

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL ESTADO DE MORELOS FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICAS e INGENIERÍA**

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

**ESTUDIO
ELECTROQUÍMICO DEL EFECTO DEL BIODIESEL EN CONTACTO CON ACERO DE
TUBERÍA PARA SU TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO.**

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERIA AMBIENTAL Y TECNOLOGIAS SUSTENTABLES

Presenta:

Emmanuel Hurtado Ramírez

Dirección:

Dr. Álvaro Torres Islas

Co dirección:

Dr. Horacio Martínez Valencia

Cuernavaca, Morelos, a 17 de junio de 2026

Agradecimientos

Esta tesis es el resultado de un camino que, aunque personal, nunca recorrí en soledad. Mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que me acompañaron a lo largo de este trayecto, brindándome su apoyo, paciencia y confianza en los momentos de mayor desafío.

Quiero expresar un agradecimiento especial a mi familia por su amor, comprensión y apoyo incondicional a lo largo de este camino. Gracias por creer en mí, por alentarme en los momentos difíciles y por compartir conmigo la satisfacción de cada logro alcanzado.

Expreso también mi profundo agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo brindado mediante la beca de posgrado, la cual fue fundamental para el desarrollo de mis estudios y la realización de esta investigación.

Deseo expresar un agradecimiento especial a mi director de tesis, el Dr. Álvaro Torres Islas, por su guía, confianza y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos y orientación fueron fundamentales para la culminación de este trabajo.

De igual manera, agradezco profundamente a mi codirector, el Dr. Horacio Martínez Valencia, por compartir generosamente su experiencia, conocimientos y recomendaciones, enriqueciendo significativamente la calidad científica de esta tesis.

Extiendo también mi sincero reconocimiento a los integrantes de mi Comité Tutorial: el Dr. Jesús Mario Colín de la Cruz, el Dr. Arturo Molina Ocampo y el Dr. Adrián del Pozo Mares, por sus valiosas observaciones, sugerencias y contribuciones, las cuales fortalecieron esta investigación y enriquecieron mi formación académica.

Este trabajo no solo representa mi dedicación académica, sino también el respaldo invaluable de quienes hicieron posible este sueño. A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

“Si quieres brillar como el sol, primero debes arder como él”.

— A. P. J. Abdul Kalam

Resumen

El biodiésel representa una alternativa prometedora frente a los combustibles fósiles; no obstante, su naturaleza química plantea desafíos críticos debido a su tendencia corrosiva hacia las aleaciones metálicas. El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el efecto de los tratamientos térmicos de temple y revenido en la resistencia a la corrosión electroquímica de los aceros de tubería API X-52 y API X-70, en contacto con biodiésel derivado de aceite de soya.

Para el desarrollo experimental, se prepararon probetas de ambos aceros en tres condiciones: estado de recepción (control), templado y revenido. Estas muestras fueron sometidas a técnicas de caracterización electroquímica mediante Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) y Curvas de Polarización Potenciodinámica.

El análisis microestructural, realizado a través de microscopía, reveló que los tratamientos térmicos modificaron significativamente la morfología de las fases de los aceros, impactando de manera directa su comportamiento frente al fenómeno corrosivo. Los resultados permitieron establecer una correlación entre los cambios microestructurales y la cinética de corrosión, identificando el tratamiento óptimo para incrementar la durabilidad de los materiales.

Las conclusiones de este estudio aportan información técnica valiosa para la selección y el diseño de infraestructura destinada al transporte y almacenamiento seguro de biocombustibles.

CONTENIDO

1. Introducción

- 1.1. Antecedentes del biodiésel y su problemática de corrosión
- 1.2. Justificación
- 1.3. Hipótesis
- 1.4. Objetivos
 - 1.4.1. Objetivo General
 - 1.4.2. Objetivos Particulares
- 1.5. Alcance del proyecto
- 1.6. Resultados Esperados

2. Marco Teórico

- 2.1. Biocombustibles y Biodiésel
 - 2.1.1. Origen y composición
 - 2.1.2. Proceso de Transesterificación
 - 2.1.3. Ventajas medioambientales
- 2.2. Fundamentos de la corrosión electroquímica
 - 2.2.1. Mecanismos de corrosión
 - 2.2.2. Tipos de corrosión relevantes en el estudio
- 2.3. Aceros de tubería API X-52 y X-70
 - 2.3.1. Composición y propiedades
 - 2.3.2. Microestructura y fases
- 2.4. Tratamientos térmicos en aceros
 - 2.4.1. Temple y formación de martensita
 - 2.4.2. Revenido y tenacidad
- 2.5. Técnicas de caracterización y evaluación electroquímica
 - 2.5.1. Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)
 - 2.5.2. Polarización Potenciodinámica
 - 2.5.3. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

3. Metodología Experimental

- 3.1. Materiales y reactivos
- 3.2. Obtención y caracterización del biodiésel de soya
- 3.3. Preparación de las probetas de acero
 - 3.3.1. Tratamientos térmicos aplicados (Temple y Revenido)
 - 3.3.2. Preparación superficial y montaje metalográfico
- 3.4. Pruebas de corrosión electroquímica
 - 3.4.1. Configuración del potencióstato y celda
 - 3.4.2. Protocolo de EIS y Polarización
- 3.5. Caracterización morfológica post-corrosión

4. Resultados y Discusión

- 4.1. Caracterización microestructural de los aceros X-52 y X-70

- 4.1.1. Análisis de probetas en estado de control
- 4.1.2. Efecto del temple y revenido en la microestructura
- 4.2. Análisis de resultados electroquímicos
 - 4.2.1. Interpretación de diagramas de Nyquist y Bode
 - 4.2.2. Cinética de corrosión mediante curvas de polarización

5. Discusion de Resultados

- 5.1. Conclusiones y contribucion de la investigacion

Bibliografia.

Introducción

Estudios han reflejado que el biodiésel es más corrosivo en comparación con los combustibles de origen fósil en condiciones ambientales. Este comportamiento, observado en una variedad de materiales como cobre, bronce, latón y acero al carbono, se asocia principalmente a las propiedades inherentes del biocombustible, como su alta higroscopicidad, polaridad creciente y su tendencia a la autooxidación.

A medida que la industria energética mundial busca alternativas sostenibles, el biodiésel se posiciona como una opción prometedora. No obstante, el desafío de su transporte y almacenamiento seguro en infraestructuras existentes, como tuberías de acero, representa un obstáculo técnico y económico que debe ser abordado.

El principal objetivo de este trabajo de investigación es encontrar una oportunidad de aplicación para los aceros microaleados API X-52 y X-70. Estos materiales, ampliamente utilizados en la fabricación de tuberías de transporte, serán sometidos a diferentes tratamientos térmicos.

Se evaluará el efecto de estos tratamientos térmicos en la resistencia a la corrosión en un ambiente en contacto con biodiésel, buscando optimizar sus propiedades para el manejo seguro de este biocombustible. Los resultados de este estudio contribuirán a la comprensión de la interacción entre los aceros y el biodiésel, proporcionando una base para la selección y el desarrollo de materiales más resistentes en la infraestructura de distribución de energía renovable.

Antecedentes del biodiésel y su problemática de corrosión

El biodiésel es un biocombustible renovable obtenido principalmente a partir de aceites vegetales, grasas animales o aceites residuales mediante un proceso de transesterificación, en el cual los triglicéridos reaccionan con un alcohol de cadena corta (generalmente metanol) en presencia de un catalizador. El producto resultante está constituido por ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, Fatty Acid Methyl Ester), los cuales presentan propiedades fisicoquímicas similares al diésel fósil, permitiendo su uso en motores de combustión interna y sistemas de transporte y almacenamiento existentes.

En las últimas décadas, el biodiésel ha ganado relevancia a nivel mundial debido a la necesidad de reducir la dependencia de combustibles fósiles, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover fuentes de energía sostenibles. Sin embargo, a pesar de sus ventajas ambientales, el biodiésel presenta desafíos técnicos asociados a su compatibilidad con materiales metálicos, particularmente con los aceros al carbono comúnmente empleados en tuberías, tanques y sistemas de distribución.

Una de las principales problemáticas del biodiésel es su mayor tendencia a inducir procesos de corrosión en comparación con el diésel convencional. Esta susceptibilidad se atribuye a diversas características inherentes al biocombustible, como su mayor higroscopicidad, que favorece la absorción de humedad durante el transporte y almacenamiento. La presencia de agua promueve reacciones electroquímicas en la superficie metálica, facilitando la formación de celdas de corrosión y acelerando el deterioro del material.

Adicionalmente, el biodiésel puede contener impurezas residuales del proceso de producción, tales como alcoholes, catalizadores, jabones y ácidos grasos libres. Estos compuestos pueden incrementar la acidez del medio y alterar la estabilidad química del combustible, contribuyendo a la corrosión localizada y uniforme de los aceros. La oxidación del biodiésel durante su almacenamiento genera productos secundarios, como peróxidos y ácidos orgánicos, los cuales intensifican la agresividad del medio y afectan negativamente la integridad de los sistemas metálicos.

Diversos estudios han demostrado que el contacto prolongado del biodiésel con aceros al carbono puede provocar pérdida de masa, formación de productos de corrosión y modificaciones en las propiedades superficiales del material. La magnitud del daño depende no solo de la composición del biodiésel, sino también de las características metalúrgicas del acero, como su microestructura, composición química y tratamientos térmicos aplicados. Estos factores influyen directamente en la resistencia a la corrosión y en el comportamiento electroquímico del material.

En este contexto, resulta fundamental evaluar el desempeño electroquímico de los aceros utilizados en tuberías bajo diferentes tratamientos térmicos cuando están expuestos al biodiésel. Dicho análisis permite comprender los mecanismos de corrosión involucrados y establecer criterios para la selección y optimización de materiales, con el fin de garantizar la seguridad, durabilidad y eficiencia de los sistemas de transporte y almacenamiento de biodiésel.

Justificación

En la actualidad, la creciente preocupación por el deterioro del medio ambiente ha impulsado el desarrollo y uso de biocombustibles como el biodiésel, el cual representa una alternativa renovable y menos contaminante frente a los combustibles fósiles. Sin embargo, se ha reportado que el biodiésel posee características fisicoquímicas que pueden favorecer procesos de corrosión en los materiales metálicos empleados para su almacenamiento y transporte.

Esta problemática impacta directamente la integridad estructural de tuberías y sistemas de conducción, ocasionando una disminución en la vida útil de los materiales, incrementos en los costos de mantenimiento y posibles riesgos operativos. Ante este panorama, resulta indispensable evaluar el comportamiento electroquímico del acero de tubería sometido a diferentes tratamientos térmicos en contacto con biodiésel, con el objetivo de identificar las condiciones metalúrgicas que proporcionen una mayor resistencia a la corrosión.

El estudio del efecto de los tratamientos térmicos sobre el desempeño electroquímico del acero permitirá generar información científica relevante para la selección y optimización de materiales utilizados en sistemas de transporte y almacenamiento de biodiésel, contribuyendo así a la seguridad, eficiencia y viabilidad técnica de este biocombustible.

Hipótesis

El biodiésel, al estar en contacto con los aceros API X-52 y API X-70, provoca su degradación mediante procesos de disolución electroquímica, cuya magnitud depende de los microconstituyentes del acero, los cuales son modificados por los diferentes tratamientos térmicos aplicados.

Objetivos

Objetivo general

Determinar los mecanismos de degradación por corrosión del biodiésel en contacto con los aceros API X-52 y X-70 sometidos a diferentes tratamientos térmicos, empleando técnicas electroquímicas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica.

Objetivos particulares:

Caracterizar la microestructura de los aceros API X-52 y X-70 antes y después de los tratamientos térmicos de temple y revenido utilizando microscopía óptica y electrónica.

Analizar el comportamiento electroquímico de los aceros tratados en el medio de biodiesel mediante la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) y polarización potenciodinámica.

Correlacionar los cambios microestructurales inducidos por los tratamientos térmicos con la resistencia a la corrosión, identificando el tratamiento óptimo para cada tipo de acero.

Alcance del proyecto

La presente investigación se limita al estudio experimental del comportamiento electroquímico frente a la corrosión del biodiésel en contacto con aceros API X-52 y X-70 sometidos a diferentes tratamientos térmicos de temple y revenido. El análisis se desarrolla bajo condiciones controladas de laboratorio, empleando técnicas electroquímicas de polarización potenciodinámica y espectroscopia de impedancia electroquímica, así como la caracterización microestructural mediante microscopía óptica y electrónica.

Los resultados obtenidos permiten generar información técnica para la selección y optimización de las condiciones metalúrgicas de aceros utilizados en sistemas de transporte y almacenamiento de biodiésel. No se consideran dentro del alcance de este trabajo evaluaciones de impacto ambiental directo, análisis de emisiones, estudios de campo, ni la aplicación de inhibidores de corrosión.

Resultados Esperados

Se espera que la investigación experimental permita una comprensión profunda del efecto de los tratamientos térmicos en la resistencia a la corrosión de los aceros API X-52 y X-70 en un ambiente de biodiésel.

Los resultados esperados incluyen:

- **Caracterización Microestructural:** Se espera observar cómo los tratamientos de temple y revenido modifican la microestructura de ambos aceros, lo que se reflejará en la formación de nuevas fases y cambios en el tamaño de grano.
- **Comportamiento Electroquímico:** A través de las pruebas de EIS y polarización, se espera cuantificar la velocidad de corrosión de cada probeta (control, templada y revenida). Se prevé

que el tratamiento térmico óptimo genere una mayor impedancia y una menor velocidad de corrosión en comparación con la probeta de control.

- **Correlación de Resultados:** Se espera establecer una correlación directa entre los cambios en la microestructura observados por microscopía y la resistencia a la corrosión medida por técnicas electroquímicas, lo que permitirá determinar el tratamiento térmico más efectivo para proteger los aceros en el medio de biodiésel.
- **Selección del Material:** Finalmente, los resultados conducirán a la selección del acero X-52 o X-70 y del tratamiento térmico que ofrezcan la mejor combinación de propiedades para el transporte y almacenamiento seguro de biodiésel.

Marco teórico.

Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por organismos vivos, conocidas como “biomasa”. Esta biomasa puede provenir de fuentes vegetales, animales o residuos orgánicos, lo que los convierte en una alternativa renovable frente a los combustibles fósiles. Los biocombustibles pueden presentarse en estado líquido, sólido o gaseoso, y su finalidad es liberar la energía contenida en sus enlaces químicos mediante procesos de combustión o conversión energética.

Desde el punto de vista técnico, los biocombustibles se clasifican de acuerdo con la materia prima empleada y la tecnología utilizada en su producción. Entre los principales tipos se encuentran el bioetanol, el biogás y el biodiésel, siendo este último uno de los más relevantes en aplicaciones industriales y de transporte debido a su compatibilidad con motores diésel convencionales.

Biodiesel

El biodiésel es un combustible de origen renovable, denominado químicamente como una mezcla de ésteres alquílicos de ácidos grasos, obtenido a partir de fuentes vegetales o animales.

Se obtiene a partir de un proceso llamado transesterificación, que consiste en combinar aceites con un alcohol (etanol o metanol), en presencia de un catalizador, provocando una transformación química de los triglicéridos para formar ésteres grasos, como los metil ésteres o etil ésteres.

Los productos formados en este proceso son:

- Glicerina
- Ésteres grasos (biodiésel)

La glicerina, en este caso, es un subproducto que puede ser aprovechado por la industria cosmética, química, entre otras.

Debido a sus características similares al diésel de origen fósil, el biodiésel es utilizado como combustible complementario en motores de combustión interna. En la práctica, puede emplearse en

distintas proporciones de mezcla, tales como B5, B20 o B50, dependiendo de las condiciones de operación y especificaciones del motor.

Si bien se ha considerado que puede utilizarse en motores diésel sin modificaciones, esto depende de factores como el diseño del motor, los materiales de sus componentes y la concentración de biodiésel utilizada. Asimismo, ambos combustibles pueden mezclarse en diferentes proporciones sin generar problemas significativos de compatibilidad.

Hoy en día, los motores requieren combustibles que, al ser sometidos a distintas condiciones de operación, permanezcan estables y presenten una combustión limpia. En este sentido, el biodiésel representa una alternativa viable, especialmente en aplicaciones como transporte público, áreas marinas, parques nacionales, bosques y grandes ciudades.

Ventajas medio ambientales

El biodiésel es considerado un combustible de origen vegetal, biodegradable y renovable, lo que lo posiciona como una alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles. No genera residuos tóxicos ni peligrosos y presenta un impacto ambiental reducido.

Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) pueden disminuir entre un 20% y un 80% en comparación con los combustibles derivados del petróleo, considerando tanto su producción como su uso. Asimismo, se reducen las emisiones de dióxido de azufre (SO_2) en casi un 100%, lo que contribuye a la disminución de fenómenos como la lluvia ácida.

El biodiésel no contiene compuestos aromáticos ni bencenos, los cuales son característicos de los hidrocarburos fósiles y presentan efectos nocivos para la salud. La reducción de estas sustancias contaminantes contribuye a disminuir el riesgo de enfermedades respiratorias y alergias.

Corrosión

La corrosión se define como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia natural de los materiales a buscar su forma de mayor estabilidad o de menor energía interna.

Siempre que la corrosión esté originada por una reacción electroquímica (oxidación), la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de factores como la temperatura, la salinidad del fluido en contacto con el metal, el pH del medio y las propiedades del material.

Existen diversos mecanismos de corrosión, entre los cuales destacan la corrosión uniforme, la corrosión galvánica, la corrosión por picadura (pitting) y la corrosión intergranular. Cada uno de estos mecanismos puede afectar de manera distinta la integridad estructural de los materiales.

Acero de tubería

Los aceros utilizados en tuberías para transporte y almacenamiento de fluidos, como el biodiésel, son generalmente aceros al carbono debido a su adecuada combinación de resistencia mecánica, ductilidad y costo.

Estos materiales están compuestos principalmente por hierro y carbono, además de pequeñas cantidades de elementos como manganeso, silicio y azufre. Su microestructura está formada principalmente por ferrita y perlita, cuya proporción depende tanto de la composición química como del historial térmico del material.

La ferrita es una fase relativamente blanda y dúctil, mientras que la perlita aporta mayor resistencia mecánica. Estas características microestructurales influyen directamente en el comportamiento del material frente a procesos de corrosión, ya que pueden generar diferencias en la actividad electroquímica local.

Tratamientos térmicos

Los tratamientos térmicos son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados a los aceros con el objetivo de modificar su microestructura y, en consecuencia, sus propiedades mecánicas y químicas.

Entre los tratamientos más comunes se encuentran:

- Recocido: reduce la dureza, mejora la ductilidad y elimina tensiones internas.
- Normalizado: produce una microestructura más uniforme y refina el tamaño de grano.
- Temple: incrementa la dureza y resistencia mediante la formación de martensita.
- Revenido: disminuye la fragilidad generada por el temple y mejora la tenacidad.

Estos tratamientos afectan parámetros como el tamaño de grano, la distribución de fases y la densidad de defectos cristalinos, lo que influye directamente en el comportamiento frente a la corrosión. Microestructuras más homogéneas tienden a presentar un comportamiento electroquímico más estable.

Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es un proceso que involucra reacciones de oxidación y reducción en la superficie de un material metálico en presencia de un electrolito.

En este fenómeno, el metal actúa como ánodo, perdiendo electrones (oxidación), mientras que una especie química del medio actúa como cátodo, aceptando dichos electrones (reducción).

El comportamiento electroquímico puede evaluarse mediante parámetros como:

- Potencial de corrosión (E_{corr}): indica la tendencia del material a corroerse.
- Densidad de corriente de corrosión (I_{corr}): relacionada con la velocidad de corrosión.
- Resistencia a la polarización: asociada a la resistencia del material al proceso corrosivo.

Entre las técnicas más utilizadas se encuentran:

- Polarización potenciodinámica: permite obtener parámetros cinéticos de corrosión.
- Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS): proporciona información sobre mecanismos de corrosión y propiedades de la interfaz metal-electrolito.

Relación entre el biodiésel y la corrosión

La interacción entre el biodiésel y los materiales metálicos es un aspecto crítico en su uso como combustible. Aunque presenta ventajas ambientales, el biodiésel posee características que pueden favorecer procesos de corrosión.

Una de sus propiedades es su carácter higroscópico, lo que implica que puede absorber agua del ambiente. La presencia de agua favorece la formación de un medio electrolítico que acelera reacciones electroquímicas.

Además, el biodiésel puede oxidarse durante su almacenamiento, generando compuestos ácidos que incrementan la acidez del medio y promueven el ataque a superficies metálicas. La presencia de impurezas como glicerina, alcoholes residuales o catalizadores también puede contribuir al deterioro del material.

Relación entre tratamientos térmicos y comportamiento electroquímico en biodiésel

El comportamiento a la corrosión de los aceros de tubería no solo depende del medio al que están expuestos, como el biodiésel, sino también de su microestructura, la cual está directamente influenciada por los tratamientos térmicos aplicados.

Diferentes tratamientos térmicos generan variaciones en la distribución de fases, tamaño de grano y defectos cristalinos, lo que modifica la respuesta electroquímica del material.

En presencia de biodiésel, que puede contener agua, compuestos ácidos e impurezas, estas diferencias microestructurales pueden traducirse en cambios significativos en la resistencia a la corrosión.

Por lo tanto, el estudio electroquímico de aceros sometidos a distintos tratamientos térmicos resulta fundamental para evaluar su desempeño en condiciones reales de transporte y almacenamiento de biodiésel.

En conjunto, los biocombustibles, particularmente el biodiésel, representan una alternativa energética viable y sostenible. Sin embargo, su interacción con materiales metálicos, como los aceros de tubería, implica desafíos asociados a procesos de corrosión.

La influencia de los tratamientos térmicos en la microestructura del acero y su efecto en el comportamiento electroquímico frente al biodiésel constituye un aspecto clave para garantizar la integridad, seguridad y eficiencia de los sistemas de transporte y almacenamiento.

Biodiésel como biocombustible

El biodiésel es un biocombustible líquido de origen renovable, obtenido a partir de biomasa lipídica, como aceites vegetales o grasas animales. Se clasifica dentro de los biocombustibles de primera generación, ya que se produce a partir de materias primas agrícolas tradicionales.

Químicamente, el biodiésel está constituido por ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, y su principal aplicación es como sustituto parcial o total del diésel fósil en motores de combustión interna de encendido por compresión.

A diferencia de los combustibles derivados del petróleo, el biodiésel forma parte del ciclo biogénico del carbono, lo que significa que el dióxido de carbono liberado durante su combustión fue previamente capturado por las plantas durante su crecimiento mediante el proceso de fotosíntesis.

Esta característica contribuye a la reducción neta de emisiones de gases de efecto invernadero.

Debido a sus propiedades físico-químicas similares al diésel convencional, puede emplearse en mezclas como B5, B20 o B100, sin requerir modificaciones significativas en los motores cuando se utiliza en bajas concentraciones.

Origen y composición del biodiésel

El biodiésel se origina a partir de fuentes renovables ricas en triglicéridos, principalmente:

- Aceites vegetales (soya, palma, girasol, canola)
- Aceites usados de cocina
- Grasas animales
- Aceites no comestibles

Desde el punto de vista químico, las materias primas están compuestas por triglicéridos, que son ésteres formados por la unión de una molécula de glicerol con tres ácidos grasos.

La composición final del biodiésel depende directamente del perfil de ácidos grasos del aceite de origen.

Los principales componentes del biodiésel son:

- Ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos
- Trazas de glicerina
- Pequeñas cantidades de agua
- Ácidos grasos libres (si el proceso no es completamente eficiente)

Las características como viscosidad, estabilidad oxidativa, índice de cetano y punto de inflamación están influenciadas por la longitud de cadena y el grado de saturación de los ácidos grasos presentes. Una mayor proporción de ácidos grasos insaturados mejora el comportamiento a bajas temperaturas, pero puede disminuir la estabilidad oxidativa, favoreciendo la formación de compuestos que potencialmente incrementan fenómenos de corrosión en sistemas metálicos.

Proceso de transesterificación

La transesterificación es el proceso químico mediante el cual los triglicéridos reaccionan con un alcohol de cadena corta (metanol o etanol) en presencia de un catalizador, generalmente hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH).

Durante la reacción:

- Triglicérido + Alcohol $\rightarrow$ Ésteres (biodiésel) + Glicerina

Este proceso ocurre en tres etapas consecutivas:

- Conversión del triglicérido en diglicérido
- Conversión del diglicérido en monoglicérido
- Formación final de glicerina

El producto principal es el éster metílico o etílico de ácidos grasos (FAME o FAEE), mientras que la glicerina se obtiene como subproducto.

La eficiencia del proceso depende de variables como:

- Temperatura de reacción
- Relación molar alcohol/aceite
- Tipo y concentración del catalizador
- Tiempo de reacción
- Contenido de agua y ácidos grasos libres

Un control inadecuado de estas variables puede generar residuos de glicerina, jabones o ácidos grasos libres, los cuales pueden influir negativamente en la estabilidad del biodiésel y en su comportamiento frente a materiales metálicos.

Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es un proceso de degradación metálica que ocurre cuando en una misma superficie se establecen diferencias de potencial eléctrico, generando zonas anódicas y catódicas. En estas regiones se desarrollan simultáneamente reacciones de oxidación y reducción, produciendo un flujo de electrones a través del metal y transporte iónico en el electrolito circundante.

El área anódica corresponde a la zona donde ocurre la oxidación del metal (pérdida de electrones), mientras que el área catódica es donde tiene lugar la reacción de reducción. La interacción entre ambas regiones origina una celda electroquímica local, responsable del deterioro progresivo del material.

Este fenómeno es particularmente relevante en sistemas de almacenamiento y conducción de biocombustibles, donde pueden coexistir humedad, oxígeno disuelto, compuestos orgánicos oxidados y microorganismos.

Mecanismos de corrosión

Los mecanismos de corrosión describen el proceso electroquímico que controla la velocidad y naturaleza del ataque metálico. En sistemas asociados a biocombustibles, los principales mecanismos son:

- **Corrosión controlada por activación**

Ocurre cuando la velocidad del proceso está gobernada por la cinética de las reacciones electroquímicas en la superficie del metal. Es común en medios ácidos y depende principalmente de la energía de activación de las reacciones de oxidación y reducción.

- **Corrosión por concentración o aireación diferencial**

Se produce cuando existen diferencias en la concentración de oxígeno o de especies químicas entre distintas zonas de la superficie metálica. La región con menor concentración de oxígeno actúa como ánodo, mientras que la más aireada funciona como cátodo, generándose una celda electroquímica localizada.

Este mecanismo es frecuente en superficies irregulares, zonas parcialmente sumergidas, hendiduras o áreas con depósitos.

- **Corrosión galvánica**

Tiene lugar cuando dos metales con diferente potencial electroquímico están en contacto eléctrico dentro de un mismo electrolito. El metal con potencial más negativo actúa como ánodo y se corroe preferentemente, mientras que el más noble se comporta como cátodo.

Este tipo de corrosión es común en sistemas donde existen uniones de materiales distintos en presencia de humedad o medios conductores.

- **Corrosión asociada a productos de oxidación del combustible**

En medios orgánicos como el biodiésel, la oxidación del combustible puede generar compuestos ácidos y especies reactivas que incrementan la conductividad del medio y favorecen el ataque electroquímico del metal.

Estos mecanismos pueden actuar de manera individual o combinada, dependiendo de las condiciones ambientales y del sistema.

Tipos de corrosión relevantes en el estudio

En sistemas donde se emplean biocombustibles, los tipos de corrosión más relevantes son los siguientes:

- **Corrosión uniforme**
Consiste en un ataque homogéneo sobre toda la superficie del material. Aunque es predecible y relativamente fácil de cuantificar mediante pérdida de masa o reducción de espesor, puede comprometer la integridad estructural a largo plazo.
- **Corrosión por picadura (pitting)**
Es una forma de ataque localizado que genera cavidades profundas en puntos específicos de la superficie metálica. Es especialmente peligrosa debido a su difícil detección y rápida propagación, pudiendo provocar fallas estructurales súbitas.
- **Corrosión por hendiduras (crevice corrosion)**
Ocurre en zonas confinadas como juntas, uniones atornilladas o espacios estrechos donde se generan diferencias de concentración de oxígeno. Estas condiciones favorecen la formación de celdas de aireación diferencial y el desarrollo de ataque localizado.
- **Corrosión galvánica**
Se presenta cuando existen contactos eléctricos entre diferentes metales dentro del sistema de almacenamiento o conducción del combustible, generando una pila galvánica que acelera la degradación del metal menos noble.
- **Corrosión inducida por microorganismos (MIC)**
Puede desarrollarse en tanques de almacenamiento donde exista presencia de agua. Determinados microorganismos utilizan compuestos del medio en sus procesos metabólicos, generando productos como ácidos orgánicos o sulfuros que modifican el potencial electroquímico del sistema y favorecen el ataque localizado, frecuentemente asociado a picaduras.

Aceros de tubería API X52 y X70

Los aceros de tubería API X52 y X70 son materiales estructurales de alta resistencia utilizados principalmente en la fabricación de ductos para el transporte de hidrocarburos, gas natural y combustibles líquidos. Estos materiales están regulados por la especificación API 5L, emitida por el American Petroleum Institute.

Ambos grados pertenecen a la categoría de aceros HSLA (High Strength Low Alloy), diseñados para proporcionar una combinación óptima de resistencia mecánica, tenacidad y soldabilidad, manteniendo bajo contenido de carbono para mejorar su comportamiento durante procesos de fabricación e instalación.

La designación “X” indica que el acero cumple con un límite mínimo de fluencia específico, expresado en miles de libras por pulgada cuadrada (ksi).

En este sentido:

- **El API 5L X52 presenta un límite mínimo de fluencia de 52 ksi ($\approx$ 359 MPa).**
- **El API 5L X70 presenta un límite mínimo de fluencia de 70 ksi ($\approx$ 483 MPa).**

La diferencia en resistencia mecánica entre ambos grados se logra mediante control químico y térmico del material, lo cual también puede influir en su comportamiento frente a fenómenos corrosivos.

Composición y propiedades

Los aceros API X52 y X70 son aceros al carbono microaleados. Su composición química típica incluye:

- Carbono (C)
- Manganeso (Mn)
- Silicio (Si)
- Niobio (Nb)
- Vanadio (V)
- Titanio (Ti)

El contenido de carbono generalmente se mantiene bajo (menor a 0.25%) para favorecer la soldabilidad y reducir la susceptibilidad a fragilización. Los elementos microaleantes como Nb, V y Ti contribuyen al refinamiento de grano y al incremento de la resistencia mecánica mediante mecanismos de endurecimiento por precipitación.

En términos de propiedades mecánicas:

Propiedad	API X52	API X70
Límite de fluencia mínimo	359 MPa	483 MPa
Resistencia a la tensión	~455–760 MPa	~570–760 MPa
Ductilidad	Alta	Moderada–Alta
Soldabilidad	Buena	Buena (requiere mayor control)

Desde el punto de vista electroquímico, ambos materiales son susceptibles a corrosión debido a su naturaleza ferrítica y bajo contenido de elementos que generen pasivación, a diferencia de los aceros inoxidable.

Microestructuras y fases

La microestructura de los aceros API depende del grado y del proceso termomecánico controlado (TMCP) empleado durante su fabricación.

En el caso del API X52, la microestructura típica está compuesta por:

- Ferrita poligonal
- Perlita dispersa

Esta combinación proporciona buena ductilidad y comportamiento estable frente a esfuerzos mecánicos.

Por otro lado, el API X70 puede presentar una microestructura más refinada y compleja, compuesta por:

- Ferrita acicular
- Bainita
- Pequeñas fracciones de perlita

El refinamiento del tamaño de grano y la presencia de fases bainíticas contribuyen a su mayor resistencia mecánica.

Desde la perspectiva de la corrosión, la heterogeneidad microestructural puede generar diferencias locales en potencial electroquímico, favoreciendo la formación de microceldas galvánicas entre fases.

Estas diferencias pueden influir en:

- Iniciación de corrosión localizada
- Propagación de picaduras
- Distribución del ataque corrosivo

Por lo tanto, el análisis microestructural resulta fundamental para interpretar el comportamiento electroquímico de ambos grados en presencia de medios como el biodiésel.

Fundamentos teóricos de tratamientos térmicos en acero

Los tratamientos térmicos son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados a los aceros con el objetivo de modificar su microestructura y, en consecuencia, sus propiedades mecánicas, físicas y su comportamiento frente a fenómenos de degradación, sin alterar significativamente su composición química. Esta operación implica cambios de temperatura sobre el material, controlando los grados de intensidad, velocidad y los medios en los que se realiza.

Desde el punto de vista metalúrgico, estos procesos permiten controlar las transformaciones de fase del material, las cuales están gobernadas por el diagrama de equilibrio hierro-carbono (Fe-C) y por diagramas de transformación como TTT (Tiempo-Temperatura-Transformación) y CCT (Enfriamiento Continuo). A través de la variación de parámetros como la temperatura, el tiempo de permanencia y la velocidad de enfriamiento, es posible modificar la distribución de fases, el tamaño de grano y la densidad de defectos cristalinos.

Propiedades mecánicas y estructura cristalina

Las características mecánicas de un material dependen tanto de su composición química como de la estructura cristalina resultante de los ciclos térmicos. En aceros de tubería, como los especificados en la norma API 5L, estos cambios microestructurales influyen directamente en propiedades como la resistencia mecánica, la tenacidad y la estabilidad del material en condiciones de servicio. Asimismo, dichas modificaciones pueden afectar la respuesta del acero frente a medios agresivos, como el biodiésel, al alterar la homogeneidad microestructural y la reactividad superficial del material.

Entre estas características fundamentales se incluyen:

- Resistencia al desgaste: Resistencia que ofrece un material a dejarse erosionar bajo fricción.
- Tenacidad: Capacidad de absorber energía sin producir fisuras, evaluada como resistencia al impacto.
- Maquinabilidad: Facilidad que posee el material para procesos de mecanizado.
- Dureza: Resistencia a la penetración, medida comúnmente en escalas Brinell (HB), Rockwell C (HRC) y Vickers (HV).

Clasificación y ciclos de tratamiento

La clasificación de los tratamientos térmicos está ligada al objetivo específico deseado tras el proceso. Entre los más relevantes para este estudio se encuentran el temple y el revenido, los cuales permiten generar microestructuras con propiedades específicas.

El Temple

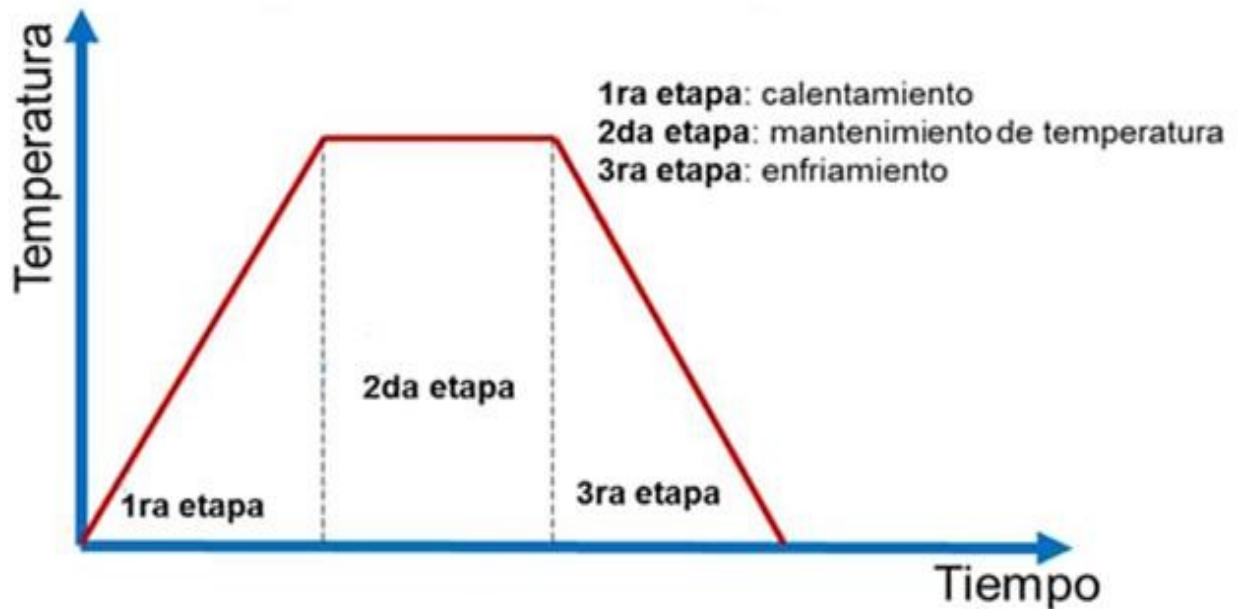


El temple busca aumentar la dureza y resistencia elevando la presencia de constituyentes martensíticos. Consiste en calentar el acero hasta la zona de austenización (superior a la temperatura crítica) y enfriarlo rápidamente. Durante este enfriamiento brusco, la difusión del carbono se inhibe y se forma martensita, una fase sobresaturada de carbono con estructura tetragonal distorsionada.

Este proceso se realiza generalmente en tres etapas:

- Calentamiento: Elevación de la temperatura según el tipo de acero.
- Uniformización: Mantenimiento de la temperatura constante para asegurar homogeneidad en todo el cuerpo del metal.
- Enfriamiento rápido: En medios seleccionados como agua, aceite o aire.

El Revenido



El revenido se aplica posteriormente al temple para reducir las tensiones internas y la fragilidad adquirida, sin disminuir drásticamente la dureza y resistencia obtenidas. Durante este recalentamiento a temperaturas subcríticas, parte del carbono se difunde y forma carburos dispersos, resultando en martensita revenida, lo que mejora la tenacidad y reduce la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión.

Los rangos de temperatura para este proceso se clasifican en:

- Baja temperatura: 180°C a 220°C.
- Mediana temperatura: 300°C a 400°C.
- Alta temperatura: 550°C a 700°C

Técnicas de caracterización y evaluación electroquímica

La evaluación del comportamiento microestructural y la respuesta electroquímica de los aceros API X-52 y X-70 requiere técnicas de caracterización que permitan analizar tanto su morfología como su interacción con medios corrosivos, como el biodiésel.

El protocolo experimental se diseñó de manera secuencial, iniciando con pruebas electroquímicas para monitorear la cinética de degradación en tiempo real, seguidas de una caracterización microestructural que permite validar los mecanismos de daño observados.

Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

La Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) es una técnica no destructiva que permite evaluar el comportamiento electroquímico del sistema mediante la aplicación de una señal de corriente alterna de pequeña amplitud en un rango de frecuencias.

En este estudio, se emplea como etapa inicial para analizar la estabilidad de la interfase metal–biodiésel y detectar procesos de degradación temprana.

A través de esta técnica se determinan parámetros fundamentales como:

- Resistencia de polarización (R_p): Relacionada con la resistencia global del sistema frente a la corrosión.
- Resistencia de transferencia de carga (R_{ct}): Asociada a la cinética de las reacciones electroquímicas en la superficie del material.
- Capacitancia de doble capa (C_{dl}): Representa la acumulación de carga en la interfase electrodo-electrolito.
- Resistencia del electrolito (R_s): Corresponde a la resistencia óhmica del biodiésel bajo estudio.

Los resultados se representan mediante diagramas de Nyquist y Bode, y se interpretan mediante circuitos equivalentes que permiten describir los procesos de corrosión presentes en el sistema.

Polarización potenciodinámica

La polarización potenciodinámica consiste en variar de manera controlada el potencial aplicado al electrodo de trabajo y registrar la respuesta de corriente del sistema.

Esta técnica permite evaluar la tendencia del material a corroerse y comparar el comportamiento entre los distintos grados de acero y sus condiciones de tratamiento térmico, a partir del análisis de las reacciones anódicas y catódicas.

Mediante la extrapolación de las pendientes de Tafel, se obtienen parámetros críticos como:

- Potencial de corrosión (E_{corr}): Indica la tendencia termodinámica del material a corroerse.
- Densidad de corriente de corrosión (I_{corr}): Directamente relacionada con la velocidad de corrosión.

Estos parámetros permiten establecer comparaciones cuantitativas del desempeño electroquímico del material en función de su microestructura.

Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Como etapa final de caracterización, la microscopía electrónica de barrido (MEB) permite obtener imágenes de alta resolución de la superficie del material tras su exposición al medio corrosivo.

Esta técnica es fundamental para realizar un análisis morfológico detallado, permitiendo correlacionar los resultados electroquímicos con evidencia física del daño.

El uso del MEB en este estudio se enfoca en:

- Análisis de picaduras (pitting): Evaluación de la morfología del daño localizado inducido por el biodiésel.
- Observación de productos de corrosión: Identificación de capas de óxidos o depósitos formados sobre la superficie.
- Heterogeneidad microestructural: Evaluación de cómo las fases generadas por los tratamientos térmicos influyen en la reactividad superficial.

En conjunto, estas técnicas permiten establecer una relación directa entre los tratamientos térmicos aplicados, la microestructura resultante y el comportamiento electroquímico de los aceros API X-52 y X-70 en presencia de biodiésel, proporcionando una base sólida para la interpretación de los mecanismos de corrosión involucrados.

Metodología experimental

Materiales y reactivos

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon secciones de tubería comercial de acero grado API 5L X52 y API 5L X70. Estos materiales fueron seleccionados debido a su amplio uso en sistemas de transporte de hidrocarburos y combustibles líquidos.

A continuación, se detalla la composición química elemental de los metales base utilizados:

Tabla 1. Composición química del acero X-52

Elemento	C	Mn	Si	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	Nb
Metal base	0.065	1.141	0.191	0.003	0.006	0.005	0.021	0.002	0.011	0.033	0.041

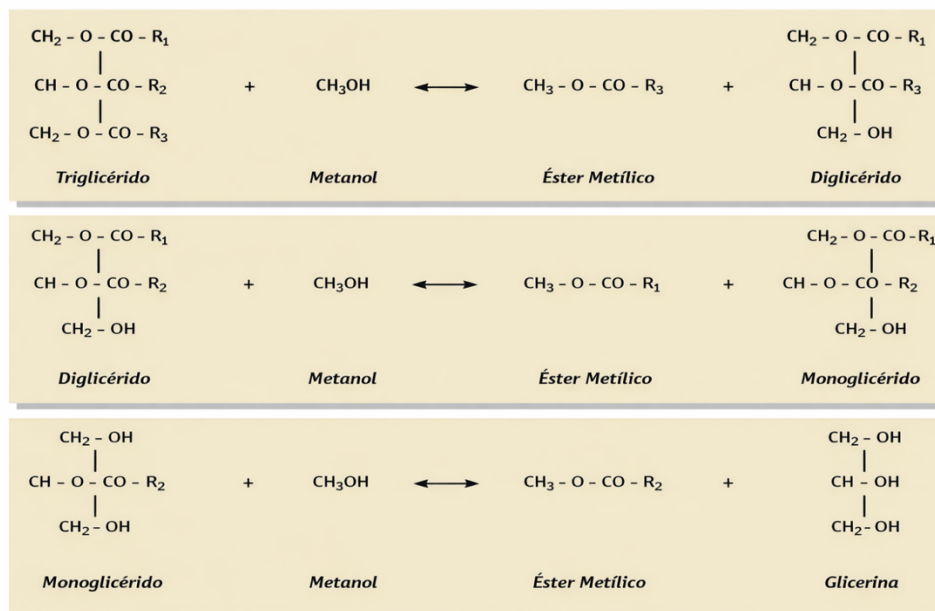
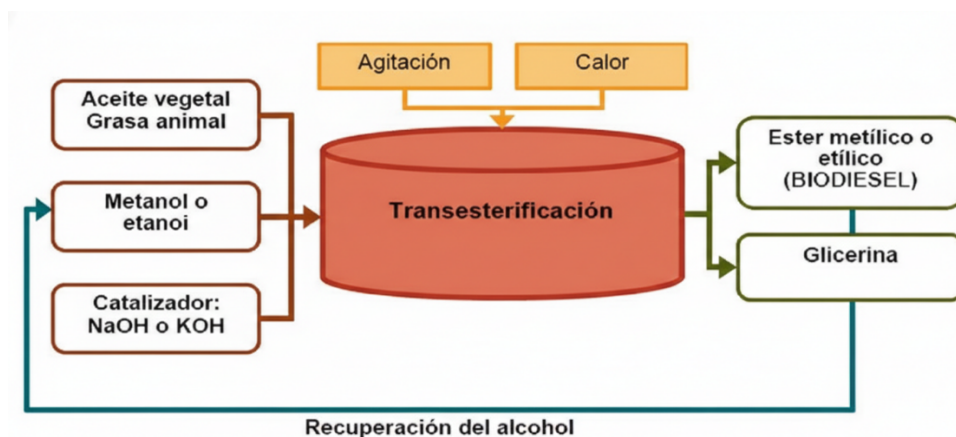
Tabla 2. Composición química del acero X-70

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Cu	Cr	Ni	Mo	Ti	Fe
Metal base	0.037	1.18	0.10	0.0098	0.0036	0.12	0.097	0.028	0.028	0.015	0.036	0.011	Bal

Como medio de estudio se utilizó biodiésel obtenido experimentalmente a partir de aceite vegetal de soya, mediante un proceso de transesterificación en sistema batch utilizando metanol grado analítico y un catalizador alcalino (NaOH)

Obtención y caracterización del biodiésel

El biodiésel se produjo a partir de aceite vegetal de soya mediante una reacción de transesterificación en sistema batch, la cual permite la conversión de triglicéridos en ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME). El proceso global se describe en el siguiente esquema operativo:

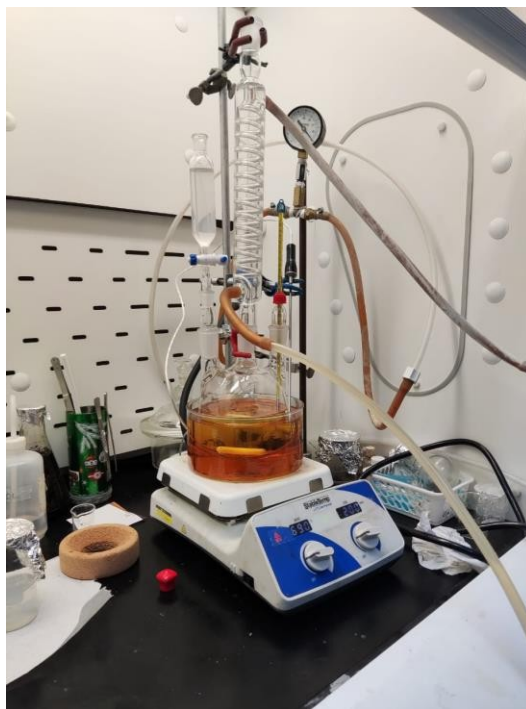


Procedimiento de Transesterificación

El protocolo experimental se dividió en las siguientes etapas consecutivas:

Preparación del metóxido: Se disolvieron 5 g de NaOH en 125 mL de metanol grado analítico, manteniendo agitación constante hasta lograr la completa homogeneización del catalizador.

Reacción: Se vertieron 500 g de aceite de soya en un matraz de fondo redondo acoplado a un sistema de reflujo. Se añadió el metóxido y se procesó a una temperatura controlada de 70 °C durante 90 minutos.



Separación de fases: La mezcla resultante se trasladó a un embudo de decantación, permitiendo el reposo necesario para la separación por diferencia de densidades entre el biodiésel (fase superior) y la glicerina (fase inferior).

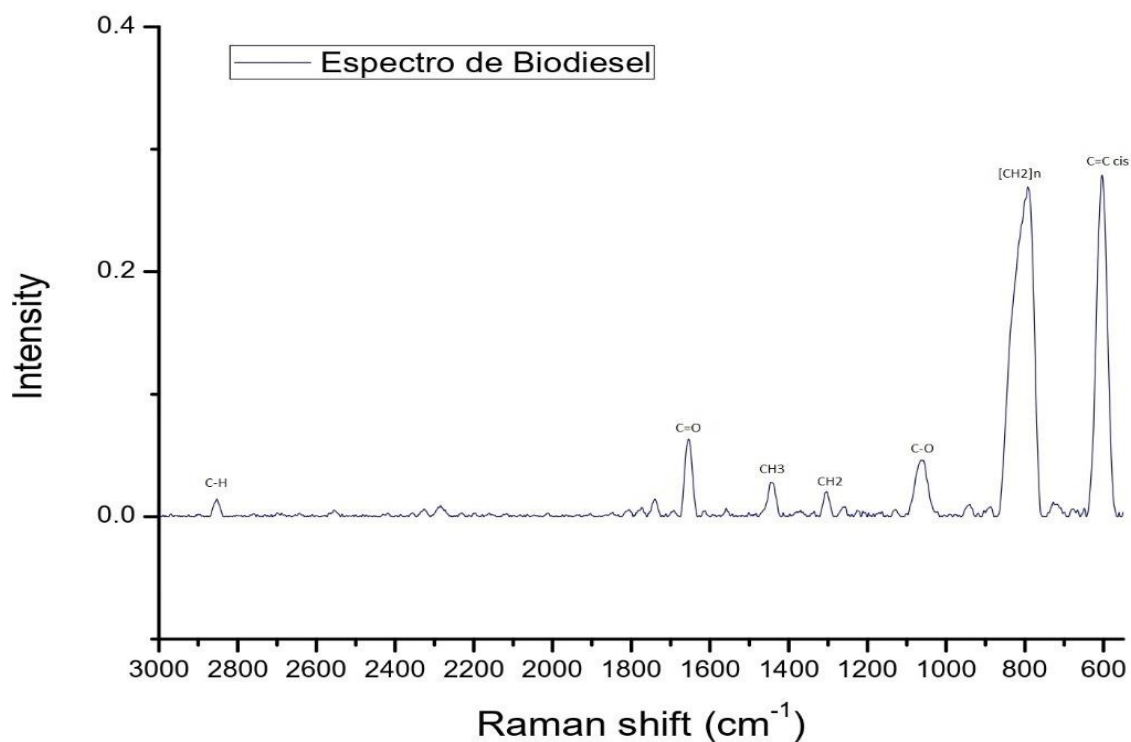
**Purificación y Validación:**

Para garantizar la calidad del biocombustible y eliminar trazas de reactivos remanentes, se realizaron los siguientes pasos de purificación:

Lavado y Neutralización: Se efectuaron lavados sucesivos con agua destilada y se añadió cloruro de amonio para neutralizar el exceso de catalizador.

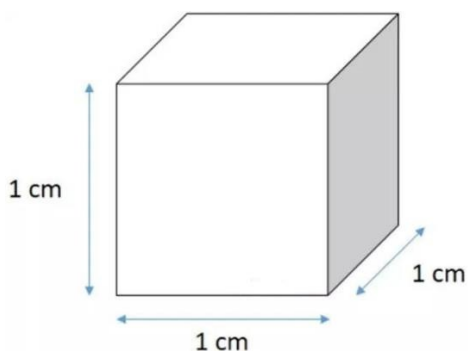
Secado: Se utilizó sulfato de sodio anhidro para eliminar la humedad residual, seguido de un proceso de filtrado.

Finalmente, la eficiencia de la reacción y la pureza del biodiésel se validaron mediante Espectroscopía Raman, verificando la señal característica de los ésteres metílicos.



Preparación de las probetas de acero

Preparación experimental de los materiales Para el desarrollo de la investigación, se obtuvieron secciones de tubería comercial de acero grado API 5L X52 y API 5L X70. A partir de estas, se maquinaron probetas con una geometría de cubo con un área aproximada de 1 cm^2 por cara, con el fin de estandarizar la superficie que sería expuesta durante los ensayos electroquímicos.



Las muestras de cada acero se dividieron en tres condiciones experimentales para establecer diferentes estándares de medición y comparación:

- Probeta Control: En estado de recepción, sin tratamiento térmico.
- Probeta Templada: Sometida a enfriamiento rápido para transformar la fase.
- Probeta Templada y Revenida: Sometida a un ciclo térmico dual para ajustar propiedades mecánicas y microestructurales.

Los tratamientos se realizaron en una mufla eléctrica bajo las condiciones descritas en la Tabla

Tratamiento térmico	Condiciones
Templado	850°C, 40 min, enfriado en agua estática
Revenido	350°C por 30 min, enfriado en horno

El tratamiento de temple consistió en: Austenización a 850 °C con un tiempo de mantenimiento de 40 minutos, seguido de un enfriamiento rápido en agua estática.

El tratamiento de revenido consistió en: Calentamiento a 350 °C con un tiempo de mantenimiento de 30 minutos, seguido de un enfriamiento lento dentro del horno.



Preparacion de la mufla electrica



Supervision de la mufla caliente



Mufla Electrica Enfriando



Piezas obtenidas despues de los tratamientos termicos

Preparación superficial y montaje

Una vez tratados térmicamente, las muestras pasaron por un proceso de preparación metalográfica y montaje para asegurar mediciones correctas tanto en el microscopio electrónico de barrido, como en el potencióstato.

Preparación Superficial (Acabado Espejo): La preparación superficial se realizó mediante un desbaste progresivo utilizando lijas de carburo de silicio hasta alcanzar un grano fino.

Posteriormente, se procedió al pulido con pasta de alúmina hasta obtener un acabado espejo. Este proceso es fundamental tanto para el ataque químico posterior como para garantizar que no existan irregularidades superficiales que alteren los ensayos de corrosión.



Control



Temple



Revenido

Encapsulamiento: Para las evaluaciones electroquímicas, las muestras fueron preparadas bajo el siguiente protocolo.

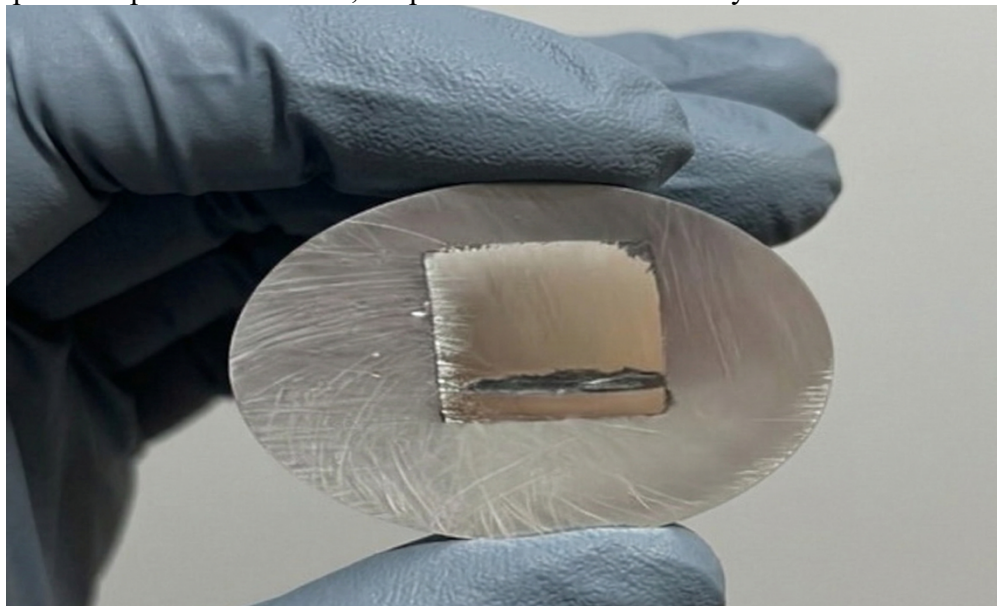
Las muestras se montaron en resina epóxica, dejando expuesta un área de 1 cm²



Conectividad: Se acondicionó un conductor eléctrico aislado para permitir la conexión con el potenciostato sin contacto directo entre el conector y el biodiésel.

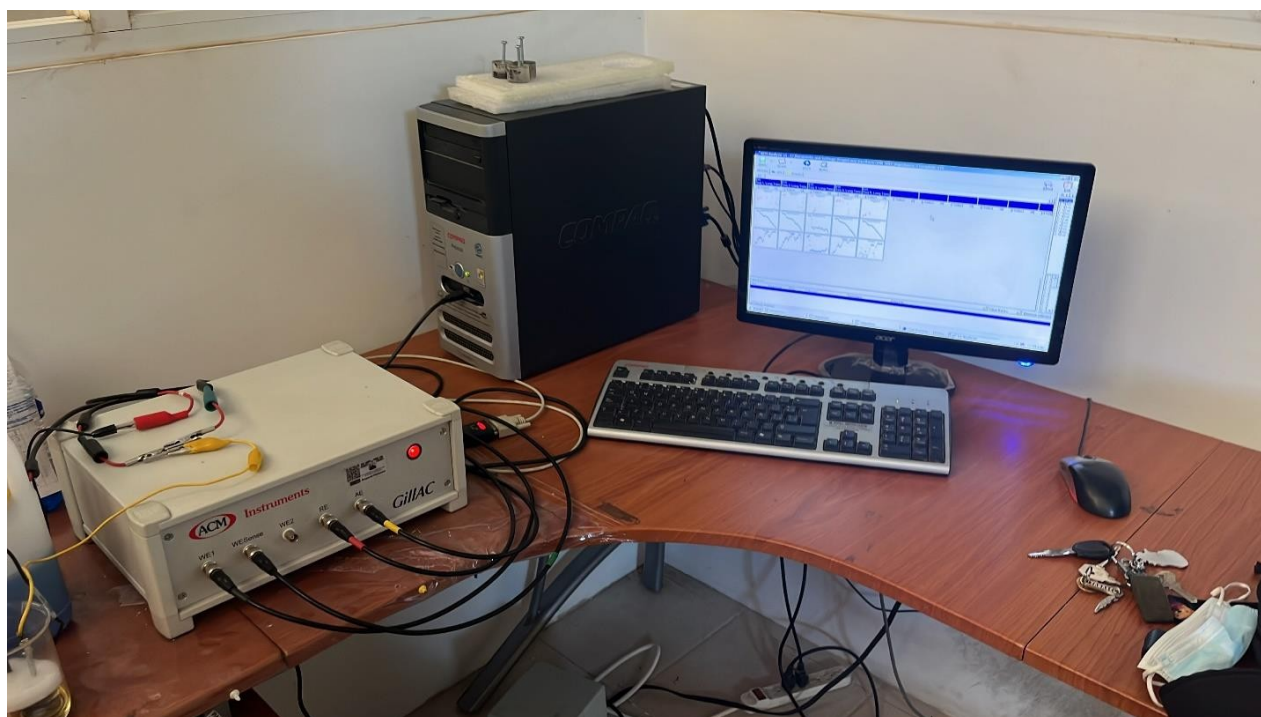


Limpieza Final: Antes de cada ensayo, la superficie expuesta fue lijada finamente para eliminar cualquier impureza o película de óxido, limpiada con alcohol etílico y secada inmediatamente.



Evaluación Electroquímica

La determinación de los mecanismos de degradación se realizó mediante un potenciostato automatizado marca ACM Instruments (Gill AC).



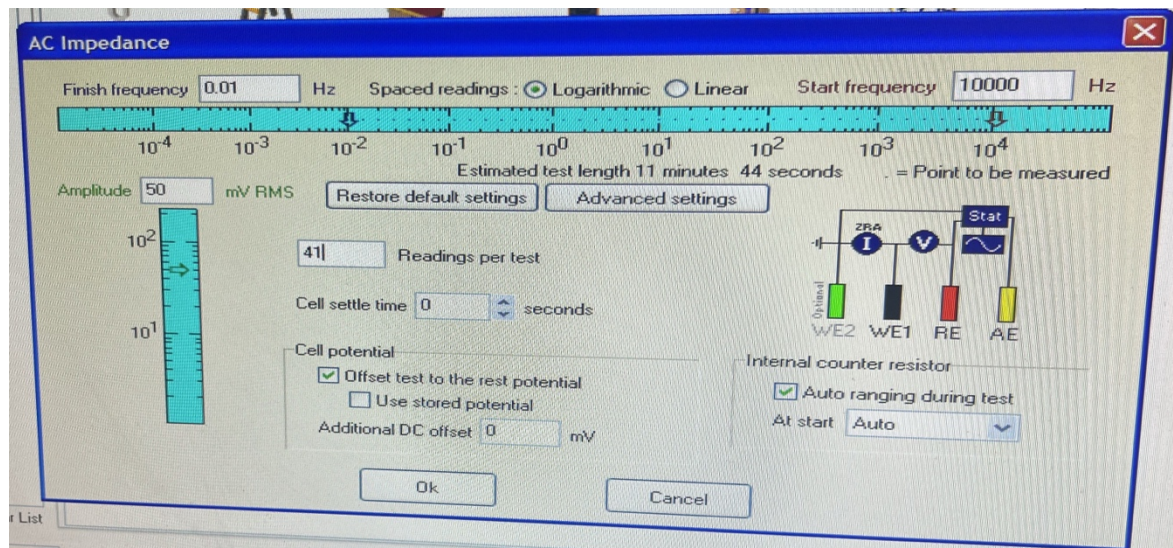
Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS)

Se empleó la técnica de AC Impedance para evaluar la resistencia del sistema en equilibrio:

Rango de frecuencia: 10,000 Hz a 0.01 Hz.

Amplitud: 50 mV RMS.

Potencial: Realizado al potencial de reposo (OCP).

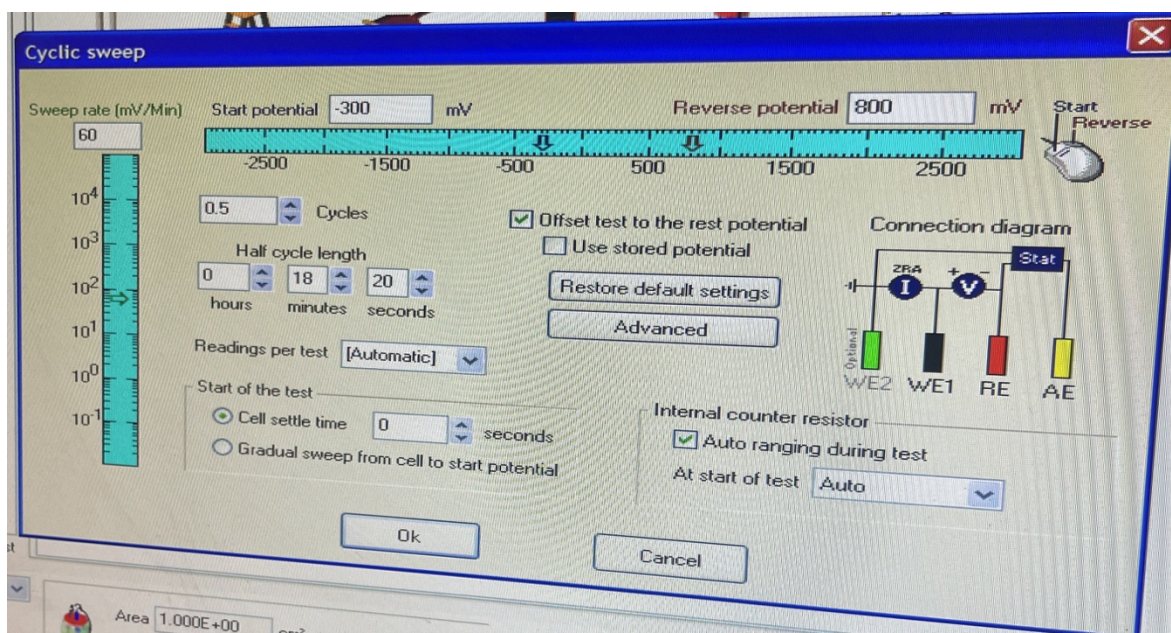


Polarización Potenciodinámica (Cyclic Sweep)

Se ejecutó un barrido potenciodinámico para determinar la cinética de corrosión:

Rango de potencial: -300 mV a +800 mV respecto al OCP.

Velocidad de barrido: 60 mV/min (1 mV/s).



Caracterización Microestructural (MEB)

Como etapa final, las muestras se analizaron mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB/SEM) para identificar la morfología del daño y la formación de productos de corrosión tras la exposición al biodiésel.

Procedimiento para las pruebas de polarización potenciodinámica

Las curvas de polarización potenciodinámica se obtuvieron barriendo el potencial en un intervalo de ± 250 mV respecto al potencial de circuito abierto, con una velocidad de barrido de 1 mV/s.

A partir de las curvas obtenidas se determinaron:

Potencial de corrosión (E_{corr})

Densidad de corriente de corrosión (I_{corr})

Pendientes anódica y catódica (Tafel)

La velocidad de corrosión fue calculada a partir de la densidad de corriente de corrosión utilizando las relaciones electroquímicas correspondientes.

Caracterización posterior a las pruebas de corrosión

Tras la realización de los ensayos electroquímicos, las probetas fueron retiradas del medio, limpiadas cuidadosamente y sometidas a análisis microestructural para evaluar la morfología del ataque corrosivo.

Análisis morfológico mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Las superficies fueron examinadas mediante microscopía electrónica de barrido con el objetivo de identificar:

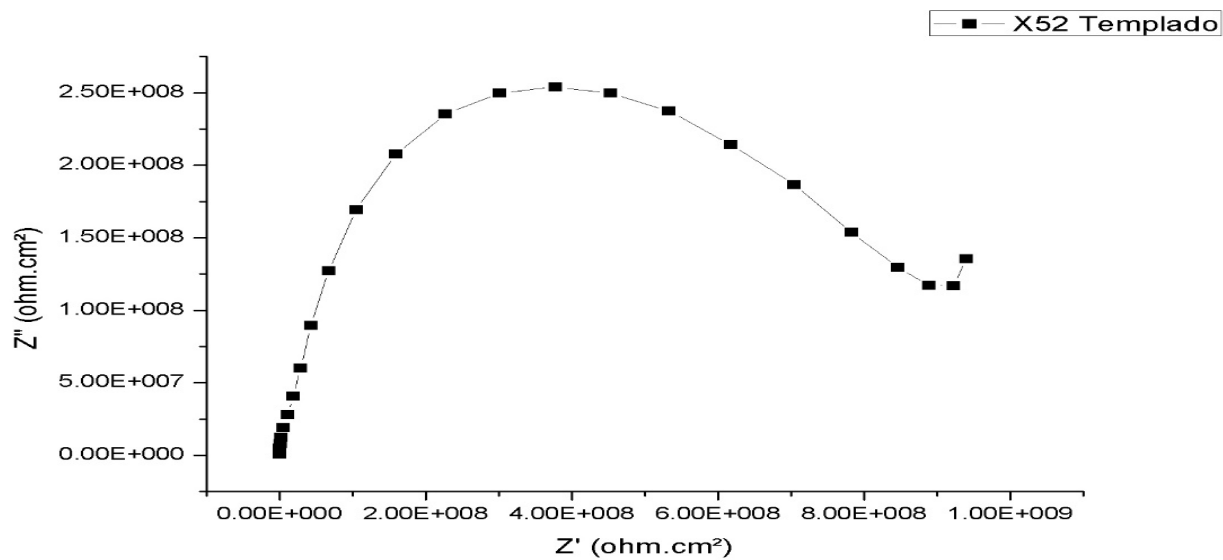
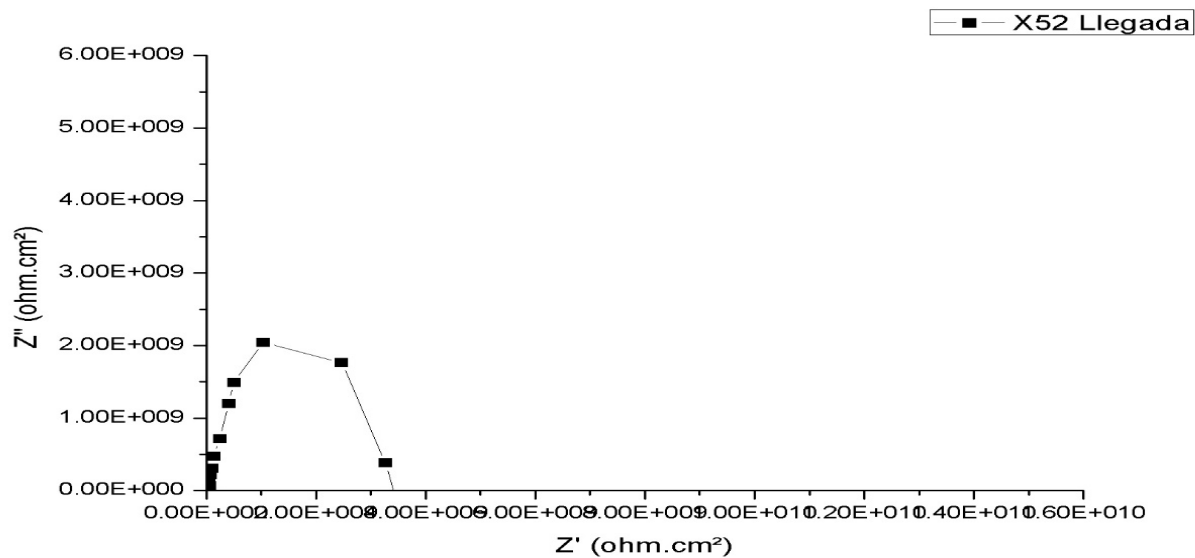
- Corrosión uniforme
- Formación de picaduras
- Presencia de productos de corrosión
- Cambios topográficos inducidos por el biodiésel

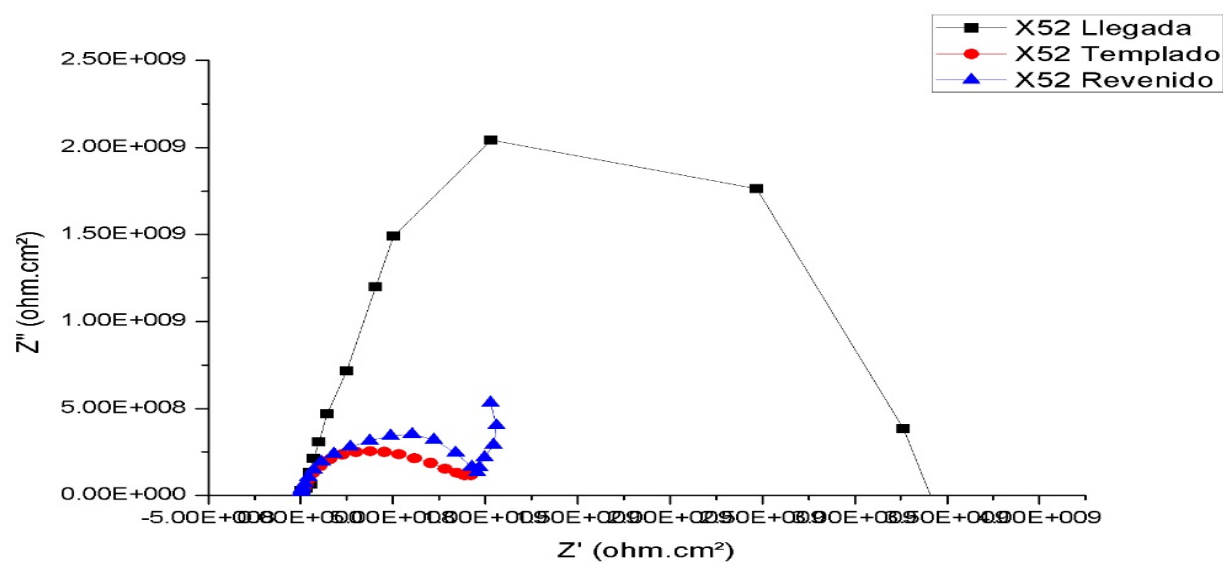
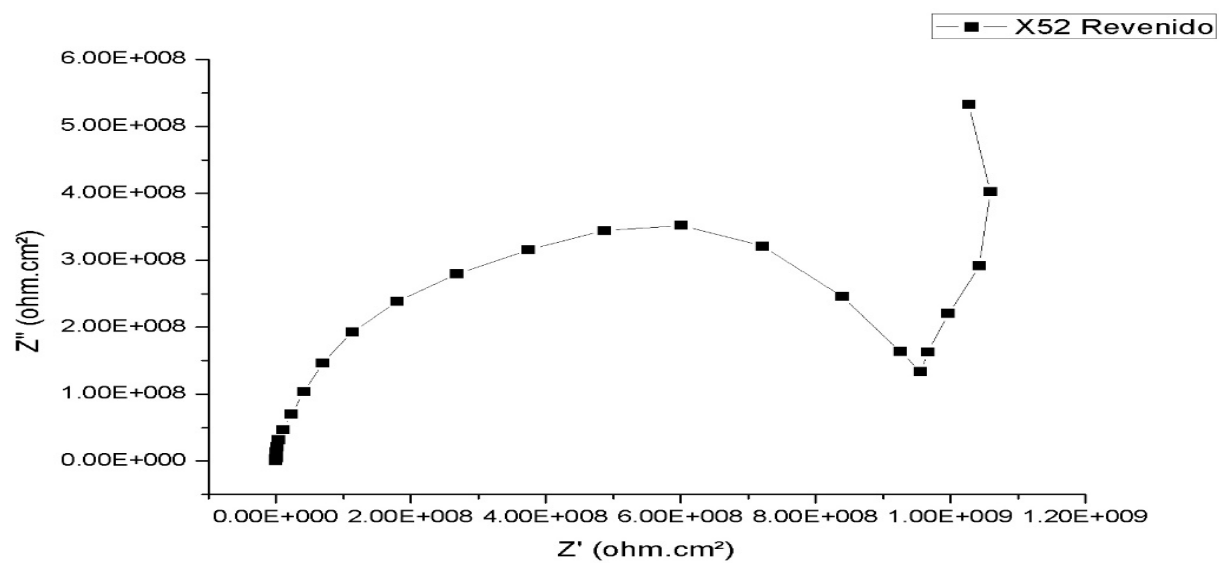
El análisis permitió correlacionar los resultados electroquímicos con los mecanismos de deterioro observados.

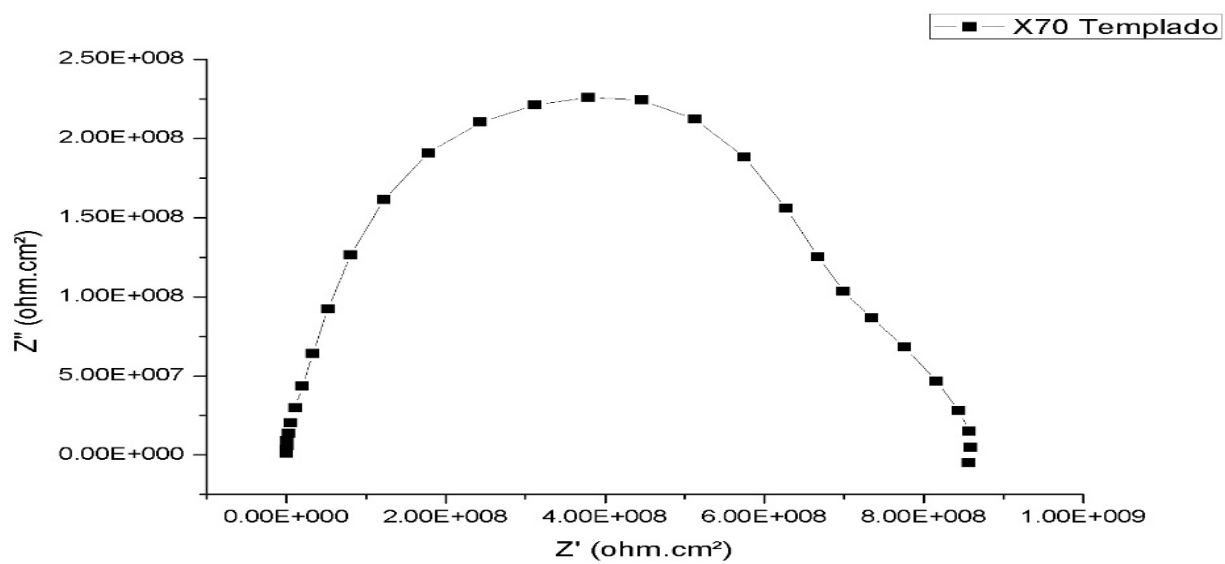
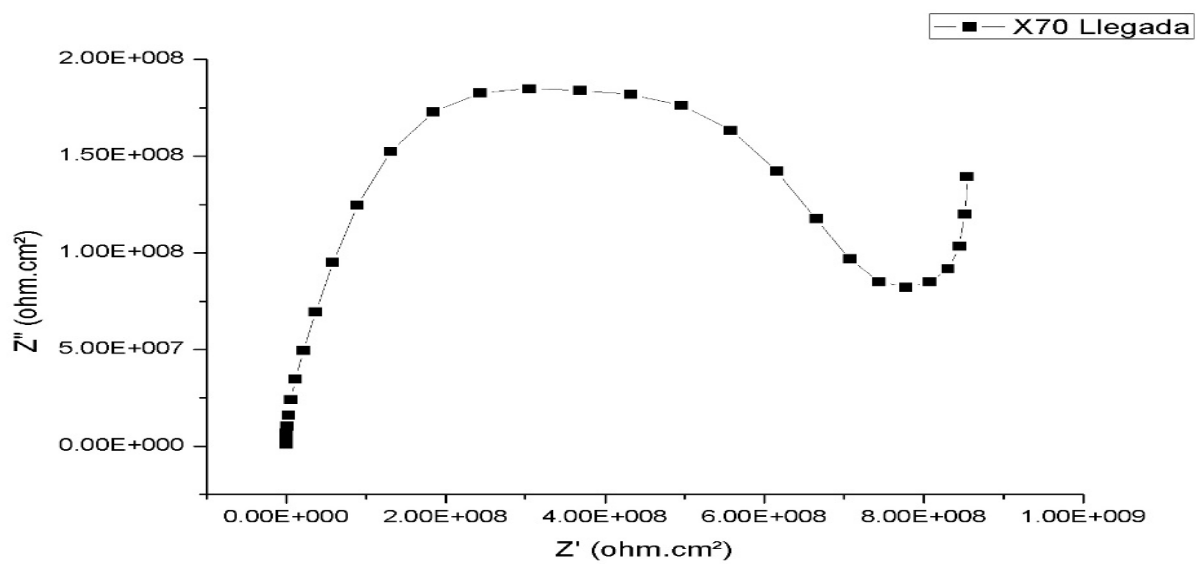
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

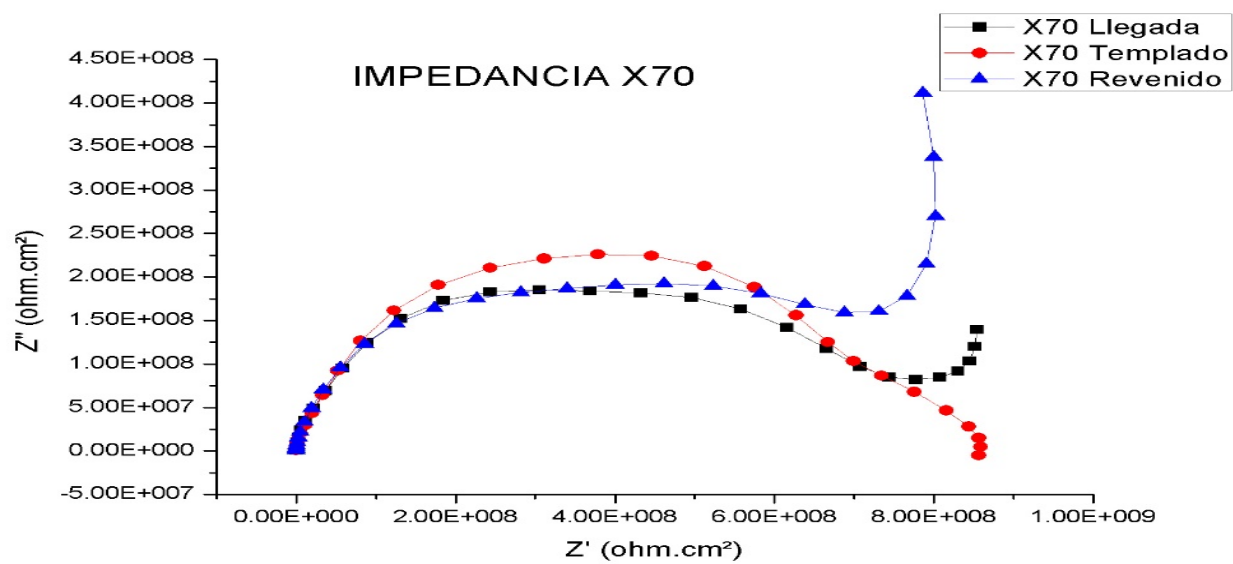
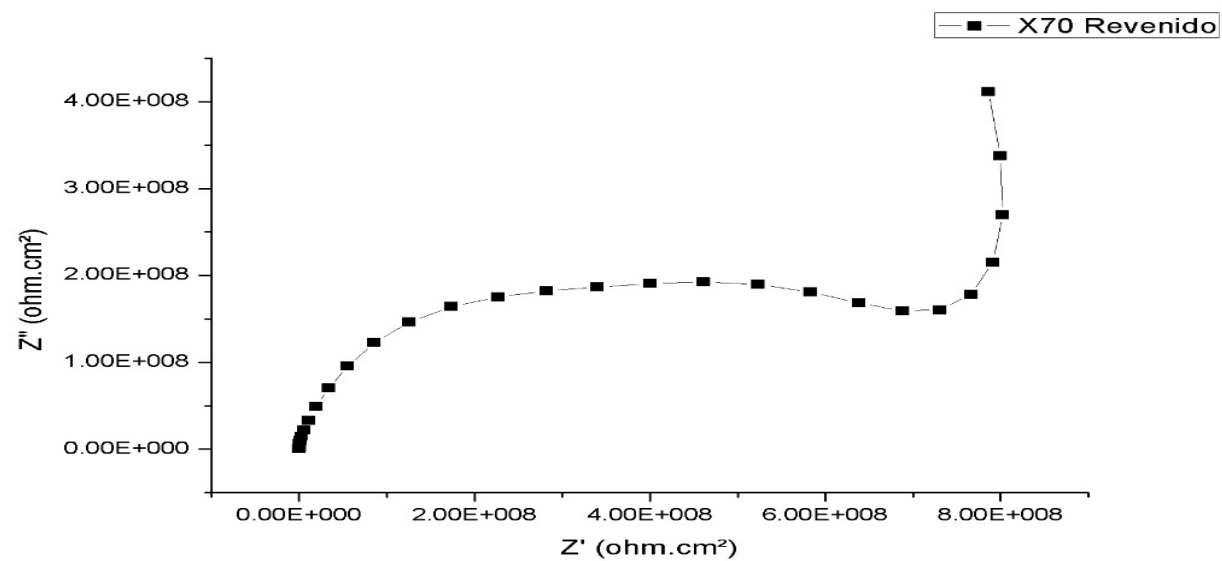
Graficas Obtenidas:

Graficas obtenidas de Nyquist:

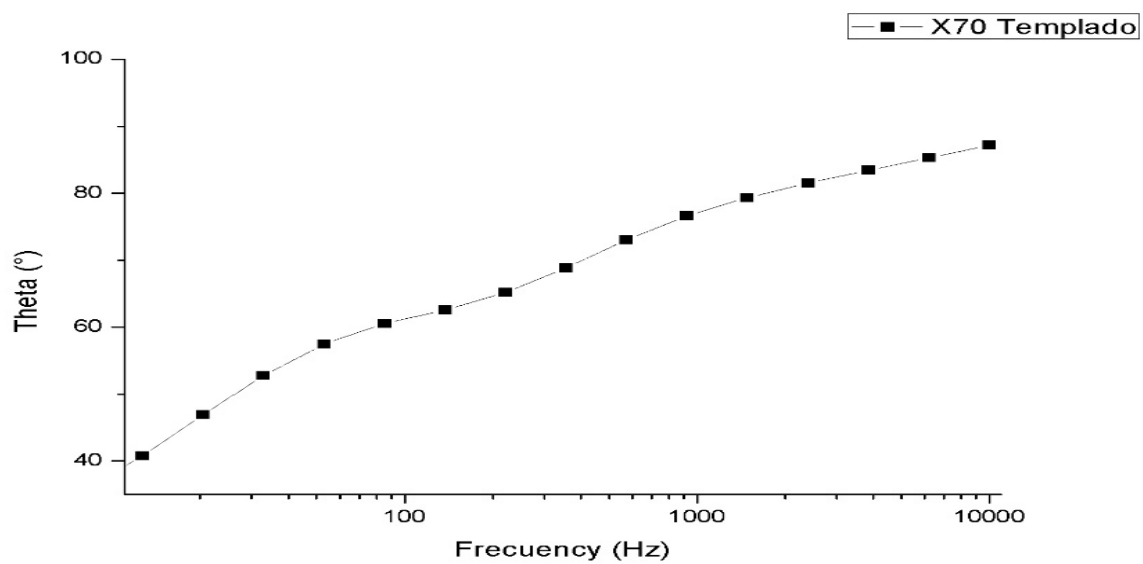
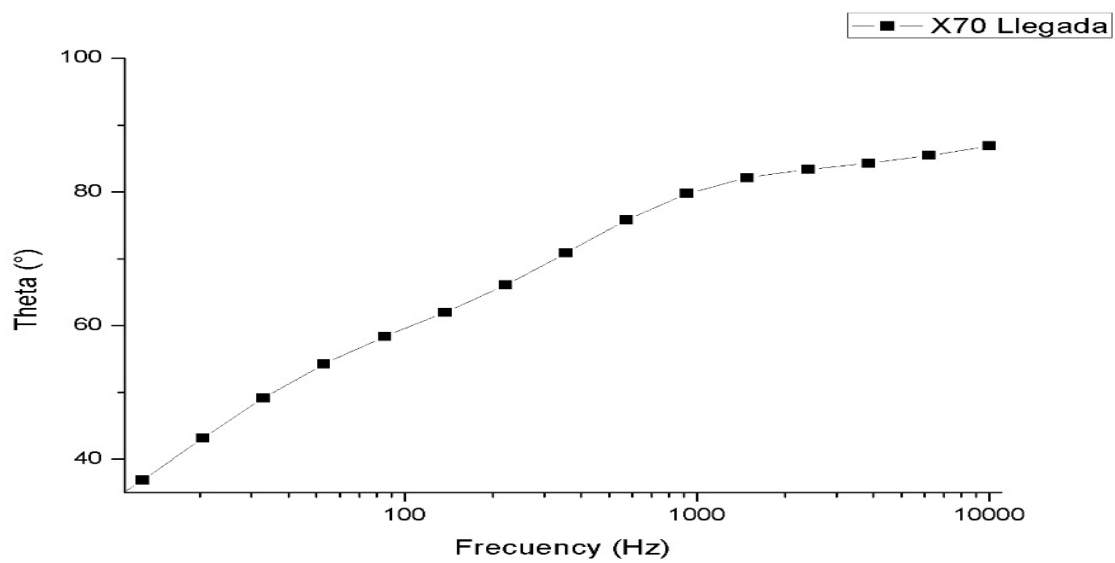


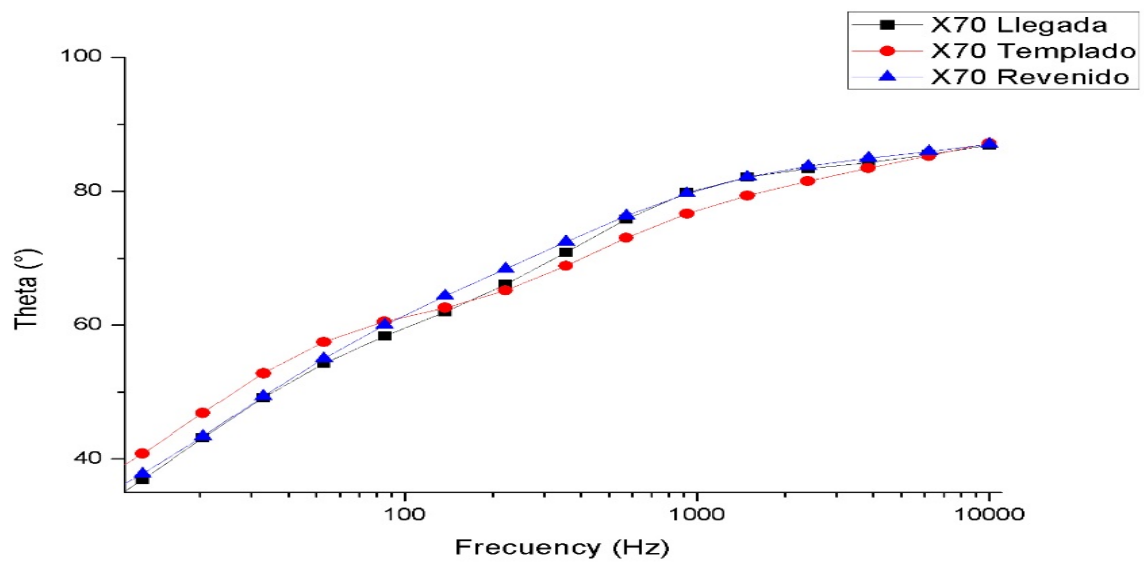
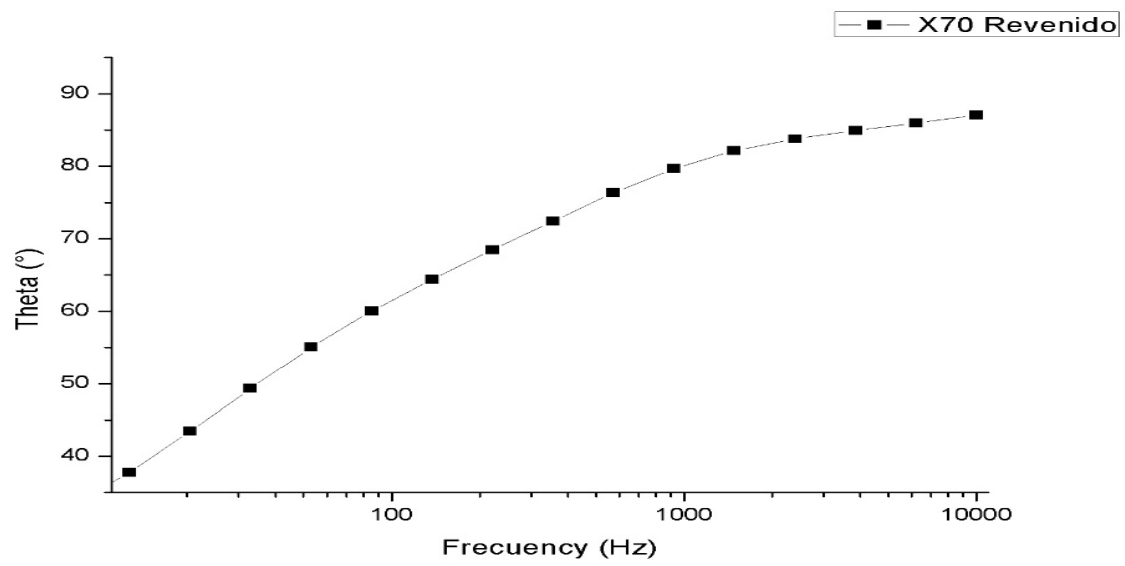


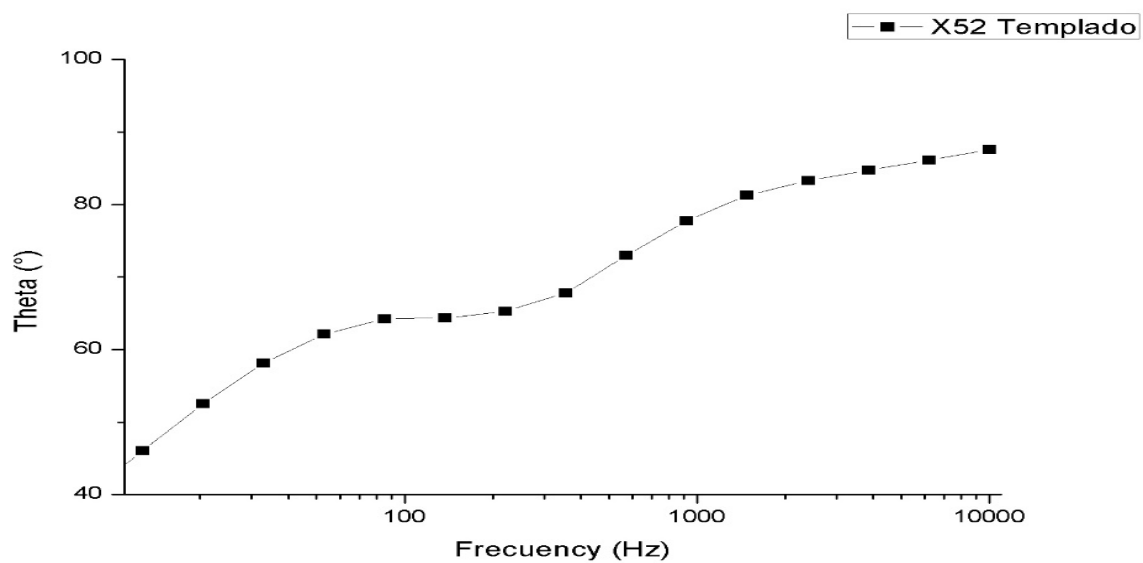
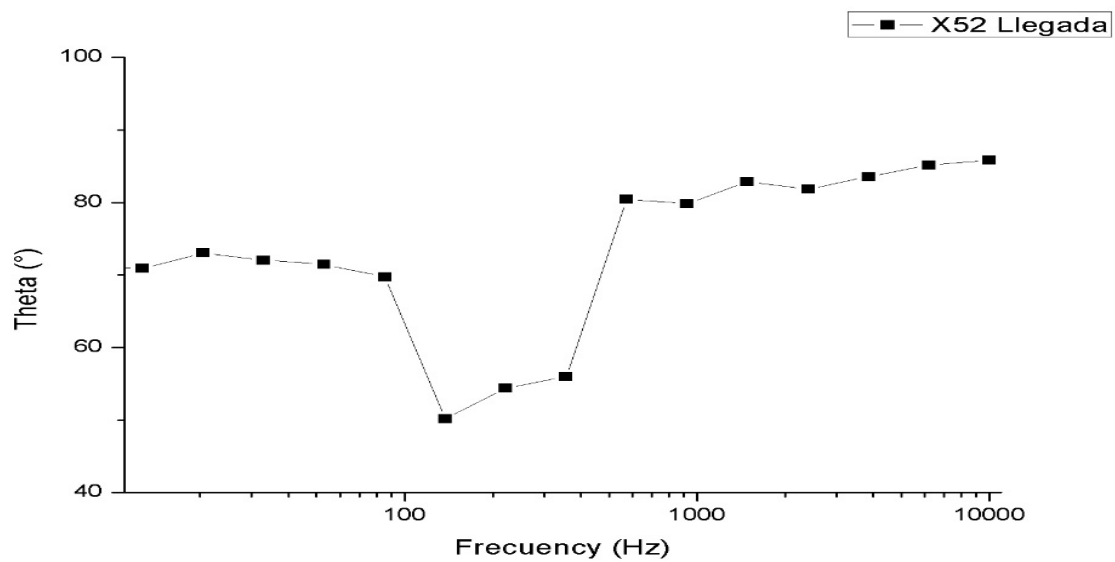


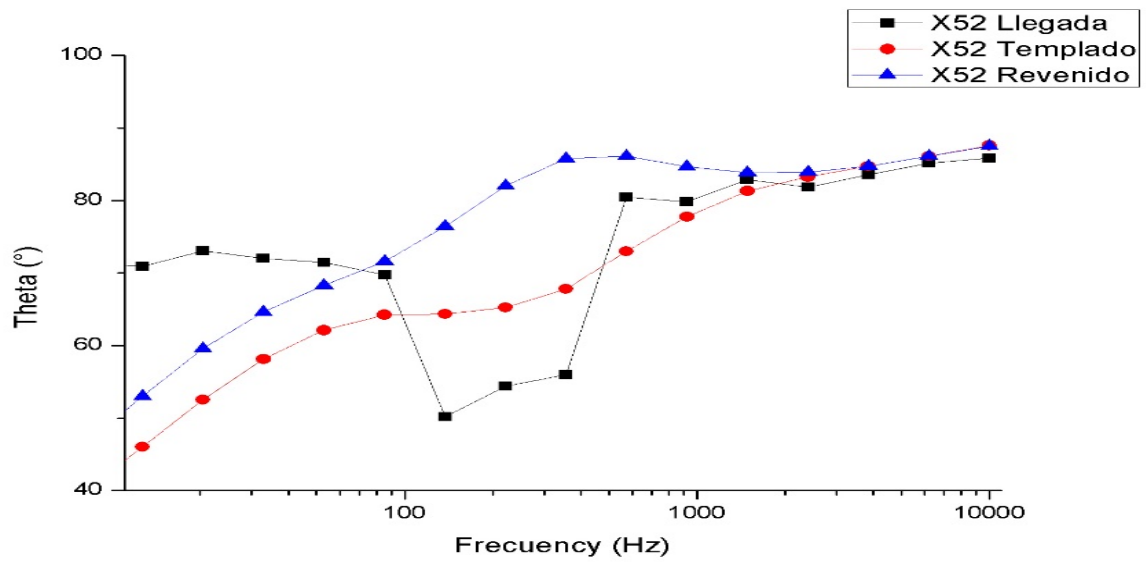
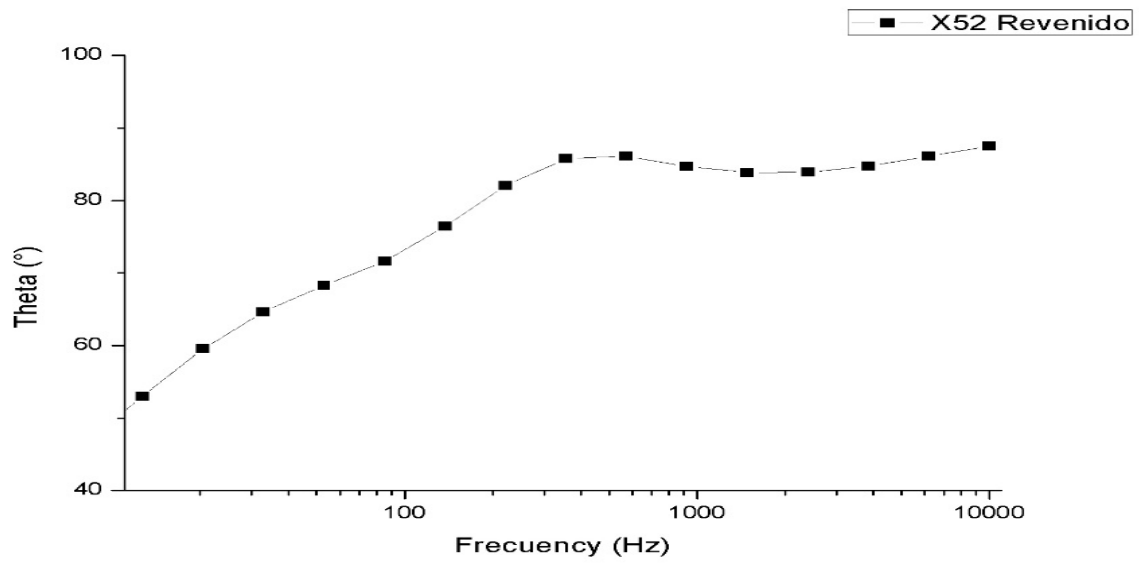


Graficas obtenidas de Bode

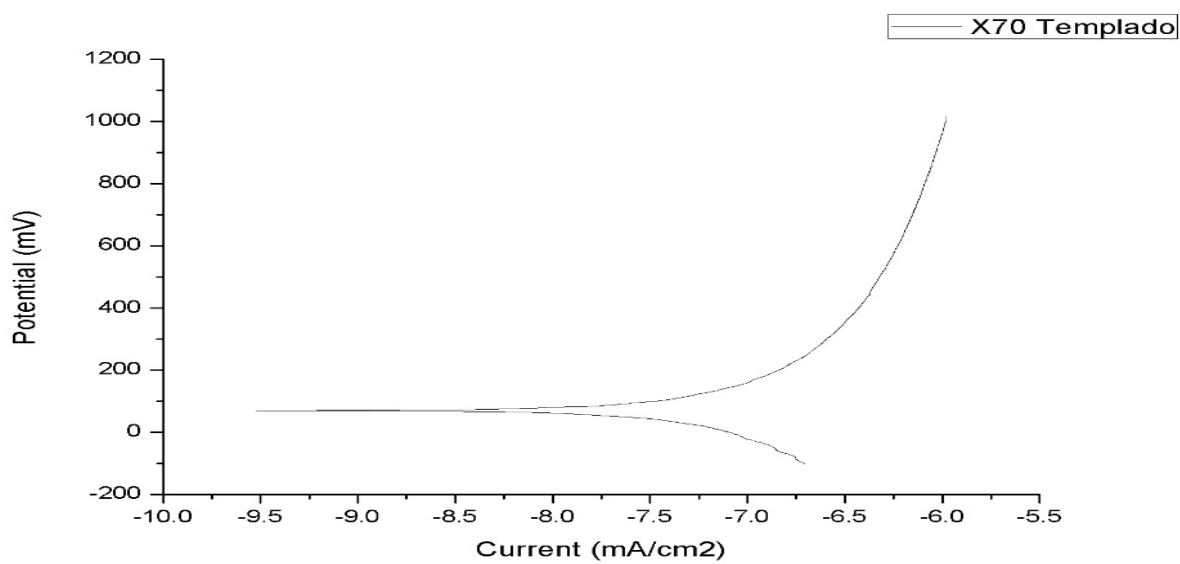
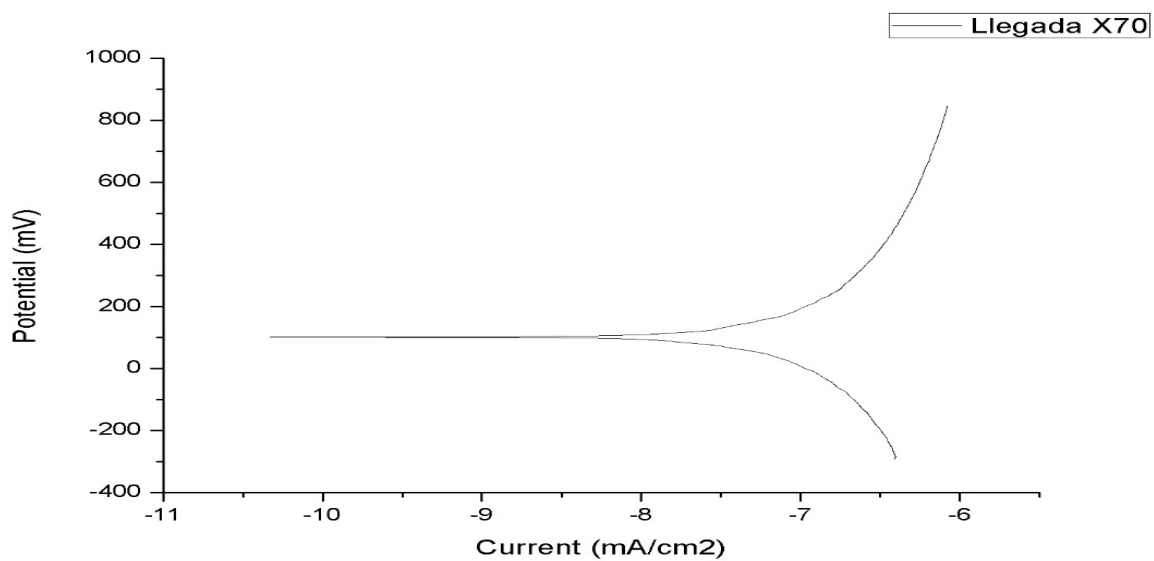


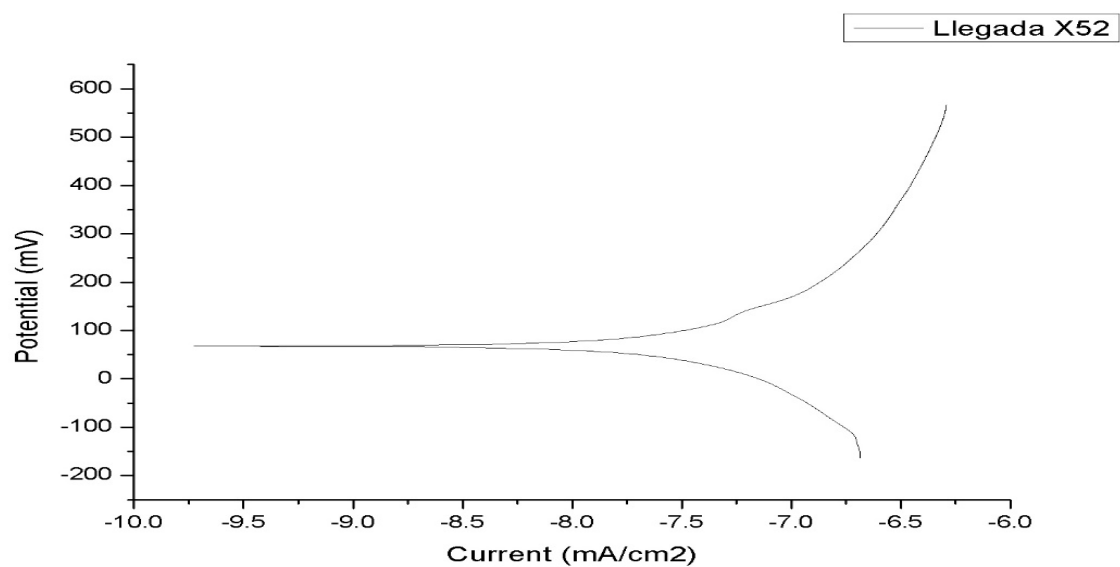
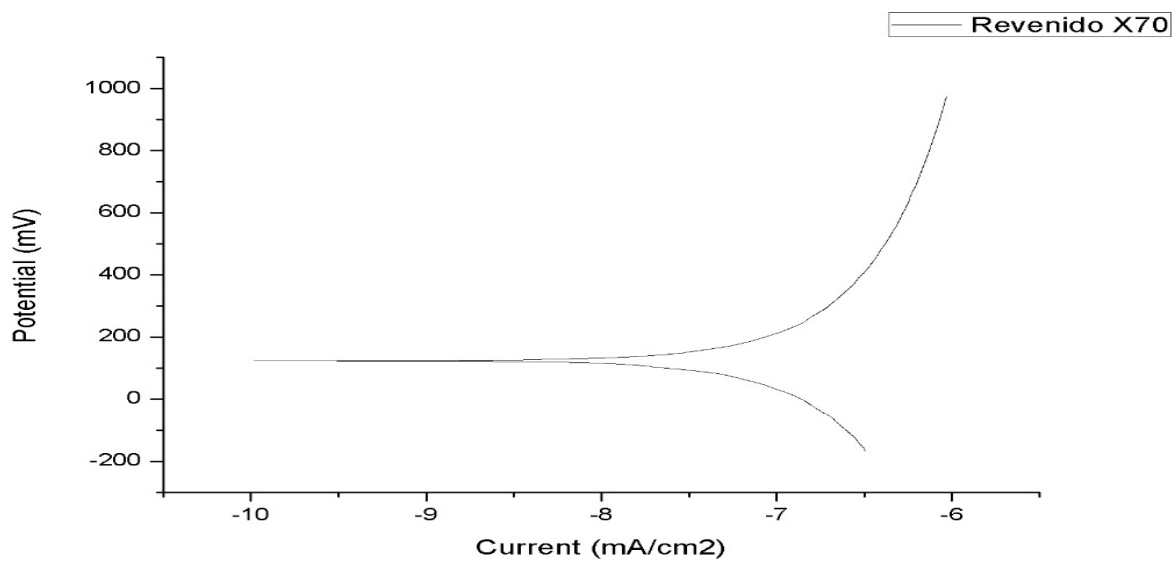


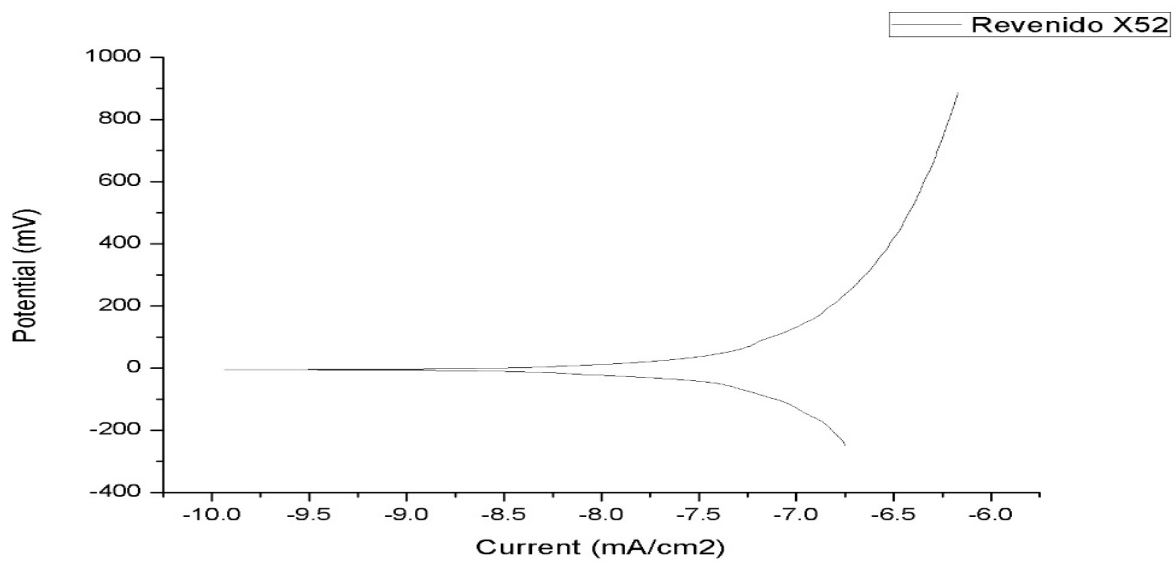
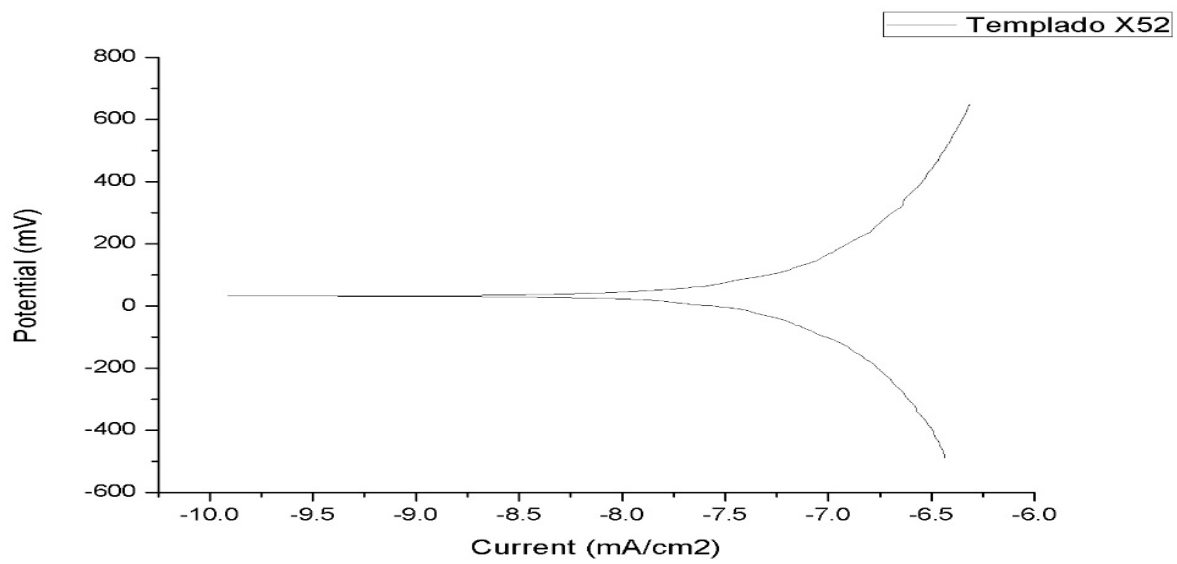


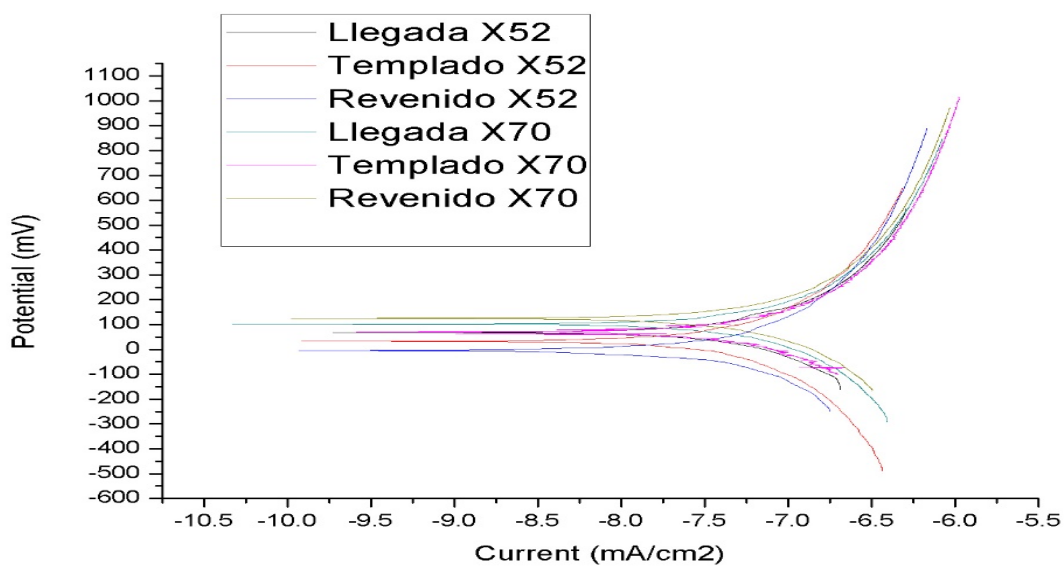


Graficas obtenidas de Polarización.









Valores para polarización

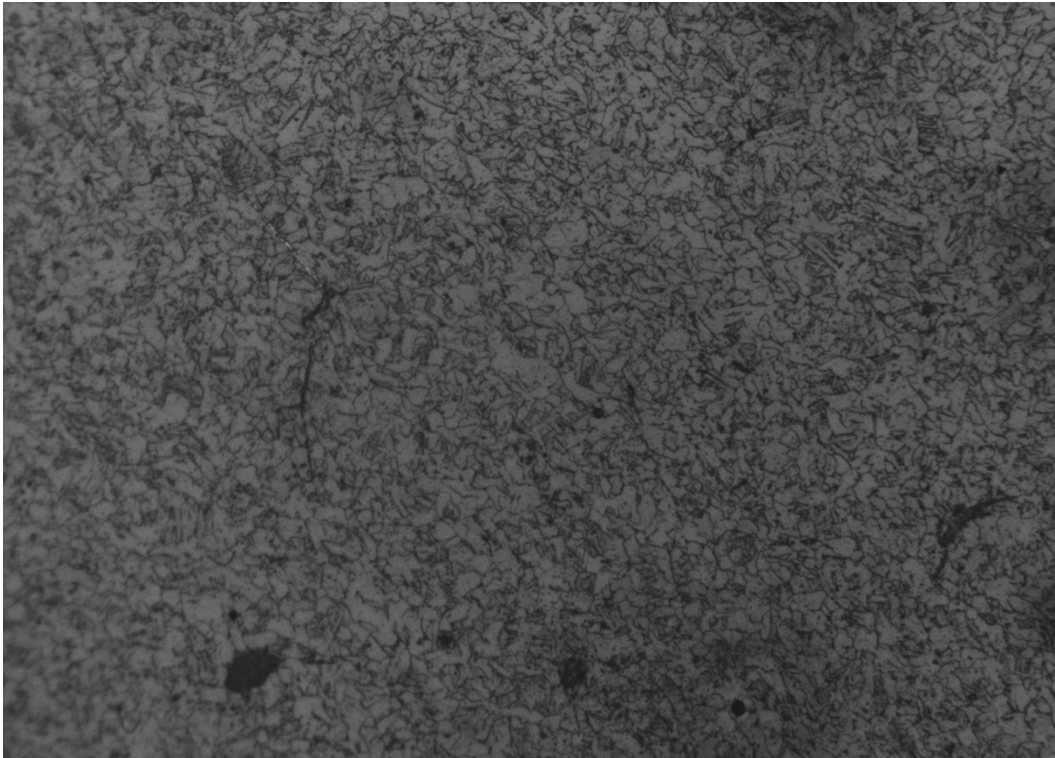
Probeta	I _{corr} (mA/cm ²)	E _{corr} (mV)
Llegadax 52	X = - 7.755076 07	Y = 67.2730814
Templado x52	X = - 7.369335 35	Y = 38.6319846
Revenido x52	X = - 7.407010 84	Y = 0.578034682
Llegada x70	X = - 7.709000 27	Y = 102.304747
Templado x70	X = - 7.932423 14	Y = 70.144105
Revenido x70	X = - 7.786725 39	Y = 124.980613

Caracterización microestructural de las probetas

La caracterización microestructural se realizó mediante microscopía electrónica de barrido, con el fin de identificar las fases presentes y evaluar la influencia de los tratamientos térmicos en la morfología del material.

X52:

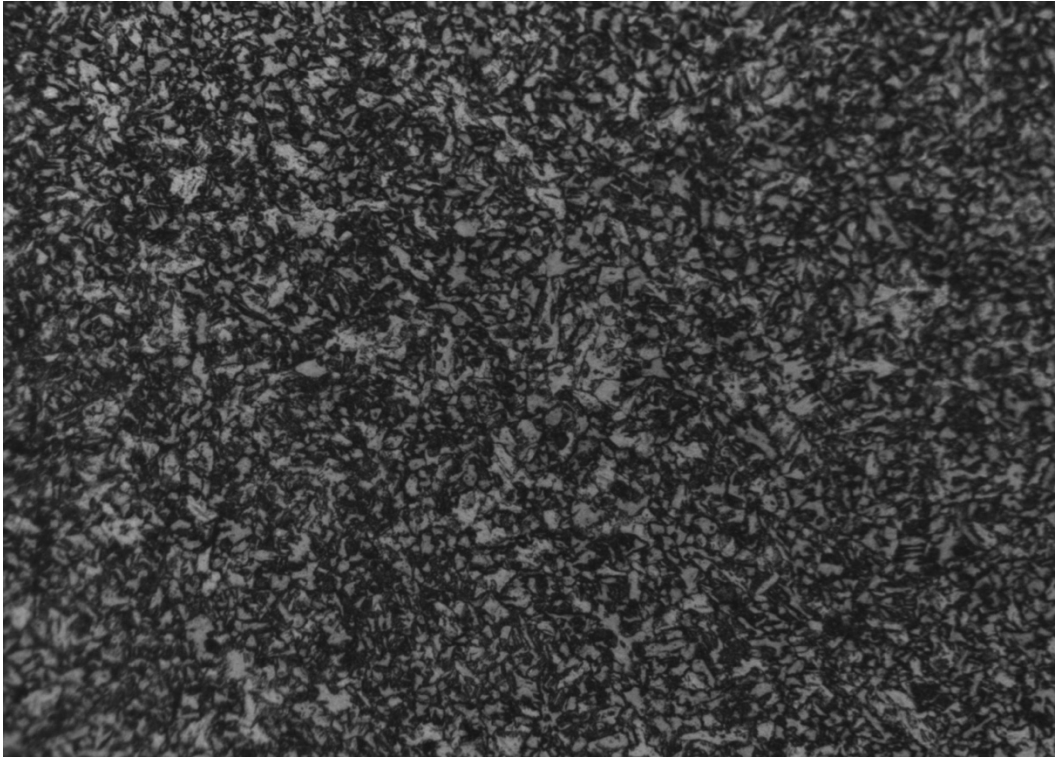
Control:



Control

- **Microestructura:** Se observa la estructura típica de un acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA) laminado.
- **Componentes:** Una matriz predominantemente ferrítica (granos claros) con pequeñas colonias de perlita (zonas oscuras/grisáceas) dispersas.
- **Morfología:** Los granos parecen tener cierta equiaxialidad, indicando un estado normalizado o de laminación controlada propio del grado X52 para asegurar ductilidad y tenacidad.

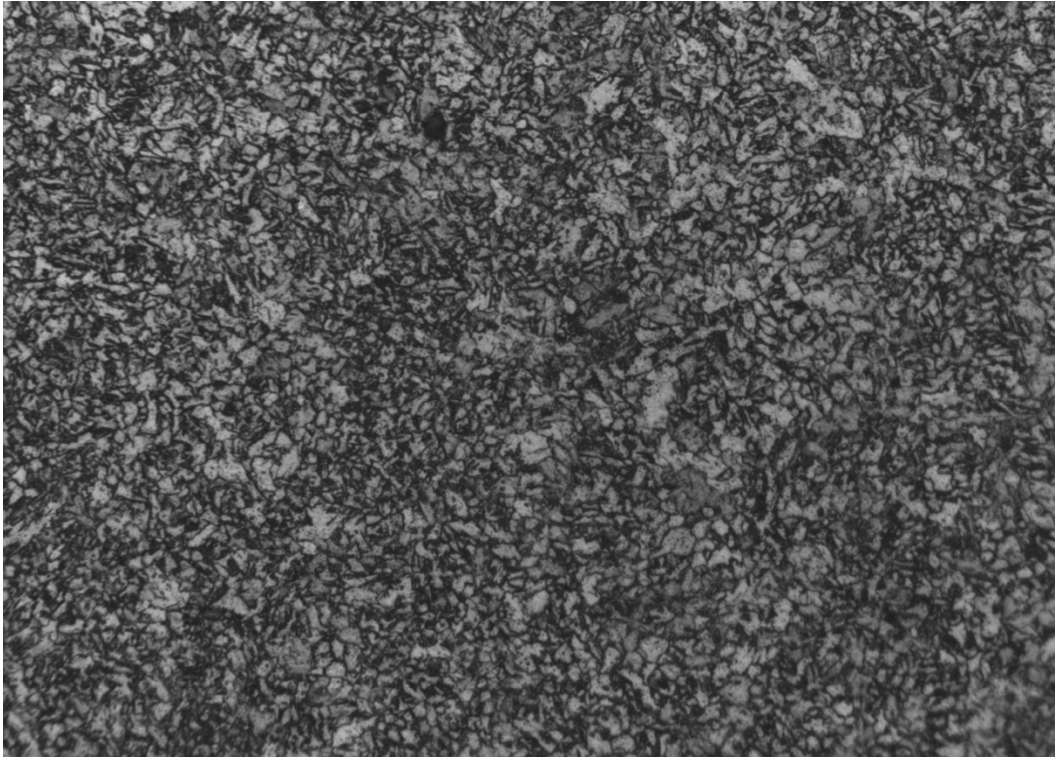
Templado:



Templado (Quenched)

- **Microestructura:** Hay un cambio drástico hacia una estructura mucho más fina y acicular.
- **Componentes:** Se identifica principalmente martensita y posiblemente algo de bainita.
- **Aspecto:** La imagen se ve más oscura y "apretada" debido a la alta densidad de agujas martensíticas producidas por el enfriamiento rápido desde la zona austenítica. Esta es la fase de máxima dureza pero alta fragilidad.

Revenido:



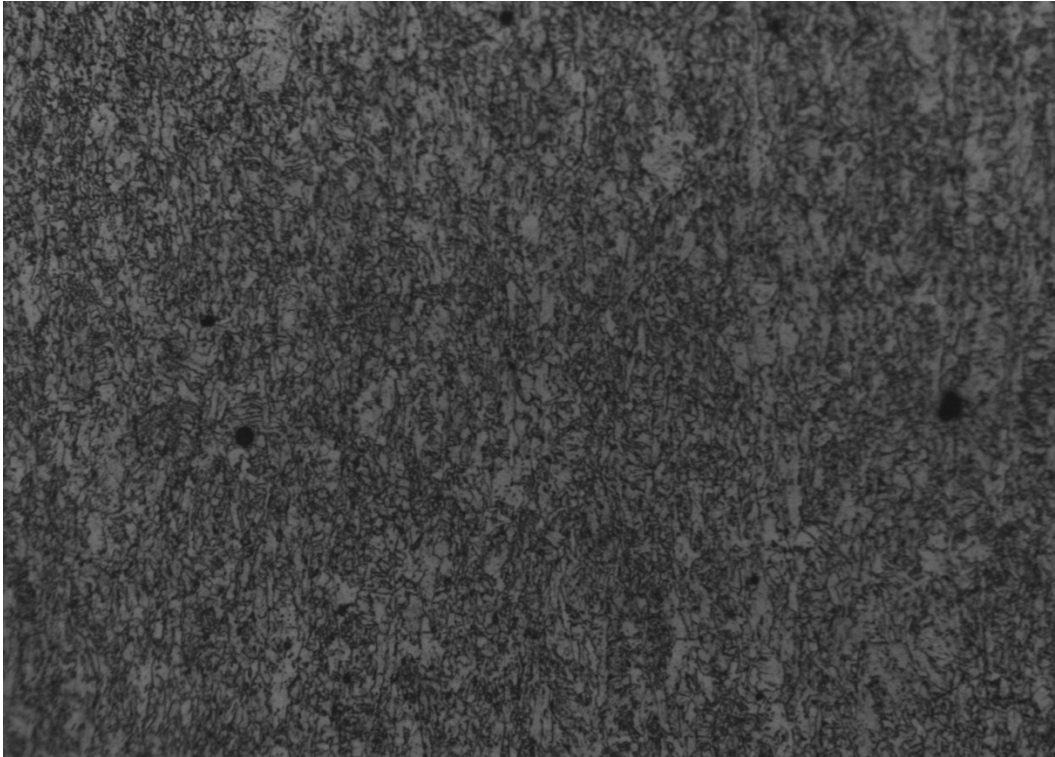
Revenido

- **Microestructura:** La estructura se ve más homogénea y relajada que la del temple.
- **Componentes:** Se trata de martensita revenida.
- **Análisis:** El tratamiento térmico permitió la precipitación de carburos finos y la recuperación de la red cristalina. Esto reduce las tensiones internas del temple, mejorando la tenacidad y reduciendo ligeramente la dureza para cumplir con los requerimientos operativos del X52.

Condición	Microconstituyentes	Morfología	Propiedad Predominante (Esperada)
Control	Ferrita + Perlita	Granos equiaxiales	Ductilidad / Tenacidad
Temple	Martensita	Estructura acicular	Máxima dureza / Fragilidad
Revenido	Martensita Revenida	Agujas difusas + Carburos	Equilibrio Resistencia-Tenacidad

X70:

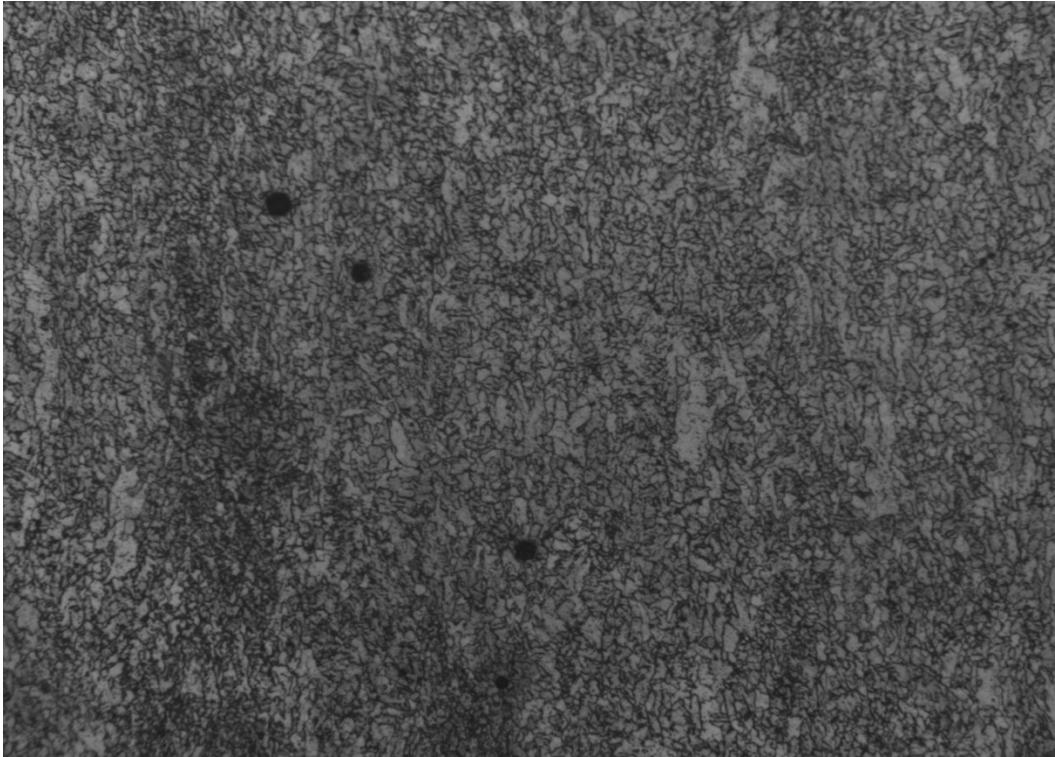
Control



Control

- **Microestructura:** Se observa una matriz de ferrita acicular y ferrita poligonal sumamente fina con pequeñas regiones de constituyente MA (Martensita-Austenita).
- **Análisis:** A x20, se aprecia que el tamaño de grano es notablemente menor que en el X52. Esta microestructura es la responsable de la excelente combinación de alta resistencia mecánica y tenacidad a bajas temperaturas que caracteriza al grado X70.

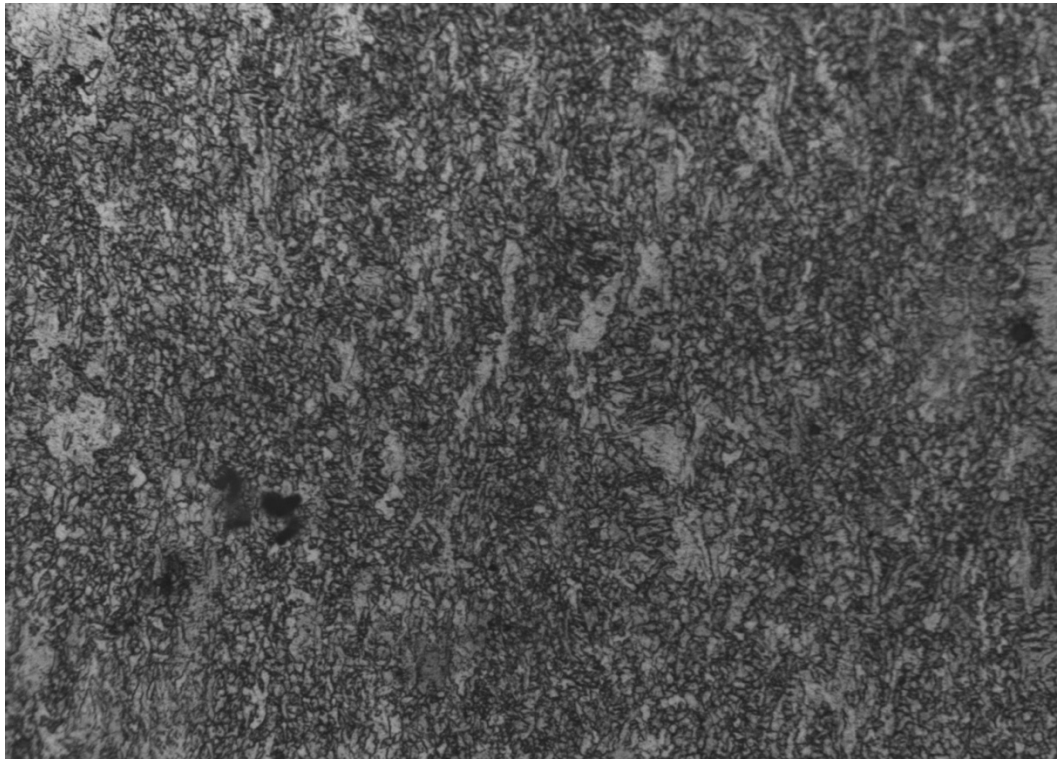
Templado



Temple

- **Microestructura:** Transformación a martensita de bajo carbono.
- **Análisis:** Debido a la mayor templabilidad de este grado, la estructura martensítica es más densa y homogénea. En las micrografías a x20, se observa una saturación de listones martensíticos que eliminan cualquier rastro de la ferrita original.

Revenido



Revenido

- **Microestructura:** Martensita revenida con precipitación de microaleantes.
- **Análisis:** Se observa una estructura con mayor contraste y relieve. El proceso de revenido en el X70 no solo relaja las tensiones de la martensita, sino que permite la precipitación secundaria de carburos de los elementos microaleantes.
- **Observación:** La textura se ve más "granular" o punteada que en el estado templado, lo cual es indicativo de la formación de estos precipitados finos que ayudan a mantener un límite elástico elevado incluso después del tratamiento térmico.

Característica	Acero X52	Acero X70
Tamaño de Grano	Grueso / Medio	Muy Fino (Refinado)
Fase de Llegada	Ferrita + Perlita	Ferrita Acicular / Poligonal
Morfología de Temple	Martensita de listones	Martensita densa de bajo C

Característica	Acero X52	Acero X70
Efecto del Revenido	Ablandamiento y ductilidad	Tenacidad con retención de dureza

Discusión de resultados

Los resultados obtenidos mediante caracterización microestructural, espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y curvas de polarización permitieron establecer una relación directa entre la condición metalúrgica de los aceros API 5L X52 y API 5L X70 y su comportamiento frente al biodiésel de soya. Las transformaciones microestructurales inducidas por los tratamientos térmicos modificaron significativamente la respuesta electroquímica de los materiales, evidenciando que la resistencia a la corrosión no depende únicamente de las propiedades mecánicas, sino también de la estabilidad microestructural desarrollada durante el procesamiento. La caracterización metalográfica mostró que las muestras en condición de suministro conservaron una microestructura compuesta principalmente por ferrita y perlita, mientras que el tratamiento de temple promovió la formación de martensita y el revenido generó una estructura de martensita revenida con precipitación de carburos finos. Estas modificaciones produjeron cambios importantes en la distribución de fases, densidad de defectos y tensiones residuales, factores que influyen directamente en los procesos electroquímicos que ocurren en la superficie del material. Los resultados de EIS demostraron que las muestras en condición de suministro presentaron la mayor resistencia a la transferencia de carga, reflejada en diámetros de semicírculo superiores en los diagramas de Nyquist y mayores valores de impedancia a bajas frecuencias en los diagramas de Bode. Asimismo, los ángulos de fase observados indicaron un comportamiento más estable y una menor reactividad superficial frente al biodiésel. En contraste, las muestras sometidas a temple y revenido mostraron una disminución de estos parámetros, evidenciando una mayor susceptibilidad al deterioro electroquímico. Las curvas de polarización potenciodinámica confirmaron la tendencia observada mediante EIS. Las muestras con menor densidad de corriente de corrosión presentaron menores velocidades de deterioro, mientras que aquellas con microestructuras transformadas exhibieron una actividad electroquímica más elevada. La concordancia entre ambas técnicas permitió validar la influencia de la microestructura sobre los mecanismos de corrosión desarrollados en el medio de estudio. La correlación entre microestructura y comportamiento electroquímico indica que la formación de martensita y la presencia de heterogeneidades microestructurales favorecen la aparición de diferencias locales de potencial, promoviendo la formación de microceldas galvánicas y aumentando la susceptibilidad a fenómenos de corrosión localizada. Por el contrario, las estructuras ferrítico-perlíticas presentes en las muestras de control mostraron una distribución más homogénea de fases, favoreciendo una respuesta electroquímica más uniforme y estable durante la exposición al biodiésel.

La comparación entre los aceros API 5L X52 y API 5L X70 permitió identificar diferencias asociadas a su composición química y nivel de refinamiento microestructural. El acero X70 presentó una estructura más refinada, caracterizada por ferrita acicular y una distribución más homogénea de los constituyentes microestructurales, resultado de su procesamiento termomecánico y del uso de microaleantes. Esta condición proporciona mejores propiedades mecánicas y una mayor integridad estructural para aplicaciones de transporte de combustibles. Sin embargo, los resultados obtenidos indican que, independientemente del grado de acero, la condición de suministro mantuvo el mejor desempeño frente al biodiésel, superando a las condiciones tratadas térmicamente. Los mecanismos de degradación identificados corresponden principalmente a corrosión uniforme y corrosión localizada por picadura, favorecidas por la presencia de humedad, compuestos ácidos y productos de oxidación derivados del biodiésel. Estos factores incrementan la agresividad del medio y pueden comprometer la integridad de tuberías y sistemas de almacenamiento cuando las condiciones microestructurales del material favorecen el desarrollo de procesos corrosivos. Los resultados obtenidos demuestran que los tratamientos térmicos convencionales de temple y revenido no representan una estrategia efectiva para incrementar la resistencia a la corrosión de los aceros API 5L en biodiésel de soya. Aunque dichos tratamientos mejoran determinadas propiedades mecánicas, generan modificaciones microestructurales que reducen la estabilidad electroquímica del material frente a este medio biogénico. Desde una perspectiva de ingeniería ambiental y sustentabilidad, este hallazgo adquiere especial relevancia, ya que demuestra que los aceros en condición de suministro pueden emplearse de manera más eficiente para el transporte y almacenamiento de biodiésel, eliminando la necesidad de tratamientos térmicos adicionales. Esto permite reducir el consumo energético asociado a procesos industriales, disminuir costos operativos y minimizar el impacto ambiental relacionado con la fabricación y acondicionamiento de infraestructura para combustibles renovables.

En conjunto, los resultados confirman que la selección adecuada de la condición microestructural del acero constituye un factor determinante para garantizar la integridad de la infraestructura energética durante la transición hacia combustibles más sustentables, aportando criterios técnicos que favorecen tanto la confiabilidad operativa como la protección ambiental.

Conclusiones y contribución de la investigación

Los resultados obtenidos mediante Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS) y la caracterización microestructural permitieron evaluar la influencia de los tratamientos térmicos sobre el comportamiento corrosivo de los aceros empleados en sistemas de transporte y almacenamiento de biodiésel. Los diagramas de Nyquist mostraron que las muestras en estado de suministro presentaron los mayores valores de resistencia a la transferencia de carga, mientras que los diagramas de Bode evidenciaron ángulos de fase más cercanos a 90° en un intervalo más amplio de frecuencias, indicando una superficie más estable y menos reactiva frente al medio corrosivo. Por el contrario, las muestras sometidas a temple y revenido exhibieron una disminución en dichos parámetros electroquímicos, reflejando una mayor susceptibilidad a la corrosión.

Estos hallazgos demuestran que los tratamientos térmicos convencionales no mejoran la resistencia a la corrosión de los aceros evaluados cuando se encuentran en contacto con biodiésel de soya. La

microestructura ferrita-perlita presente en el material en condición de suministro mostró un desempeño superior respecto a las microestructuras generadas por temple y revenido, confirmando que la modificación térmica del material no constituye una estrategia efectiva para incrementar su durabilidad en este tipo de medio biogénico.

La investigación aporta evidencia experimental sobre la relación entre la microestructura de los aceros y su comportamiento electroquímico en presencia de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), contribuyendo al entendimiento de los mecanismos de degradación asociados al uso de combustibles renovables. Asimismo, los resultados obtenidos permiten establecer criterios técnicos para la selección de materiales destinados a la infraestructura de transporte y almacenamiento de biodiésel, proporcionando información útil para la toma de decisiones dentro del sector energético.

Desde la perspectiva de la sustentabilidad y la ecoeficiencia, la validación del acero en su estado de suministro representa una ventaja significativa, ya que elimina la necesidad de aplicar tratamientos térmicos adicionales que demandan elevados consumos energéticos. Esto se traduce en una reducción de la huella ambiental asociada a la fabricación y acondicionamiento de componentes metálicos, además de favorecer el aprovechamiento de la infraestructura existente sin requerir modificaciones complejas o procesos adicionales de transformación.

De igual forma, la identificación de la condición metalúrgica con mayor resistencia a la corrosión contribuye a prolongar la vida útil de tuberías y sistemas de almacenamiento, disminuyendo la generación de residuos metálicos y la demanda de materias primas derivadas de actividades extractivas. Este aspecto adquiere especial relevancia dentro del contexto de la transición energética, donde la sostenibilidad de los materiales resulta tan importante como la sostenibilidad de los combustibles utilizados.

Los resultados obtenidos también tienen implicaciones directas en la prevención de riesgos ambientales y operativos. Considerando que el biodiésel presenta características como higroscopicidad, susceptibilidad a la oxidación y formación de compuestos ácidos que favorecen los procesos corrosivos, la correcta selección del material permite minimizar la probabilidad de fallas estructurales, fugas y derrames que puedan afectar ecosistemas, suelos y cuerpos de agua. En consecuencia, el estudio aporta herramientas para fortalecer la seguridad operativa de instalaciones destinadas al manejo de combustibles renovables.

Finalmente, esta investigación establece una base para el desarrollo de futuras estrategias de protección anticorrosiva orientadas a medios biogénicos. Al demostrarse que la modificación térmica del acero no proporciona beneficios significativos frente al biodiésel, se abre la posibilidad de enfocar esfuerzos en alternativas más sustentables, como el empleo de inhibidores verdes, recubrimientos especializados y sistemas avanzados de monitoreo electroquímico que permitan incrementar la confiabilidad y durabilidad de la infraestructura energética.

En términos generales, la investigación cumplió su objetivo al demostrar que los tratamientos térmicos convencionales no representan una solución eficaz para mejorar la resistencia a la corrosión de los aceros estudiados en biodiésel de soya. Por el contrario, el acero en condición de suministro se identificó como la alternativa técnica, económica y ambientalmente más viable, al ofrecer un mejor desempeño electroquímico, reducir el consumo energético asociado a procesos industriales

adicionales y contribuir a una operación más segura y sustentable de los sistemas de transporte y almacenamiento de biocombustibles.

Bibliografías y Fuentes Consultadas

- [1] Agarwal, A. K. (2007). Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33(3), 233–271. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2006.08.003>
- [2] Demirbas, A. (2010). *Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines*. Springer.
- [3] Aleación del acero | Materiales de uso técnico. (s. f.). https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/424_aleacin_del_acero.html.



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 SECIHTI
SGI Certificada en las Normas ISO 9001:2015, ISO 21001:2018 y NMX-R-025-SCFI-2015

FORMATO T-2

NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN
Cuernavaca, Mor., a 05 de junio del 2026.

DR. ALVARO TORRES ISLAS
DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA
DR. JESÚS MARIO COLÍN DE LA CRUZ
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO
DR. ADRIÁN 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 Emmanuel Hurtado Ramirez, titulado: ESTUDIO ELECTROQUÍMICO DEL EFECTO DEL BIODIESEL EN CONTACTO CON ACERO DE TUBERÍA PARA SU TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO, realizada bajo la dirección del Dr. Álvaro Torres Islas y la Co-dirección del Dr. Horacio Martínez Valencia, del Programa Educativo de la 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

DRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

DRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA 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. ALVARO TORRES ISLAS	APROBADO	
DR. HORACIO MARTÍNEZ VALENCIA	APROBADO	
DR. JESÚS MARIO COLÍN DE LA CRUZ	APROBADO	
DR. ARTURO MOLINA OCAMPO	APROBADO	
DR. ADRIÁN DEL POZO MARES	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2026-06-08 10:47:30 | FIRMANTE

TyPqOiR+04nnd+CK4KfKmFXb9fgXY7G+hosx257jXfOyFYIMMjTFZGnrqYghElKVTjF3elBMAtzmTNCSCaJ7Rtgur0eKGTsMiNR9uJV7HHL/ydONLS5E50U+s03C3Ztm48+u4jzfn+Mx5FbKHgWRfUZHAIgeZv3ooCBxqnU7TYM2OBI3Q8s2ggEAncxaVnYBjmOf9nm0GW4V8RAEIG0MKp8KeKvog5QIPm0snOThRkBe2fFsUm5BFMWRxBLY3Tm9DQhMk4BfQVIKtJ2uVyS4Zne94UR3UW1ZC/Qp+kFhN/jR3P+v8klOylsvLExkdYU8m/PDutia8Ty9PzNr6TSYg==

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



74185DO2E

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/GYXVM5iNRPKha4s4tJ2iVTS13bp3vGKB>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

HORACIO MARTINEZ VALENCIA | Fecha:2026-06-09 10:29:57 | FIRMANTE

AwQd29VufOKPrB+MiBx58V04G18aeiAl6brZkVfS7KWtkMbrrCi1WD6oyNAAteSPP1MsK+on/cAAASpl+Xq3kd40vgzK7kAi6iYlpgOCzFq3XVs/0x9O9IXYPxm036ZPpnEyo97oPgZBJ4L+y1sXmY2HYrLfSaB0/vG12bJeC9qGjFSj9+4kQkXwQq0YrSopDK5Q2E0spFWHchashqjNg1qBtxJ1ZueBUX4PVG8wM2Z5jr4DGhCDu2fmygNu3sEHQZ5SWTuPqN7AX/8L37sG8cxnBG5EmZ7yUqhxQN+DmNzpz4DXrSGxBrA83FEj9J9QTrdZ8Ll/sXOaWeeUK8RQw==

ALVARO TORRES ISLAS | Fecha:2026-06-09 11:53:41 | FIRMANTE

PUmqqMgk0vRC5EkxMk5lyf4l0l5neiPK3fGtUCpGkoFPlztvFPNfvrPxYuBiyhsTxCCqC8BWiZUKTcThM7kL29MXFt06xOcxXx10xPnZwcqr+IjbVq2rhh5oJ5Pzv9jB8bho197NgnPQc26TEifHivvPtyDJh+QFwlvS3smntcvmaAoHqDMAoXwipo3waVI7zB2zQkfSoe/sUmGoufs7WKck9pj8U7Htj8/yf8F/Uc/Pk/cCFHFZ4ZKgsAjd898pAvLGkkLvkECIAedUbfKNZJ87NFWb7nE0kccbMXxM3pkUalefwi5u+6QdMLEqbl81W1NKtdifbKlgl6tAw==

ADRIAN DEL POZO MARES | Fecha:2026-06-09 12:33:03 | FIRMANTE

taSVkCH80DZLiX6wKdTagb0/rrZhl7c6yy6czLIYpgZ4ia+cer0l8FolXI/fMa4GldlOpYzDk1r+nPx17NZbY3A0t1o7gTz/jaQGM/3yZfgPWXXVE4zUzbLqH3BXmq4xlkeL9+aU7NAOhnlNMboThMAlmgmcks19pNS2fp1uhqTZILGMM3YWOqVQwREcm19c0laCABBryVaAK93q0k5R6PDG+yxTJoEWODpiAjlvt/PvZoCJckHxVpGxxF1EmEFMqB3tm77MLj8iY6syeg/z0H9zzNf9pKbwg1tD3GjLroeQm9k57VJqQTVaKNVKIRaefENTV9DQSRUKA9HYq8f10AQ==

JESUS MARIO COLIN DE LA CRUZ | Fecha:2026-06-09 13:22:17 | FIRMANTE

mW7GsMvhl1Q5krjMXI4BvQ19ntGZpaaRTzen8fAduhEtd6l5QD8noSXmvcnHma+gLZ4dT0XxE4/5pqD9LTiD1omevUuYD2BtelJiEmx6nG1U7HtlCnNnXdQRjv7ksLEj9YaLhkmHj7QW6Uiih7GrSsPGwNoZh7TuVgQqhXPUANfgS4FSfb+WEhW1UA8IDIPZCic3ntr0UjdXeDOr4ooShhjSRxkdmvt4QesDCrqacQSTZt7vVruAosCPM3ZTYBaXRVyj24VQpFsrhOBMgFy2D7nR6V0aMmopJghQBLgZ1XkKpJf+Hd5Gy3jAkQ4GjivNO83EmqUdFaliroKXMiGw==

ARTURO MOLINA OCAMPO | Fecha:2026-06-09 14:02:25 | FIRMANTE

pDVVV8S3O8GKginZx9dC0Ryfq3uHpe+g3OBUJ2VVNuyZ26VNdX0qB6kRM3eB6jQFCqu01G1CHrYC8Apf6QujYmUkWzHzD+aed90Dvy1owQALPq+GcA+Kq1EJwyMDHPth1pe4DW6CXKkoJrbw11DvTCgyU+wRGoZ7uzv5oww5Vnbvj1B6QbzAqdWV/E1xFhOdGjKkvrnftYnEyS//n2jm/oeY0K5NcNpNOcwWSuiBZqnvqRqzFISL77pF15Aq5qx2OtlN6aohQd8VLMyCp4qbQOCd8B9DXSKp2wNLwCexcjLrlwzBl81ZZvonldg4n1CgPbK47yGgTfQ/spc6co+r0g==

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



5wWPTYoe6

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/HlxD09K9i3iWycMUK8POXGEVMDJ2QTL8>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029