestran las bandas obtenidas en la prueba de espectroscopia Raman, en la figura 7 se muestra el espectro Raman del biodiesel. Se encontraron bandas: C=O, CH₃, CH₂, C-O, C-H, C-C, OH y [CH₂]_n típicas de un metil éster. El pH del biodiesel antes de realizar las pruebas electroquímicas fue de 7, al final de las pruebas el biodiesel cambio a un pH ligeramente ácido de 5. Esto se confirma en (Zuñiga-Díaz, J., 2018) donde el aumento de índice de acidez (mgKOH/g) en biodiesel almacenado indica la presencia de ácidos grasos libres.

Tabla 2 Contenido de ácidos grasos (% peso) típicos en un biodiesel sintetizado a partir de aceite de soya, el primer valor indica el numero de carbonos y el segundo la cantidad de insaturaciones ej. (18:1), 18 carbonos, 1 insaturación.

Porcentaje en peso de ácidos grasos								
Aceite	12:00	14:00	16:00	18:00	18:1	18:2	18:3	22:1
Soya	-	-	2.3-11	2.4-6	22-30.8	49-53	2-10.5	-

Tabla 3 Bandas de la técnica de espectroscopia Raman para el biodiesel sintetizado a partir de aceite de soya.

GRUPO	BANDA (cm ⁻¹)
C-C	600
[CH ₂] _n	792
C-O	1060
CH ₂	1300
CH ₃	1450
C=O	1650
C-H	2850
OH	3120

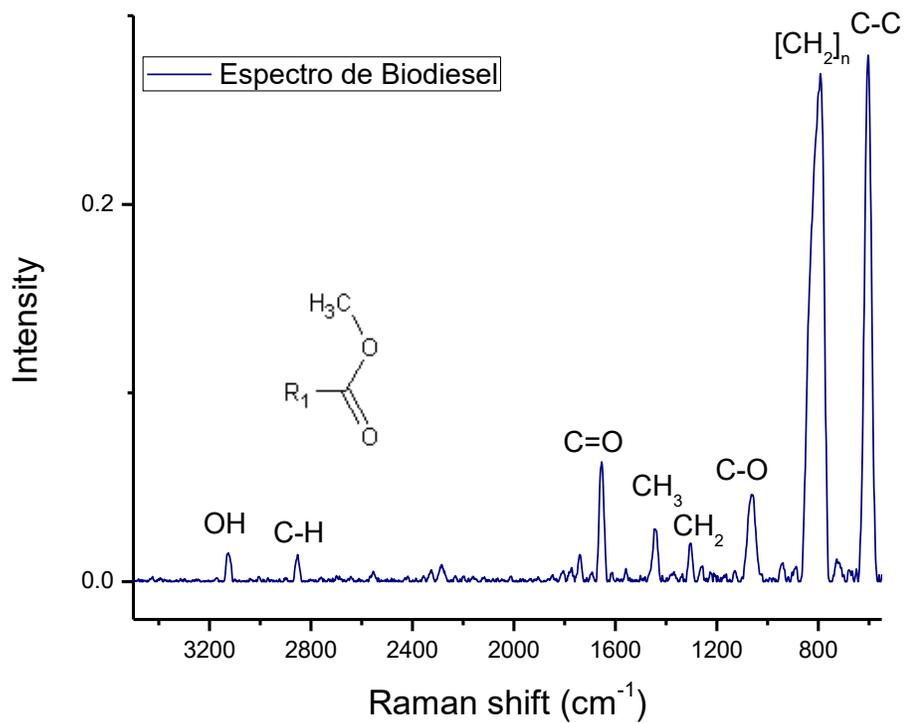


Figura 7 Espectro Raman del Biodiesel.

Caracterización microestructural de aceros.

La caracterización microestructural de los aceros L1 y L2 fueron realizados en un microscopio óptico.

De la figura 8 a la 13 se muestran las imágenes obtenidas a 20x, con las diferentes condiciones; llegada, templado y revenido de cada uno de los aceros.

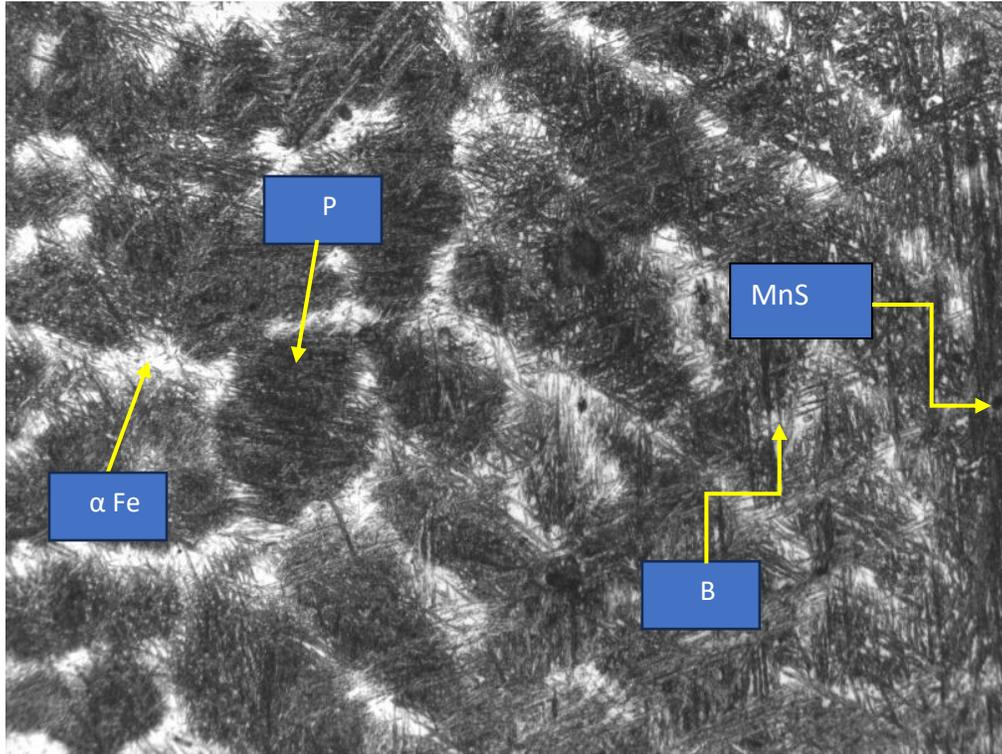


Figura 8 Acero L1 de llegada visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, perlita (P), bainita (B), ferrita (α Fe).

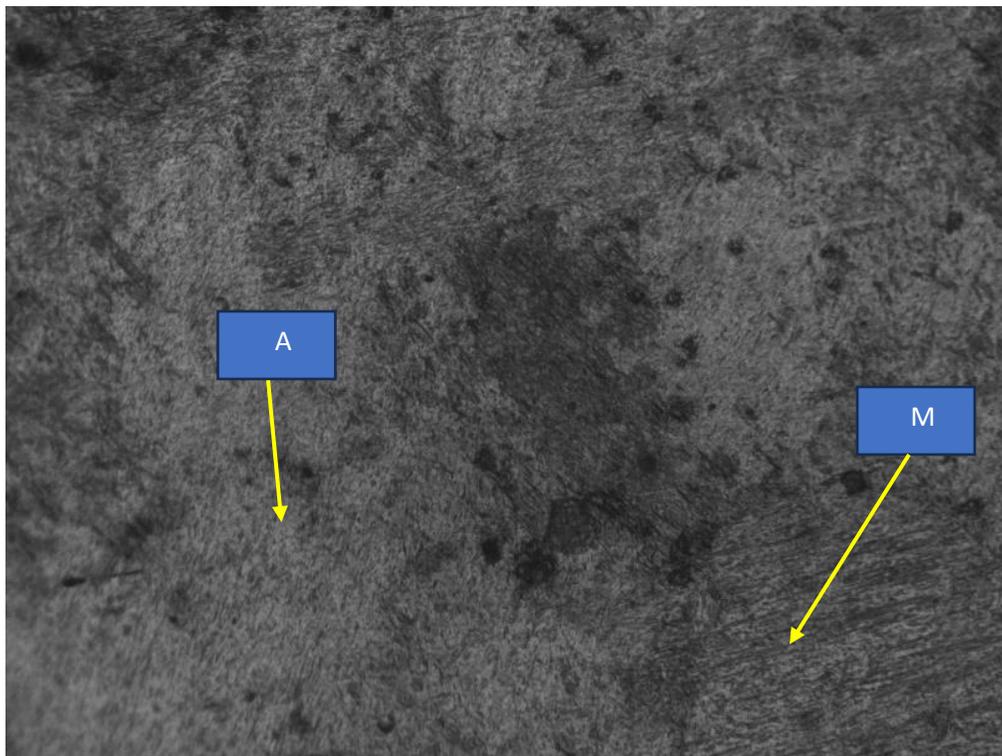


Figura 9 Acero L1 con tratamiento térmico de temple visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, austenita (A) y martensita (M).

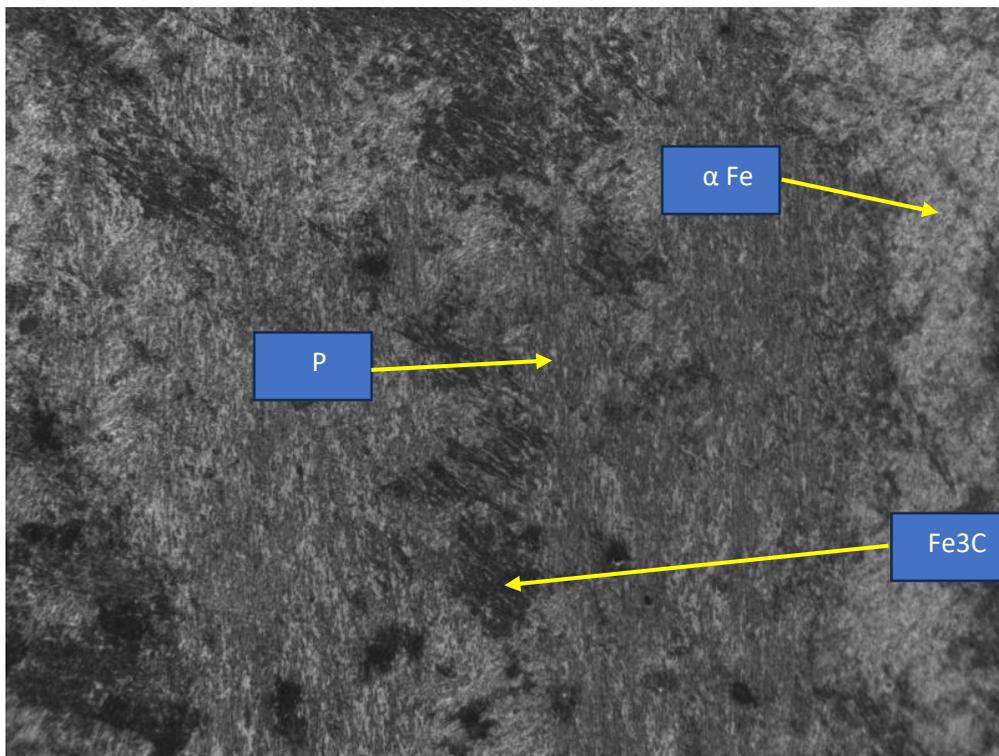


Figura 10 Acero L1 revenido visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes después del tratamiento de revenido, perlita (P), cementita (Fe₃C) y ferrita (α Fe).

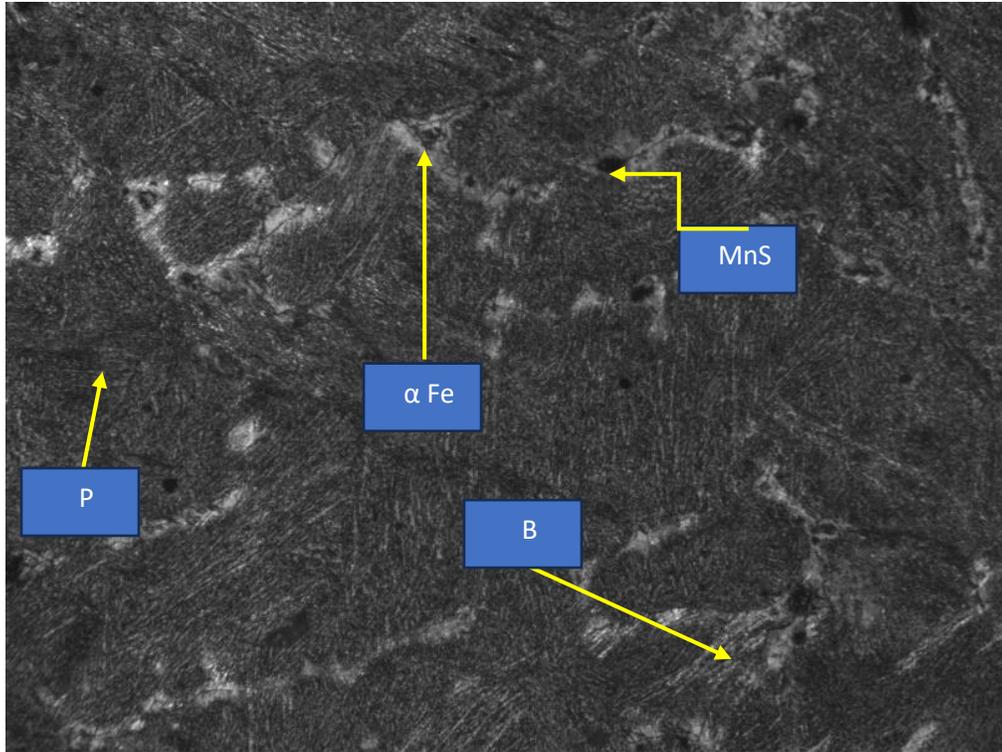


Figura 11 Acero L2 de llegada visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, perlita (P), bainita (B), ferrita (α Fe).

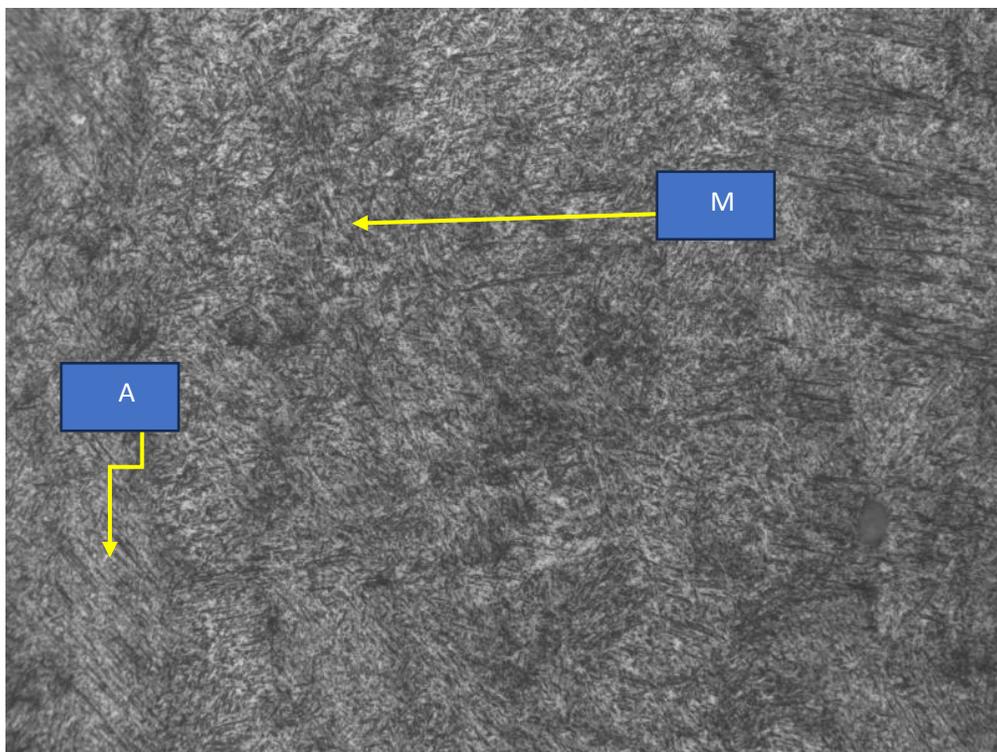


Figura 12 Acero L2 con tratamiento térmico de temple visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, austenita (A) y martensita (M).

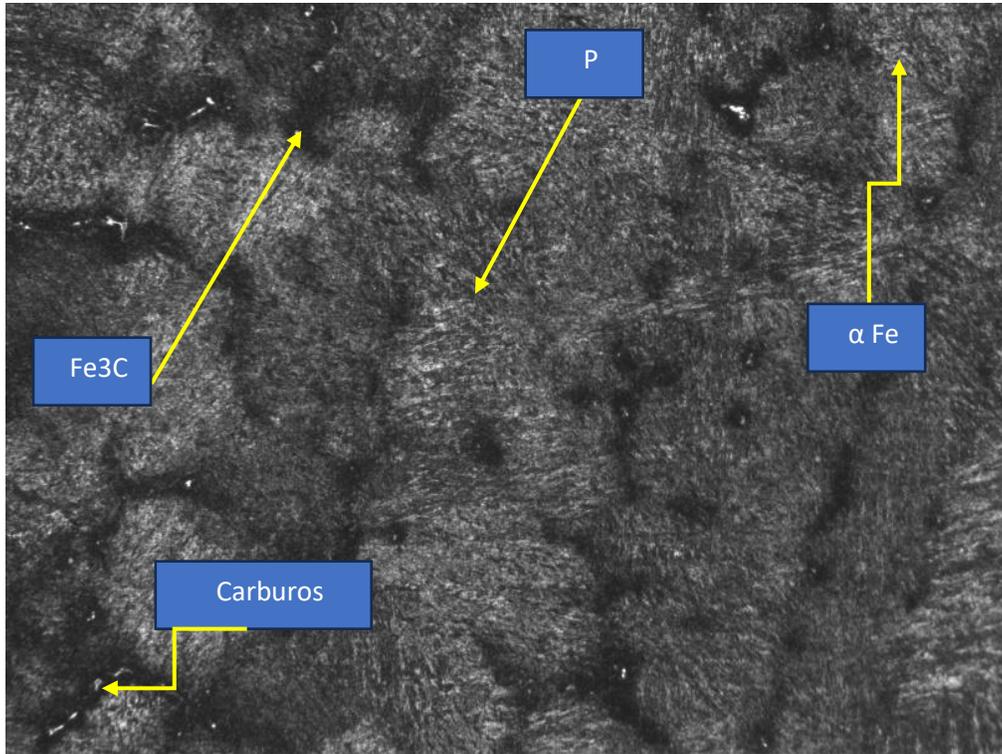


Figura 13 Acero L2 revenido visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes después del tratamiento de revenido, perlita (P), cementita (Fe₃C) y ferrita (α Fe).

Ambos aceros L1 y L2 fueron fabricados mediante un proceso de colado en un horno de inducción de alto vacío, en las figuras 8 y 11 se observan los aceros L1 y L2 en condiciones de llegada, en la misma imagen se señalan las fases presentes en dichos aceros, los cuales tienen una base ferrítica, además de fases como perlita y bainita.

En las figuras 9 y 12 se muestran los aceros L1 y L2 con un tratamiento de temple, en ambas condiciones se observa una estructura tipo aguja de martensita y austenita retenida, sin embargo, en el acero L1 se observan puntos oscuros. Estos puntos podrían ser inclusiones que no fueron eliminadas en el proceso de temple en el horno. Por la composición de los aceros las inclusiones pueden incluir principalmente sulfuros de manganeso y sulfuros de níquel.

Por último, en las figuras 10 y 13 se muestran los aceros L1 y L2 con un tratamiento de revenido, en este proceso se busca obtener martensita revenida principalmente además de que se consigue reducir las tensiones que se generan en el proceso de temple, esta fase está compuesta de cementita F_3C en una matriz de ferrita ($\alpha - Fe$) y por el contenido de carbono, también existe perlita.

Además de las fases presentes debido a la presencia de Mo, V y Cr, tanto en el proceso de temple y el de revenido se encontraron precipitados principalmente de carburos; MoC, VC y CrC, sin embargo, hay que destacar que la aleación L2 puede contener más de estos segregados debido a su mayor contenido de Mo y V.

Pruebas electroquímicas.

Polarización potenciodinámica aleación L1.

En la figura 16 se presentan los resultados de las pruebas instantáneas de la técnica de polarización potenciodinámica aplicada a cada una de las condiciones del acero L1; llegada, templado y revenido.

Se observa que no existe pasivación en ninguna de las condiciones de los aceros y en general se observa un mecanismo de corrosión de disolución anódica continua. La rama anódica constante indica una superficie activa, esto quiere decir que en el acero se están llevando a cabo reacciones de oxidación.

En la tabla 3 se muestran los valores obtenidos para el potencial de corrosión (E_{corr}) y la densidad de corriente (I_{corr}). Se puede observar que la densidad de corriente fue similar para las 3 condiciones del acero L1, sin embargo, los potenciales fueron diferentes para cada uno, siendo el valor más grande el del acero revenido con un potencial de 691.94mV y el potencial más pequeño de 231.39mV para el acero de llegada. Este comportamiento se atribuye a las fases presentes en el acero revenido, ferrita y F_3C más algunos precipitados de Mo y V, que en conjunto forman pares galvánicos, sin embargo, al contar con estos carburos que actúan como cátodos las reacciones de oxidación son retrasadas generando así un potencial más positivo. A pesar de la existencia de estas celdas, el potencial de corrosión más grande sugiere una mejor resistencia a la corrosión.

En la figura 15 se observa la comparación de los I_{corr} vs la condición del acero L1.

Tabla 4 Valores de I_{corr} y E_{corr} obtenidos de la prueba de polarización potenciodinámica del acero L1 en las 3 condiciones.

ACERO L1		
CONDICIÓN	I_{corr} (mA/cm ²)	E_{corr} (mV)
LLEGADA	0.021	231.39
TEMPLADO	0.020	361.69
REVENIDO	0.023	691.94

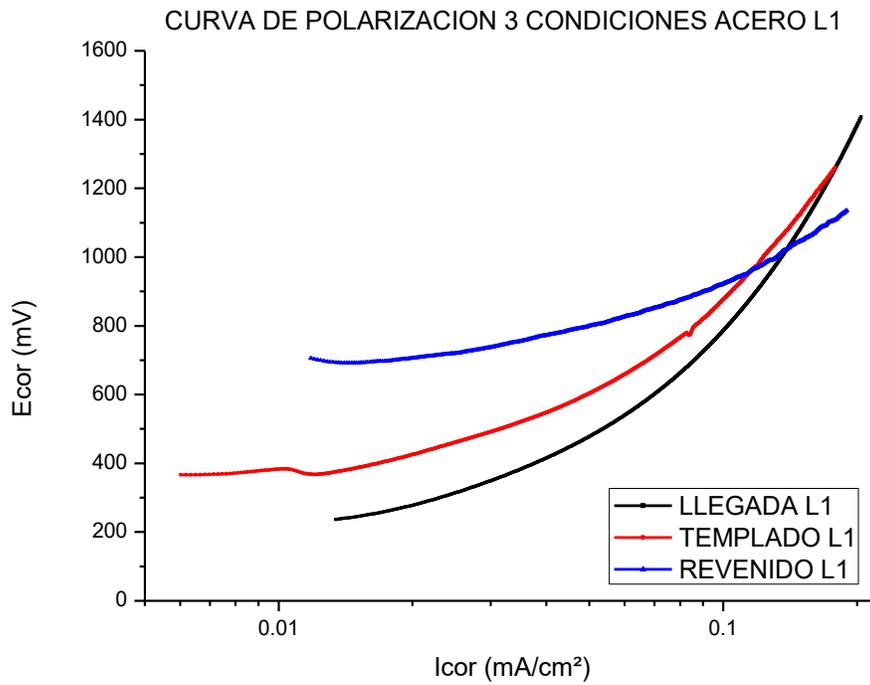


Figura 14 Curvas de polarización instantáneas para el acero L1 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.

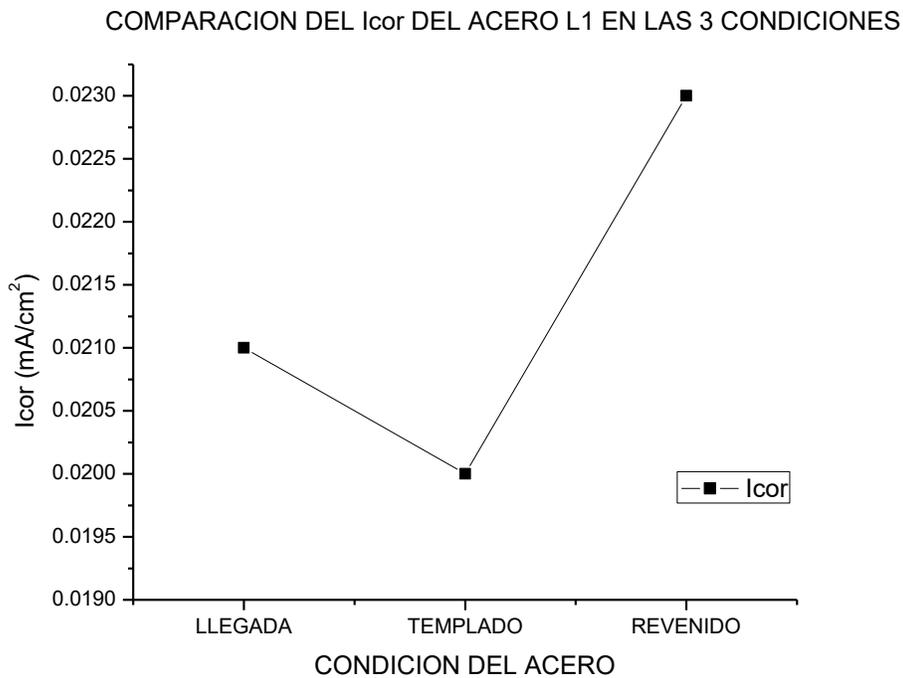


Figura 15 comparación de valores de Icor respecto a la condición del acero L1.

Espectroscopia de impedancia electroquímica aleación L1.

En la figura 16 se muestran los resultados de las pruebas instantáneas de EIS para el acero L1 en sus 3 condiciones; llegada, templado y revenido. En el diagrama de bode existe una primera constante en el tiempo a altas frecuencias ($<10000\text{Hz}$) esto debido a la presencia de una capa inhibidora propia del biodiesel, esto se ha presentado cuando una capa aceitosa es adsorbida por la superficie del metal, esta capa actúa como una barrera efectiva a la difusión de agentes corrosivos (Porcayo-Calderón, J., et al. 2017).

Una segunda constante a frecuencias intermedias (1-1000Hz) sugiere la presencia de productos de corrosión que no son protectores, ya que en los resultados de polarización no existió evidencia de pasivación. Algunos autores como (Fazal et. al. 2011) han encontrado que para aceros al carbón se forman productos de corrosión como Fe_2O_3 , Fe_2CO_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_2$ cuando están en contacto con biodiesel. Además, la absorción de CO_2 , O_2 y H_2O puede dar lugar a la generación de compuestos como el H_2CO_3 . Las reacciones químicas que describen el mecanismo de corrosión de las aleaciones a base hierro en contacto con biodiesel (figura 16) se presentan a continuación (Hoang, A.T. et, al 2020):

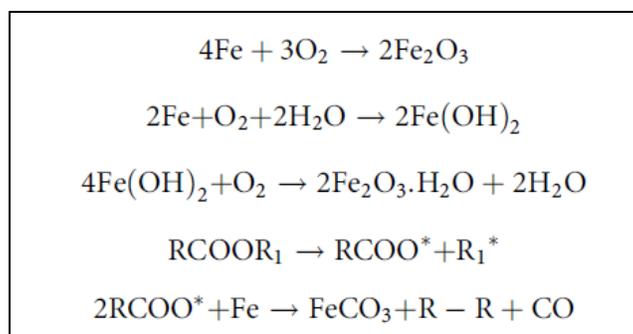


Figura 16 Reacciones químicas que describen el mecanismo de corrosión en aleaciones de hierro en contacto con biodiesel.

Como se observa en la figura 17 el diagrama de Nyquist, el acero L1 en las 3 condiciones muestra un único semicírculo capacitivo, esto indica un proceso controlado de transferencia de carga. La figura 18 presenta los resultados del módulo de la impedancia en las pruebas de EIS en la cual se observa que la mayor magnitud fue la del acero de llegada y la menor fue la del acero templado.

Los valores más grandes de impedancia se obtuvieron en el acero de llegada, esto es debido a que existen más reacciones entre los pares galvánicos a causa de las fases presentes, por lo tanto, habrá una capa de productos de corrosión que, a pesar de ser permeable, la presencia de estas especies retarda la transferencia de carga y genera una mayor impedancia. Al contrario del acero templado y del acero revenido que por contener martensita y cementita respectivamente generan menor número de pares galvánicos en la superficie de los aceros, lo que se traduce en una capa de productos de corrosión menos abundante permitiendo así una transferencia constante.

A pesar de que las reacciones mostradas en la figura 16 sugieren la presencia de algunos óxidos protectores como el Fe_2O_3 estos no están en cantidad suficiente como para pasivar la superficie, ya que las curvas de polarización mostradas anteriormente tuvieron un comportamiento de curva constante, es decir un mecanismo de disolución anódica continua.

Esto finalmente se traduce a una corrosión de tipo uniforme.

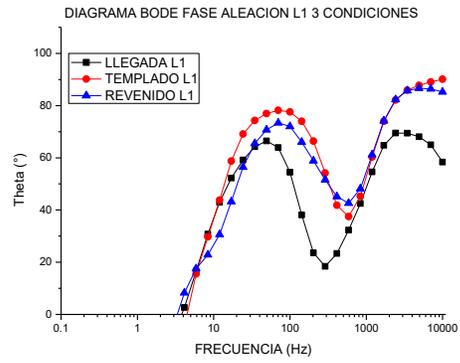
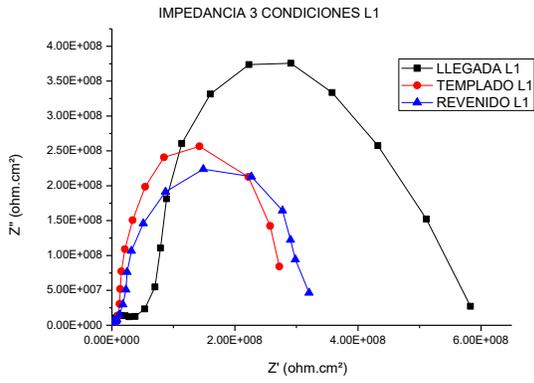


Figura 17 Diagrama de Nyquist y Bode fase de las pruebas instantáneas de EIS para el acero L1 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.

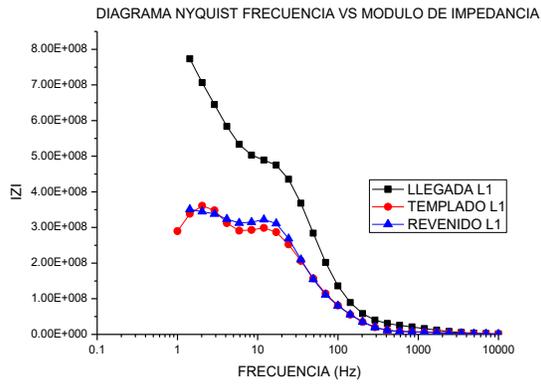


Figura 18 Gráfica de módulo de impedancia |Z| de EIS para el acero L1 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.

En las siguientes figuras se observan las gráficas de Nyquist, de módulo de impedancia y BODE fase para el acero L1 en las 3 condiciones: llegada, templado y templado y revenido, todos fueron evaluados en una prueba de espectroscopia de impedancia electroquímica en un intervalo de 12h por 24h para observar el comportamiento de la celda en función del tiempo de inmersión. En todas las gráficas de Nyquist (Figuras 19, 21 y 23) se repite el mecanismo observado anteriormente, el de transferencia de carga, esto se puede concluir observando el semicírculo capacitivo formado a frecuencias intermedias. Revisando las gráficas de módulo de impedancia (figuras 20, 22 y 24) se observa que los valores más grandes de módulo de impedancia se dieron en la condición de llegada y los más bajos en el revenido. Por último, en los diagramas BODE fase, en las 3 condiciones del acero L1 se observa un desfase de 90° a frecuencias altas (10000Hz) y otro a frecuencias intermedias (1-1000Hz) a pesar de los diferentes valores de impedancia. Este desfase indica un comportamiento principalmente capacitivo. La segunda constante de tiempo prevalece, esto significa que a pesar el tiempo de inmersión sigue adsorbiéndose una capa protectora en la superficie debido al biodiesel mencionada anteriormente y que tiene características protectoras.

Aunque en general se observe un proceso de transferencia de carga en todas las pruebas de inmersión en los intervalos de 12h, las pequeñas variaciones entre 0h, 12h y 24h que existen en las diferentes condiciones de los aceros, pueden ser debido a la cantidad de los productos de corrosión que se producen en la superficie del metal en cada prueba, generando así diferentes valores de impedancia para cada intervalo de tiempo.

Algunos autores como (Rocabruno-Valdés, et al. 2020) realizaron pruebas de hasta 180 días de inmersión en biodiesel de grasa de pollo, en estas pruebas el mecanismo de corrosión permaneció inalterado hasta los 120 días. Después de este periodo apareció un loop inductivo a bajas frecuencias descrito como un proceso de corrosión controlado por un proceso de relajación debido a la adsorción y desorción de especies.

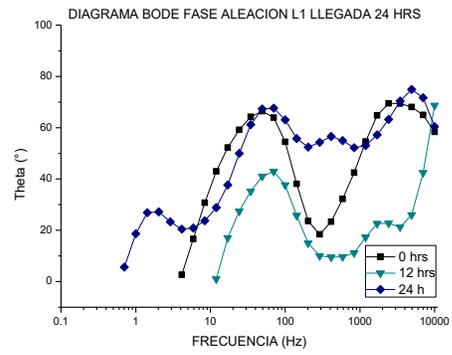
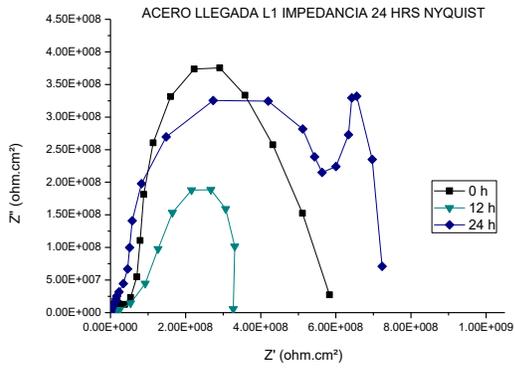


Figura 19 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L1 de llegada en inmersión por 24h en EIS.

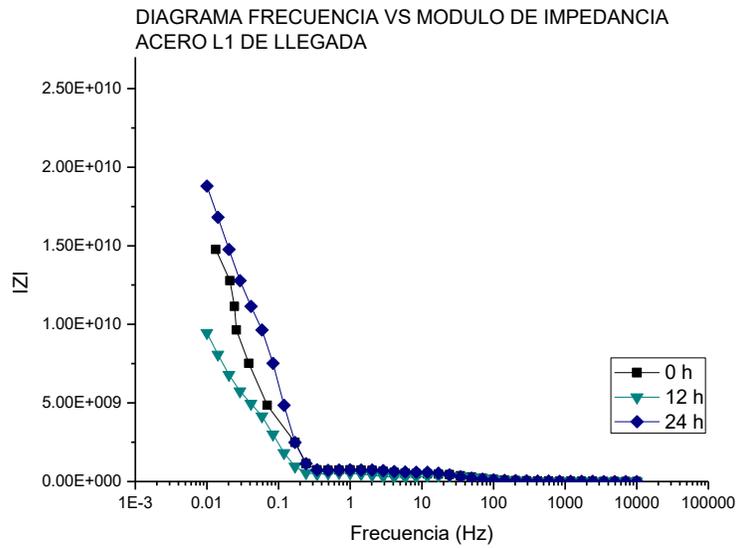


Figura 20 Diagrama módulo de impedancia |Z| del acero L1 de llegada en inmersión 24h en EIS.

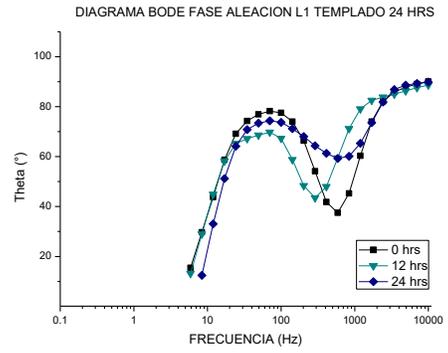
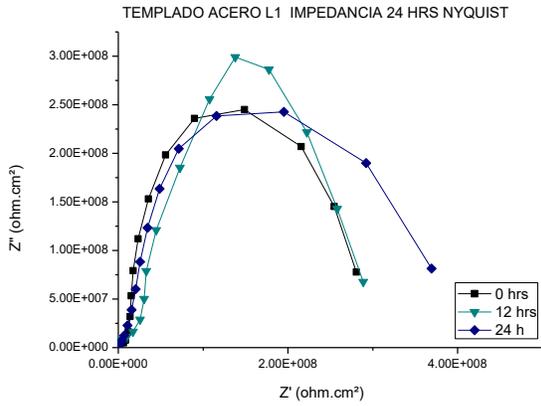


Figura 21 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L1 templado en inmersión 24h en EIS.

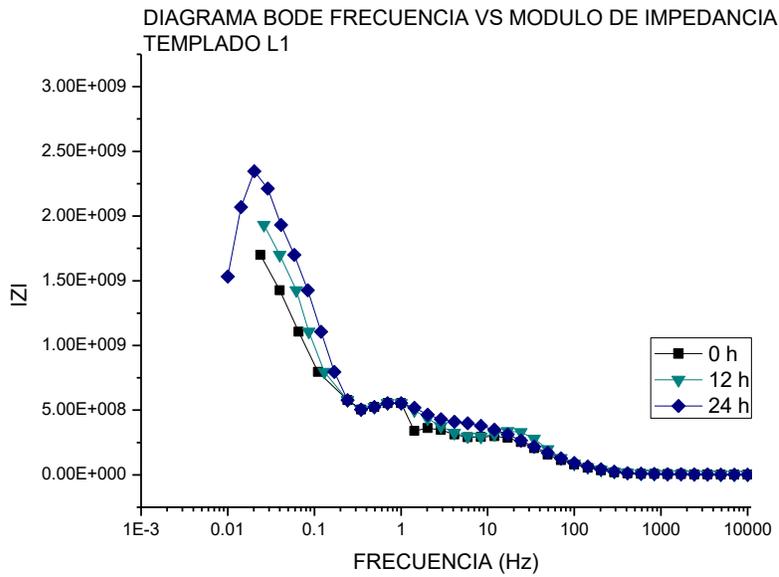


Figura 22 Diagrama BODE fase aleación L1 templado en inmersión 24h en EIS.

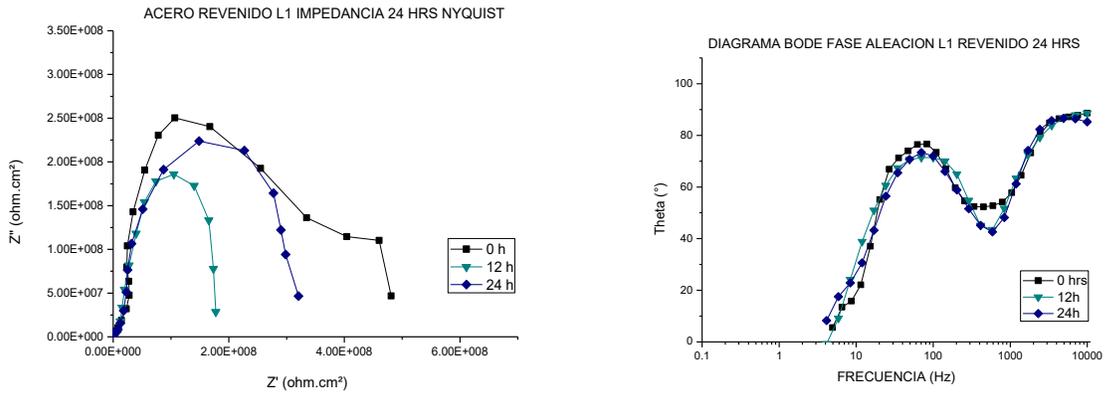


Figura 23 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L1 revenido en inmersión 24h en EIS.

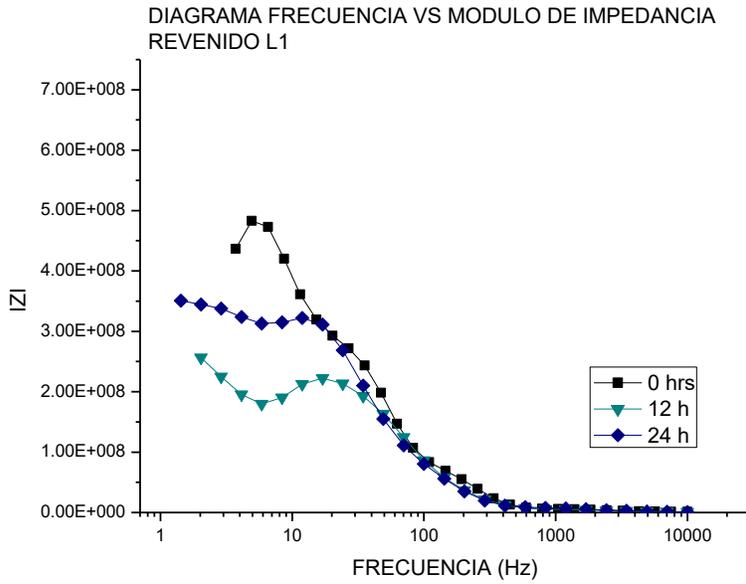


Figura 24 Diagrama de módulo de impedancia del acero L1 revenido en inmersión 24h en EIS.

Curvas de polarización potenciodinámicas aleación L2.

En la figura 25 se observa los resultados de la prueba de polarización potenciodinámica para la aleación L2 en sus 3 condiciones. La condición de llegada y templado muestran un comportamiento similar al de la aleación L1, solo se observa la rama anódica en las curvas. Sin embargo, en el acero revenido se observan las dos ramas, catódica y anódica. En la tabla 4 se muestran los valores obtenidos para I_{corr} y E_{corr} . Analizando la tabla y la curva de polarización se observó que el acero que mostro una densidad de corriente menor fue el acero L2 revenido. Esto sugiere que el contenido de Mo y V cuyos % son los que se variaron para la fabricación de los aceros L1 y L2 aumenta en un rango significativo la resistencia a la corrosión, esto debido a una combinación de factores; el revenido es un tratamiento para obtener una dureza y resistencia adecuada después de un tratamiento de temple, en este se alivian las tensiones, esto reduce una posible corrosión por esfuerzos residuales y por fracturas, además de que en esta condición existe cementita, la cual al contener carbono actúa de forma catódica, finalmente la formación de carburos de Mo y V en mayor cantidad dará como resultado una superficie más resistente a la corrosión.

Un potencial positivo o menos negativo y una densidad de corriente relativamente pequeña es lo deseable para evitar o disminuir los procesos de corrosión, sin embargo, es preferible tener una menor densidad de corriente, ya que un valor más grande de esta magnitud contribuiría a acelerar el proceso de corrosión y generar desgaste en el electrodo.

En la figura 24 se observa la comparación de los I_{corr} vs las tres diferentes condiciones de los aceros.

Tabla 5 Valores de I_{corr} y E_{corr} obtenidos de la prueba de polarización potenciodinámica del acero L2 en las 3 condiciones.

ACERO L2		
CONDICIÓN	I_{corr} (mA/cm ²)	E_{corr} (mV)
LLEGADA	0.0019	1321.90
TEMPLADO	0.0087	1200.58
REVENIDO	5.41E-8	-49.70

CURVAS DE POLARIZACION ALEACION L2 3 CONDICIONES

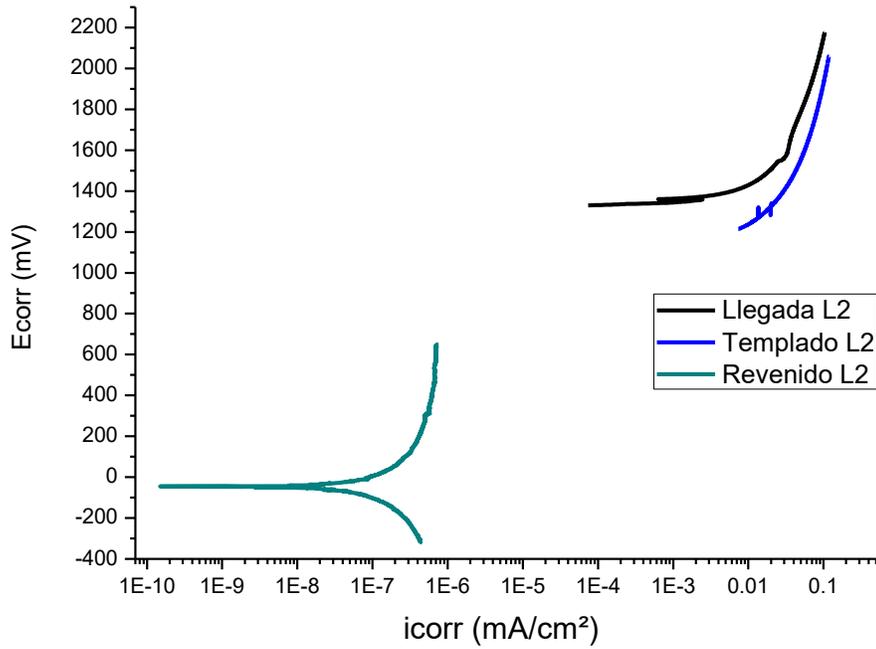


Figura 25 Curvas de polarización instantáneas para el acero L2 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.

COMPARACION DEL Icor DEL ACERO L2 EN LAS 3 CONDICIONES

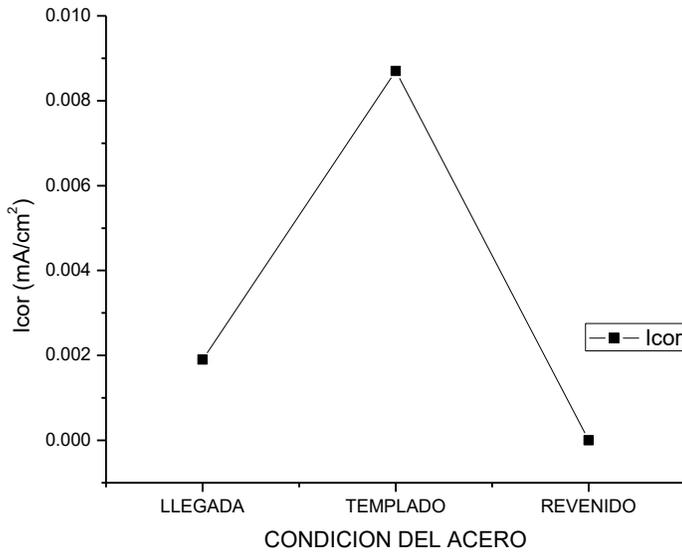


Figura 26 Comparación del Icor respecto a la condición del acero L2

Espectroscopia de impedancia electroquímica aleación L2.

En la figura 27 se presenta el diagrama de Nyquist para la aleación L2 en las 3 condiciones: de llegada, templado y revenido. Análogamente a la aleación L1 en las 3 condiciones del acero se observan semicírculos, mostrando un proceso controlado por transferencia de carga. En este acero los valores más grandes de impedancia al igual que en el acero L1 fueron los de condición de llegada, esto se puede confirmar en el diagrama de frecuencia vs módulo de impedancia (figura 28). Al igual que el acero L1, en L2 se siguen presentando dos desfases de aproximadamente 90° en el diagrama BODE fase, el primero a altas frecuencias y el segundo a frecuencias intermedias, lo que sugiere que igual que el acero L1 existe un comportamiento capacitivo y además la presencia de una interfaz en el sistema electrodo – electrolito, mencionado anteriormente como una capa adsorbida de características inhibitoras.

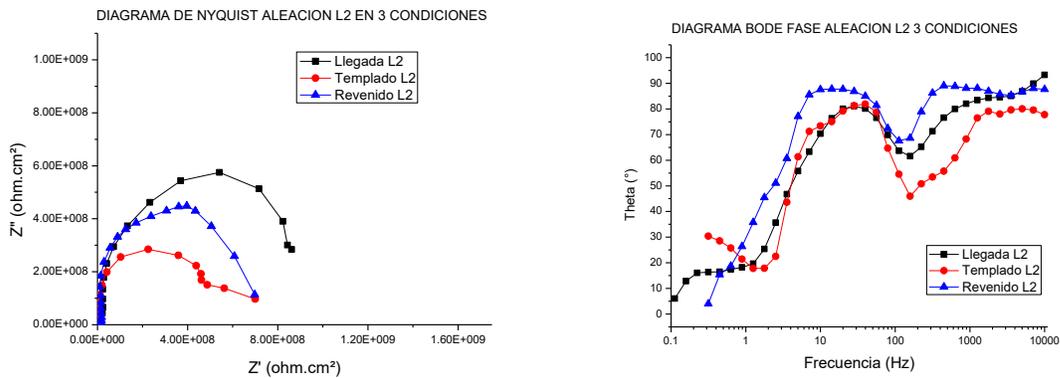


Figura 27 Diagrama de Nyquist y Bode fase de las pruebas instantáneas de EIS para el acero L2 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.

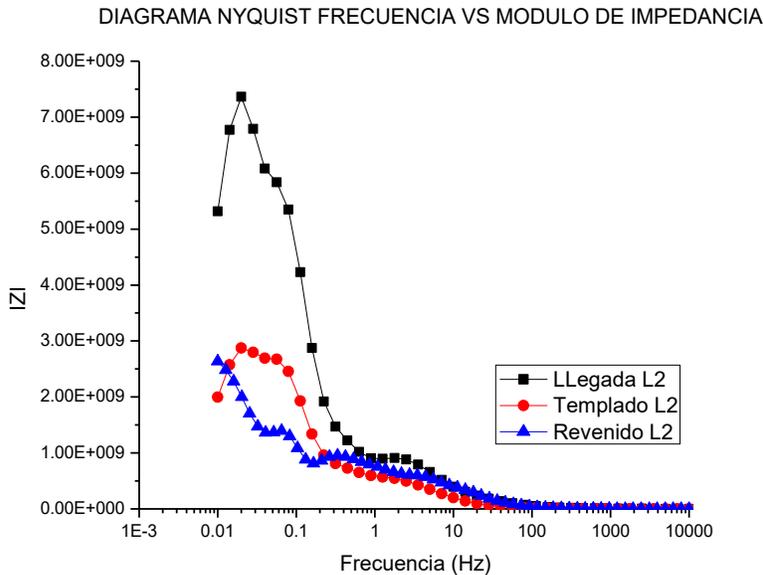


Figura 28 Gráfica de módulo de impedancia $|Z|$ de EIS para el acero L2 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.

En las siguientes figuras se muestran las gráficas de Nyquist resultado de las pruebas de espectroscopia impedancia electroquímica para la aleación L2 en sus diferentes condiciones, estas pruebas fueron en intervalos de 12h por 24h para observar el comportamiento del mecanismo de corrosión a través del tiempo. En las 3 condiciones se observan semicírculos capacitivos, en este caso al observar los diagramas de frecuencia vs impedancia (figuras 30, 32 y 34) se encontró que los valores máximos de módulos de impedancia los obtuvo el acero de llegada y los más bajos el acero revenido. Se siguen observando dos desfases en los diagramas BODE fase (figuras 29, 31 y 33) de aproximadamente 90° . Esto confirma que se tiene una interfaz en el electrodo – electrolito, esto le da el comportamiento capacitivo que indica un proceso de atracción y liberación de cargas, tal y como lo haría un capacitor. Al igual que las aleaciones L1 prevalece el mecanismo de transferencia de carga a pesar del tiempo y se observa la segunda constante, debido a la adsorción de una capa protectora.

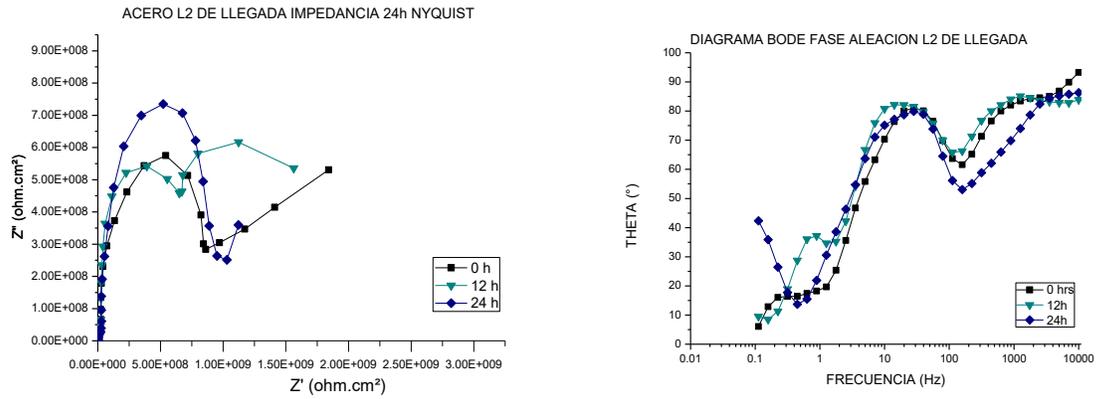


Figura 29 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L2 de llegada en inmersión por 24h en EIS.

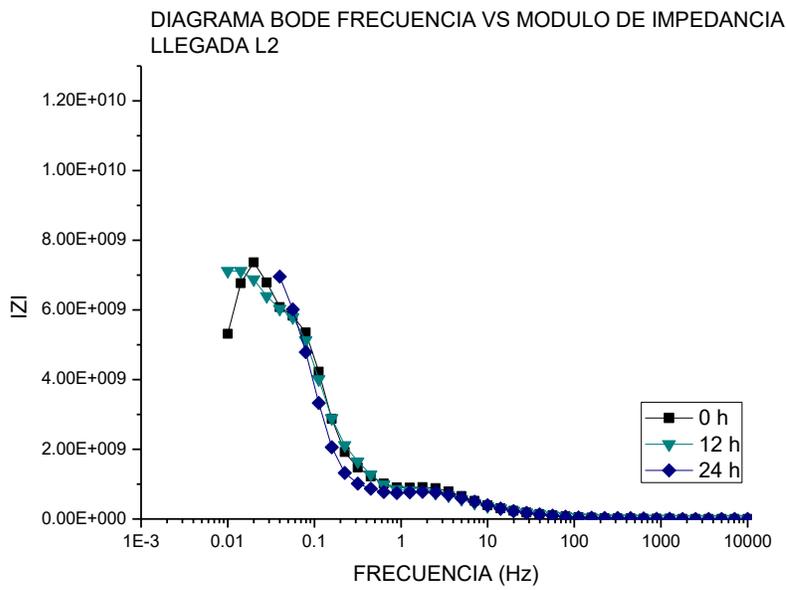


Figura 30 Diagrama módulo de impedancia $|Z|$ del acero L1 de llegada en inmersión 24h en EIS.

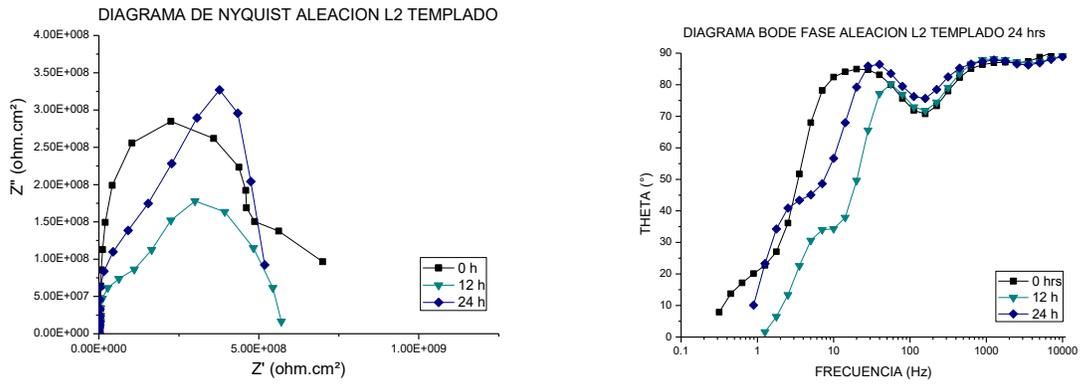


Figura 31 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L2 templado en inmersión por 24h en EIS.

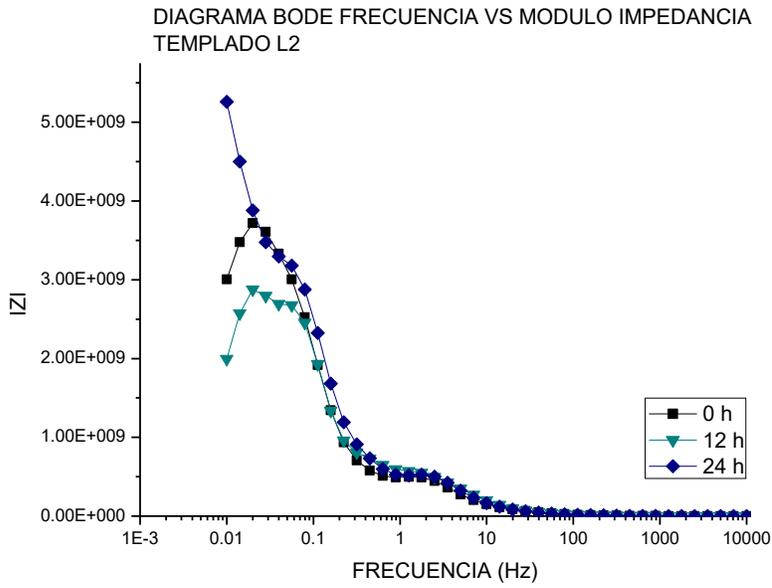


Figura 32 Diagrama módulo de impedancia |Z| del acero L2 templado en inmersión 24h en EIS.

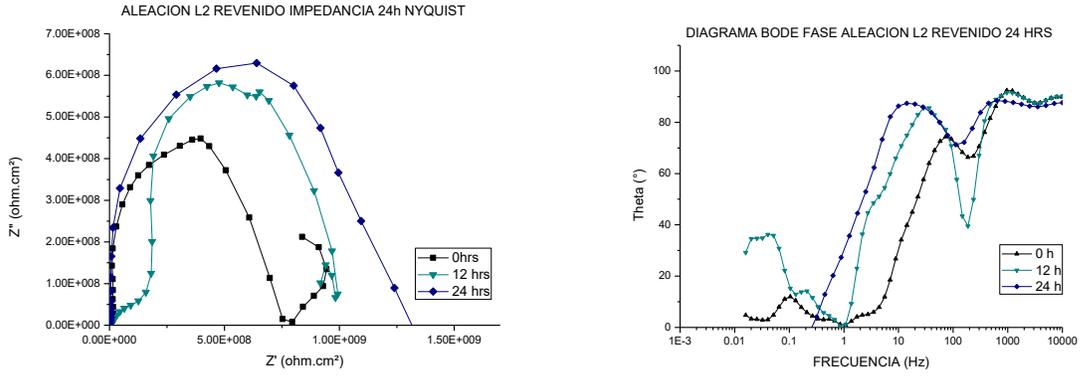


Figura 33 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L2 revenido en inmersión por 24h en EIS.

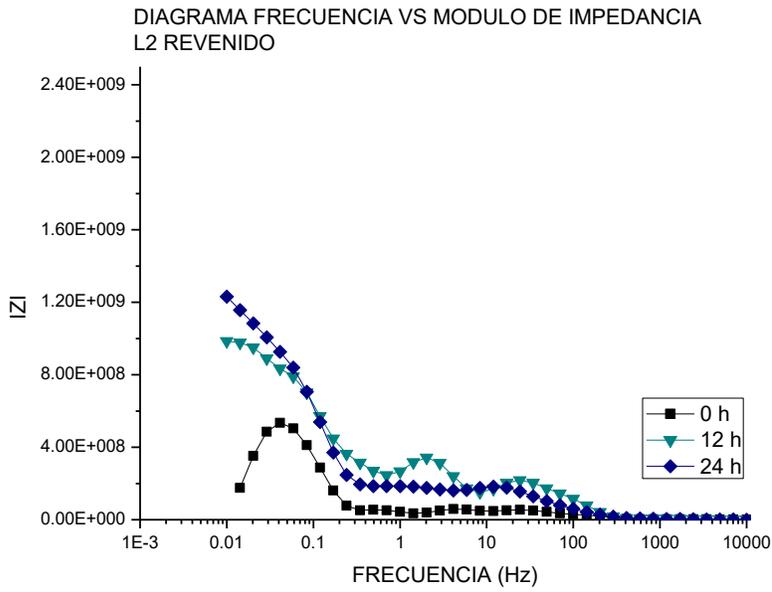


Figura 34 Diagrama módulo de impedancia $|Z|$ del acero L2 revenido en inmersión 24h en EIS.

X. CONCLUSIONES.

- I El mecanismo de degradación electroquímica de los dos aceros en las 3 condiciones fue por disolución anódica continua. Este mecanismo fue controlado por un proceso de transferencia de carga en las pruebas instantáneas y en el tiempo.
- II Las diferentes fases de los aceros provocan la formación de micro pares galvánicos, ya que las fases como la ferrita y la perlita son propensas a actuar como ánodos en presencia de fases saturadas de carbono como la martensita o carburos de hierro Fe_3C , dando como resultado más o menos impedancia en las pruebas EIS.
- III Debido a la propiedad del biodiesel de absorber H_2O y O_2 del ambiente es posible que se formen productos de corrosión no protectores como los $Fe(OH)_x$ y en menor medida Fe_xO_x , además de $FeCO_3$ debido a la oxidación de los ácidos grasos presentes en el biodiesel.
- IV El acero L2 revenido obtuvo los mejores resultados. Es decir, es la mejor condición para considerar en el diseño de elementos de almacenamiento para el biodiesel.

XI. REFERENCIAS.

Abu-Zahra, P. K. (2018). Kinetics of thermal decomposition of PVC/fly ash composites. *International journal of polymer analysis and characterization*, 23(2), 170-180.

Akhabue, C. E., Aisien, F. A., & Ojo, C. O. (2014). The effect of Jatropha oil biodiesel on the corrosion rates of aluminum and mild carbon steel. *Biofuels*, 5(5), 545-550.

Bajpai, D., & Tyagi, V. K. (2006). Biodiesel: source, production, composition, properties, and its benefits. *Journal of OLEo science*, 55(10), 487-502.

Becerra-Rodríguez, M., Aguilar-Díaz, V. J., Bernardino-González, J., & Santana-Ramírez, F. (2021). Tratamientos térmicos. *TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río*, 8(15), 40-44.

Chatterjee S., Ghosh S.K., *Int. J. Metall. Eng.* 2 (1) (2013) 92-99.

Chew, K. V., Haseeb, A. S. M. A., Masjuki, H. H., Fazal, M. A., & Gupta, M. (2013). Corrosion of magnesium and aluminum in palm biodiesel: A comparative evaluation. *Energy*, 57, 478-483.

Dharma, S., Silitonga, A. S., Shamsuddin, A. H., Sebayang, A. H., Milano, J., Sebayang, R., ... & Damanik, N. (2023). Properties and corrosion behaviors of mild steel in biodiesel-diesel blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(2), 3887-3899.

Estupiñan F., 2012, Corrosión por picadura de aceros inoxidable 316 y dúplex 2205 empleando ruido electroquímico en soluciones que contienen iones CL-, Tesis doctoral, Centro de investigación en Materiales Avanzados, S.C.

Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., & Masjuki, H. H. (2011). Effect of temperature on the corrosion behavior of mild steel upon exposure to palm biodiesel. *Energy*, 36(5), 3328-3334.

Fazal, M. A., Haseeb, A. S. M. A., & Masjuki, H. H. (2013). Corrosion mechanism of copper in palm biodiesel. *Corrosion Science*, 67, 50-59.

Fazal, M. A., Rubaiee, S., & Al-Zahrani, A. (2019). Overview of the interactions between automotive materials and biodiesel obtained from different feedstocks. *Fuel Processing Technology*, 196, 106178.

Flores M.I., 2013, Estudio electroquímico del fenómeno de corrosión de aceros API 5L utilizados en sistemas de ductos que transportan hidrocarburos, Universidad Veracruzana.

González Guzmán, J. A. (2009). Protección frente a la corrosión metálica con recubrimientos poliméricos.

González J.A., 1989, Control de la corrosión: Estudio y medida por técnicas electroquímicas.

Hoang, A. T., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2020). A review of the effect of biodiesel on the corrosion behavior of metals/alloys in diesel engines. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(23), 2923-2943.

Komariah, L. N., Arita, S., Prianda, B. E., & Dewi, T. K. (2021). Technical assessment of biodiesel storage tank; A corrosion case study. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.

Liu, Z., Olivares, R. O., Lei, Y., Garcia, C. I., & Wang, G. (2016). Microstructural characterization and recrystallization kinetics modeling of annealing cold-rolled vanadium micro alloyed HSLA steels. *Journal of Alloys and Compounds*, 679, 293-301.

Martin R., 2014, Simulación mediante circuitos equivalentes de la impedancia electroquímica de armaduras de aceros inoxidable en mortero, Universidad Carlos III de Madrid.

Palafox Martínez, M. G. (1996). *Modelación de la carburización y temple en aceros* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

Patino, H., & Rosero, B. (2016). Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento. *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 8(1), 52-58.

Pérez-Quiroz, J. T., Araujo Arreola, N. L., Torres Murillo, A. I., Rendón Belmonte, M., Terán Guillen, J., Martínez-Madrid, M., & Pérez Campos, R. (2013). Corrosión y degradación de materiales por biocombustibles. *OmniaScience Monographs*.

Porcayo-Calderon, J., Rivera-Muñoz, E. M., Peza-Ledesma, C., Casales-Diaz, M., De La Escalera, L. M., Canto, J., & Martínez-Gomez, L. (2017). Sustainable development of palm oil: synthesis and electrochemical performance of corrosion inhibitors. *Journal of Electrochemical Science and Technology*, 8(2), 133-145.

Ramírez, I. E. M., Vela, N. A. C., & Rincón, J. J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y ciencia*, 20(55), 62-70.

Revie, R. W. (2008). *Corrosion and corrosion control: an introduction to corrosion science and engineering*. John Wiley & Sons.

Roberge, P. R. (2019). *Handbook of corrosion engineering*. McGraw-Hill Education.

Rocabruno-Valdés, C. I., Hernández, J. A., Juantorena, A. U., Arenas, E. G., Lopez-Sesenes, R., Salinas-Bravo, V. M., & González-Rodríguez, J. G. (2018). An electrochemical study of

the corrosion behavior of metals in canola biodiesel. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 53(2), 153-162.

Rocabruno-Valdes, C. I., Hernandez, J. A., Munoz-Ledo, R., Salinas-Bravo, V. M., Lucio-Garcia, M. A., Lopez-Sesenes, R., ... & González-Rodríguez, J. G. (2020). Corrosion behavior of metallic materials in chicken fat-based biodiesel. *Int. J. Electrochem. Sci*, 15, 334-349.

Salazar-Jiménez, J. A. (2015). Introducción al fenómeno de corrosión: tipos, factores que influyen y control para la protección de materiales. *Revista Tecnología en Marcha*, 28(3), 127-136.

Sperle, J. O., & Olsson, K. (1996, June). High strength and ultra-high strength steels for weight reduction in structural and safety-related applications. In *29th International Symposium on Automotive Technology and Automation*. (Vol. 1, pp. 115-125).

Xie, Z. J., Fang, Y. P., Han, G., Guo, H., Misra, R. D. K., & Shang, C. J. (2014). Structure–property relationship in a 960 MPa grade ultrahigh strength low carbon niobium–vanadium micro alloyed steel: The significance of high frequency induction tempering. *Materials Science and Engineering: A*, 618, 112-117.

Zuñiga-Díaz, J., Reyes-Dorantes, E., Quinto-Hernandez, A., Porcayo-Calderon, J., Gonzalez-Rodríguez, J. G., & Martinez-Gomez, L. (2018). Biodiesel from “Morelos” rice: synthesis, oxidative stability, and corrosivity. *Journal of Chemistry*, 2018, 1-11.

XII. LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.

<i>Figura 1 Aceros L1 y L2 en sus diferentes condiciones en acabado espejo.</i>	28
<i>Figura 2 Microscopio óptico marca Olympus.</i>	28
<i>Figura 3 a) Proceso de transesterificación b) Embudo de decantación con glicerol y biodiesel c) Separación de fases d) Proceso de lavado y secado del biodiesel.</i>	29
<i>Figura 4 Preparación del encapsulado de las muestras para las pruebas electroquímicas en resina cristal.</i>	30
<i>Figura 5 Potenciostato para pruebas electroquímicas tipo Gill de ACM Instruments.</i>	31
<i>Figura 6 Celda electroquímica de 3 electrodos utilizada para las pruebas; electrodo de trabajo (aceros L1 y L2), auxiliar de grafito y Ag/AgCl de referencia.</i>	31
<i>Figura 7 Espectro Raman del Biodiesel.</i>	33
<i>Figura 8 Acero L1 de llegada visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, perlita (P), bainita (B), ferrita (α Fe).</i>	34
<i>Figura 9 Acero L1 con tratamiento térmico de temple visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, austenita (A) y martensita (M).</i>	35
<i>Figura 10 Acero L1 revenido visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes después del tratamiento de revenido, perlita (P), cementita (Fe_3C) y ferrita (α Fe).</i>	36
<i>Figura 11 Acero L2 de llegada visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, perlita (P), bainita (B), ferrita (α Fe).</i>	37

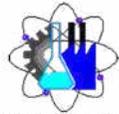
<i>Figura 12 Acero L2 con tratamiento térmico de temple visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes, austenita (A) y martensita (M).</i>	38
<i>Figura 13 Acero L2 revenido visto en un microscopio óptico objetivo 20x, en los recuadros se señalan las fases presentes después del tratamiento de revenido, perlita (P), cementita (Fe₃C) y ferrita (α Fe).</i>	39
<i>Figura 14 Curvas de polarización instantáneas para el acero L1 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.</i>	42
<i>Figura 15 comparación de valores de I_{cor} respecto a la condición del acero L1.</i>	42
<i>Figura 16 Reacciones químicas que describen el mecanismo de corrosión en aleaciones de hierro en contacto con biodiesel.</i>	43
<i>Figura 17 Diagrama de Nyquist y Bode fase de las pruebas instantáneas de EIS para el acero L1 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.</i>	45
<i>Figura 18 Gráfica de módulo de impedancia Z de EIS para el acero L1 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.</i>	45
<i>Figura 19 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L1 de llegada en inmersión por 24h en EIS.</i>	47
<i>Figura 20 Diagrama módulo de impedancia Z del acero L1 de llegada en inmersión 24h en EIS.</i>	47
<i>Figura 21 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L1 templado en inmersión 24h en EIS.</i>	48
<i>Figura 22 Diagrama BODE fase aleación L1 templado en inmersión 24h en EIS.</i>	48
<i>Figura 23 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L1 revenido en inmersión 24h en EIS.</i>	49

<i>Figura 24 Diagrama de módulo de impedancia del acero L1 revenido en inmersión 24h en EIS.</i>	49
<i>Figura 25 Curvas de polarización instantáneas para el acero L2 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.</i>	51
<i>Figura 26 Comparación del Icor respecto a la condición del acero L2</i>	51
<i>Figura 27 Diagrama de Nyquist y Bode fase de las pruebas instantáneas de EIS para el acero L2 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.</i>	52
<i>Figura 28 Gráfica de módulo de impedancia Z de EIS para el acero L2 en sus 3 condiciones, llegada, templado y revenido.</i>	53
<i>Figura 29 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L2 de llegada en inmersión por 24h en EIS.</i>	54
<i>Figura 30 Diagrama módulo de impedancia Z del acero L1 de llegada en inmersión 24h en EIS.</i>	54
<i>Figura 31 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L2 templado en inmersión por 24h en EIS.</i>	55
<i>Figura 32 Diagrama módulo de impedancia Z del acero L2 templado en inmersión 24h en EIS.</i>	55
<i>Figura 33 Diagrama Nyquist y Bode fase del acero L2 revenido en inmersión por 24h en EIS.</i>	56
<i>Figura 34 Diagrama módulo de impedancia Z del acero L2 revenido en inmersión 24h en EIS.</i>	56

<i>Tabla 1 Composición (% peso) química de los aceros L1 y L2.</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 2 Contenido de ácidos grasos (% peso) típicos en un biodiesel sintetizado a partir de aceite de soya.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 3 Bandas de la técnica de espectroscopia Raman para el biodiesel sintetizado a partir de aceite de soya.</i>	<i>32</i>
<i>Tabla 4 Valores de Icorr y Ecorr obtenidos de la prueba de polarización potenciodinámica del acero L1 en las 3 condiciones.</i>	<i>41</i>
<i>Tabla 5 Valores de Icor y Ecor obtenidos de la prueba de polarización potenciodinámica del acero L2 en las 3 condiciones.</i>	<i>50</i>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 5 de diciembre de 2023.

DR. JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
DR. HORACIO MARTINEZ VALENCIA
DR. ALVARO TORRES ISLAS
DR. ADRIAN DEL POZO MARES
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta **SAÚL ARTURO VALENZO MACÍAS**, titulada: EFECTO DEL BIODIESEL EN EL COMPORTAMIENTO A LA CORROSIÓN EN ACEROS DE ULTRA ALTA RESISTENCIA, realizada bajo la dirección del **DR. ALVARO TORRES ISLAS** del Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

MTRA. ANGÉLICA GALINDO FLORES
DIRECTORA INTERINA DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

D I C T A M E N

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DR. JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ	APROBADO	
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO	APROBADO	
DR. HORACIO MARTINEZ VALENCIA	APROBADO	
DR. ALVARO TORRES ISLAS	APROBADO	
DR. ADRIAN DEL POZO MARES	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2023-12-07 10:38:10 | Firmante

tBKLKn9CSuuznjeMBcZetesgijlja8DxXHYqqxUJYJiJaEKE6o/AEUek9d1N8qFzBy6+/GtLuVvy6L11HblmXAgEd+w5otc6op+O3Z4b94p8ZRLyGhvCZ5E5Mx5XjL572TN6RcDdZ0jTTkgUu/G0OSSH4tZnH3GmQv+4k3v23c12/AGQ9B28PYvNXAPL6JVlpQvEMMLtcLqm8kTHeZFAthc78anzEgNBsXjyos4xCL+LBWJ2/UfK2XBynGw888VomHEQt7IPC4IQco+gJNhSBRY3SgVA/xeyFLWeQ3O/3l94NJ/OuUo1g+CzZnzGtaNCHRSfBLEVvL177GdGYPnNA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



0EmtOSzjV

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/s9S7TtrDUpYHdUi8eho9TMZSV08aLR3y>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ALVARO TORRES ISLAS | Fecha:2023-12-07 15:18:23 | Firmante

eUaCKzXUAoyD0W/X4IbOw5eQeMPWkSmCLmiTJWcqr3KXNC0iAVwqpWDtgf7ij8uui12zOSU+BPtEOHk9NWx5pKiy1uTXiJXIPCKVfGPBRHKpa3RCEVtJt9jPhUNevKX4TKy bPp7AqzRiVhMVjn+yRMrXWzYxm/II2DhSTtHLM1D2zmWPYxv7aK4bqKtnOUcpTui+Eetlv48rpWARw9YObDxnMLx2umvPiMbkRBU+iSCeqobfZoSHP9cBM1UYHAbix4bedfDfR/T tS+K159yCr0On3KolXhqlmqVYitd0itfEAvjs7Ya2AdZTSa/ffRh/FmSssSadxO6Ec1cMPYA==

ADRIAN DEL POZO MARES | Fecha:2023-12-07 15:20:36 | Firmante

5QBYCn7D+XnGFF43jGxn5hDoAjbV9AD1MuXnNVQyGPz1kcZi9iCh+9/gFKZT1v4fTjV97Aar64+0agOuyUWj/Wi9/tNgiDQJHGSQkxZHNWHwuMxCz6WuOQDc2WK33i/16Oq TzIolBjAeHMnPxLcoEmShQJn388DcMJW0gCIPiUlyrQ1ksYKowdk492r7YMiGaEiiTZc/VlZ5gZBAdbwAG94QqEelMTiePwFb5d1rijXIFuDIxkVAzYJTiP58ozcWSr6rc/nYcbEbU6o gka1Eyo0lKpk4I3inPdzOK7V5FKQHtsfnith9BJNoJUuUHaxXNeJgVz2g9MABY707w==

JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ | Fecha:2023-12-07 15:31:31 | Firmante

gHx2eUEqvDjYZtd+ke7nHy+9gcYrlE86Ky1AQRnF3G3eWtlggwnsEl62yLLbqID+KxTYPDB5IEIvhhxlqqI7r1JDixY8QRBra2Ldl762dLurprCJ1NY6BHik3z7a9jW/FZtGfXf8181+z9 bh8BmKbNt5ZOeWU5r+euVLP8+e5F6ujcgJh1fXIAJgN4G5KpCrodVV9YySdUoqh2Uqv58ilBR74g3cMBYHQonPVyYyyw8NgyLQDnn4MBYBG4WfMHFLfWGjF8SSOjVDd+HB63 JWY5l/p45UzvTaj+AlkrtMKHGZN49QWOIs5LZ9Cxz8EgfhmgHxz9xQh6mwXb3/0RPyw==

HORACIO MARTINEZ VALENCIA | Fecha:2023-12-07 16:06:01 | Firmante

nTHOxOkuxc1VNqRyzNbx2r27INrySOXVRbLTzOhGfJQEIVVBzceWAqgFB46lesX9RK1ISVOf5kTJzgbMsn4NEsIFvtrEfvbWbqRPARBbB8fprgYnDrc5+YVH0RjdPHhNQU9TL1 5sRuajBuFegtC5AuAMo8dQz2e3MQqoRSLfNspHEZC+kHf4pa4TzUzgoJuch5gZ74DzNVhyz1pTi4xPRbHrw//4LAREKxQlGhNH/FravCleJ8ouJ0y1695VbqA2U/vT3JSDfscamm 0r/FKqb9NdrfXAWEbOucVrijckYWPuafdbiZ7qUzrudsxkSdlnoV6KZY27aeBNSpSPbw==

ARTURO MOLINA OCAMPO | Fecha:2023-12-07 16:16:35 | Firmante

q2HszK4V5a+fy8LZ6yIrpChjLmWNxskkpdqMw1M6m+rBsNhlZqpYXd8rLIQj7+t92DIrI8Q8b8p5E+BplfYkr0wldStDsvKDUbdtFtyL+vbQ/0spZODY9cICBrxLvwU5nW18ofrV mBlkGJX5ggakqNEH2AhAjlxDjfnNucK8JfAzqyOUNiwXGsodAf/JqJYli2K5ccOArjUniCkVrNADiRimszRyuDXMleF+b5akfeiHbQjLvV4TNvWDLRTIw1XsFMml6noSRcgZCs8VZJA bQpOil2wqkC3xvbs54dvoNEqZkizilBaFUapiRFgiTEMtW6/eomvCu+ZOBTAA==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



n8vSVIUla

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/xKDN3hISRWZc3tUsFTgXvGABvwODCrX>

