

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Determinación y clasificación dinámica de corrosión en la industria
aeronáutica a partir del ruido electroquímico mediante algoritmos PELT
y modelos ocultos de Markov**

**POR
CYNTHIA MARTÍNEZ RAMOS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA AERONÁUTICA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

MAYO, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**Determinación y clasificación dinámica de corrosión en la industria
aeronáutica a partir del ruido electroquímico mediante algoritmos PELT
y modelos ocultos de Markov**

**POR
CYNTHIA MARTÍNEZ RAMOS**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA AERONÁUTICA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

**DIRECTOR DE TESIS
DR. FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN**

**CO-DIRECTOR
DRA. CITLALLI GAONA TIBURCIO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Determinación y clasificación dinámica de corrosión en la industria aeronáutica a partir del ruido electroquímico mediante algoritmos PELT y modelos ocultos de Markovs", realizada por la estudiante Cynthia Martínez Ramos, con número de matrícula 1943577, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ingeniería Aeronáutica con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Facundo Almeraya Calderón
Director

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio
Co-director

Dr. Francisco Humberto Estupiñán López
Revisor

Dr. José Ángel Cabral Miramontes
Revisor

Dr. Gerardo Fajardo San Miguel
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 563512

Acta Núm. 4513

Ciudad Universitaria, a Julio 2025.

Contenido

Capítulo 1. Introducción	5
<i>1.1 Antecedentes</i>	<i>5</i>
<i>1.2 Situación actual y Desafíos</i>	<i>11</i>
<i>1.3 Objetivos</i>	<i>12</i>
<i>1.4 Hipótesis</i>	<i>13</i>
Capítulo 2. Marco Teórico	14
<i>2.1 Materiales Aeronáuticos</i>	<i>14</i>
<i>2.1.1 Aluminio</i>	<i>15</i>
<i>2.1.2 Titanio</i>	<i>19</i>
<i>2.1.3 Acero</i>	<i>20</i>
<i>2.2 Corrosión</i>	<i>23</i>
<i>2.2.1 Mecanismos de corrosión</i>	<i>25</i>
<i>2.3 Ruido Electroquímico: Herramienta para la Detección de Corrosión</i>	<i>32</i>
<i>2.3.1 Interpretación de las señales</i>	<i>34</i>
<i>2.4 Algoritmo PELT</i>	<i>40</i>
<i>2.5 Modelos Ocultos de Markov</i>	<i>42</i>
<i>2.5.1 Fundamentos matemáticos</i>	<i>45</i>
Capítulo 3. Metodología	54
<i>3.1 - Recolección de datos y Criterio de selección</i>	<i>55</i>
<i>3.2 - Desarrollo computacional</i>	<i>56</i>
<i>3.3 - Segmentación y clasificación</i>	<i>57</i>
<i>3.4 - Estimación de Parámetros: Iniciación, Transición y Emisión</i>	<i>59</i>
Capítulo 4. Resultados y Discusión	62
<i>4.1 Señales Individuales</i>	<i>62</i>
<i>4.1.2 Señales de baja variabilidad</i>	<i>85</i>
<i>4.2 Señales Múltiples</i>	<i>93</i>
Capítulo 5. Conclusiones y observaciones	99
Referencias bibliográficas	101

Capítulo 1. Introducción

1.1 Antecedentes

El proceso de corrosión es una constante inamovible, tan inevitable como el paso del tiempo, la llegada del invierno, o el fluir incesante de un manantial. La corrosión, como estos fenómenos, es así, paciente y tenaz. Este es un proceso natural, en el cual los materiales metálicos, o propiamente aleaciones buscan retornar a el estado de energía más bajo posible en un intento de alcanzar la estabilidad, a revertirse a su estado mineral original antes de haber sido trabajado y forjado por los seres humanos [1].

La corrosión se condecora con muchas definiciones, sin embargo, regresando a la etimología de la palabra, cuyo origen en latín “*corrosum*” se refiere a la acción y efecto de corroer, de los desgastes paulatinos. Sin embargo, para estándares modernos, se sabe que este proceso conlleva mecanismos más complejos y específicos cuyas características no pueden ser apropiadamente condensadas por la palabra “desgaste”, reservada primordialmente para fenómenos mecánicos. Una definición más apropiada sería “*el deterioro y reducción de un metal a causa de una reacción con el medio ambiente*” [2]. Existen múltiples ejemplos estribando en nuestros alrededores; tuberías antiguas, herramientas olvidadas, automóviles descuidados, o bien, situados en nuestros patios o cocheras en la forma del característico asador norteno cuyas rendijas deben de ser talladas y limpiadas para eliminar la herrumbre generada en su superficie a causa de la exposición al agua y oxígeno.

La primera consideración que se debe de tener en mente cuando lidiamos con corrosión se trata de la determinación del medio en el cual se encuentra un material, ya que este factor tendrá una influencia directa en la reacción analizada, y sin identificarla de manera certera no podremos continuar con evaluarla o con tomar medidas preventivas necesarias [2,3] . Algunos de estos factores básicos se tratan del oxígeno presente en el aire, el agua-correspondiente a la humedad en el aire, la lluvia, o bien ríos o mares; y considerando ahora el macro de los ambientes, en zonas industriales o metrópolis donde el índice de contaminación es más elevado, podremos encontrar en el aire la presencia de H_2SO_4 , HNO_3 , O_3 , hidrocarburos variados, etc [3,4,5]. Los cuales tienen un fuerte impacto en el tiempo de vida de los metales. Considerando ahora un ambiente marítimo, el aire tendrá una presencia mayor de NaCl, lo cual acelera la corrosión en los materiales. Otra faceta para considerar es el ambiente directo al cual se está expuesto un componente o material, es decir, el definir que tipo de sustancias están en contacto con nuestro componente, por ejemplo, si forma parte del sistema de abastecimiento de agua y drenaje sus tuberías tendrán contacto directo con aguas negras, las cuales constan de una amalgamación de desechos orgánicos, inorgánicos, aceites, químicos, etc. Que propiciarán un ambiente agresivo contra la tubería. Otro aspecto que podemos ejemplificar se trata de los escapes de automóviles, los cuales están expuestos

constantemente a una temperatura considerable y a gases de dióxido y monóxido de carbono, etc. Los cuales aceleran el proceso corrosivo.

Analizando el impacto que representa la corrosión en el sector privado y público del país tomando un enfoque económico, de acuerdo con el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares en un estudio llevado a cabo en el 2022 [6], se estima que el costo generado a causa de corrosión equivale al 3% del Producto Interno Bruto (PIB) del país [7] resaltando la importancia de la investigación para el desarrollo de tecnología en materiales. Considerando el año de publicación de este estudio el PIB en el 2022 fue de 1.47 billones de dólares USD, costándole a nuestra nación una cantidad aproximada de \$44,000 millones de dólares USD, representando un golpe duro para el crecimiento económico del país. En términos globales, de acuerdo con el estudio IMPACT (Medidas internacionales de prevención, aplicación, y economía de las tecnologías de corrosión) llevado a cabo por la *National Association of Corrosion Engineers* (NACE), Se estima que el costo global de la corrosión es de \$2,505 billones de dólares, lo que equivale al 3,4% del PIB mundial (2013) [8].

Las consideraciones económicas tanto nacionales como globales enfatizan la necesidad de la industria y las naciones el desarrollo de metodologías de prevención para alargar el promedio de vida útil de los diversos componentes y estructuras los cuales, al no ser propiamente evaluados, la corrosión se desarrolla, afectando sus condiciones de servicio, características mecánicas, y requiriendo de reemplazos antes del tiempo programado, siendo un gasto fuerte para cualquier industria.

Factores de seguridad juegan un rol enorme en la detección y mantenimiento de la corrosión, siendo de particular preocupación dentro de la industria aeronáutica, ya que el transporte aéreo simboliza un componente crítico en la movilidad global, tanto de personas como bienes. En el país, la Norma Oficial Mexicana NOM-060-SCT3-2011[9], se encarga de establecer las especificaciones para conformar un sistema de identificación de defectos y fallas ocurridas a las aeronaves, aspecto crucial para las operaciones aéreas de todos los concesionarios, permisionarios, y operadores aéreos nacionales que efectúen operaciones dentro del territorio nacional y en el extranjero. En el contenido de esta norma se dictamina la obligación de crear y mantener un sistema de identificación de defectos y fallas que se generen en los sistemas y/o componentes de las aeronaves que operan, y que afecten sus condiciones de aeronavegabilidad.

Dentro de las fallas consideradas de acuerdo al Apartado 5.4 de la ya mencionada norma, se hace un hincapié en las fallas consideradas como consecuencias de defectos de diseño, mal funcionamiento y otros sucesos que tengan o puedan tener efectos adversos sobre el mantenimiento de la aeronavegabilidad, así como aquellas que se detecten durante la aplicación de los servicios de rutina y atención de discrepancias reportadas por las tripulaciones de vuelo, dentro de las cuales en el Apartado 5.4.14 "*Daños, deformaciones permanentes o corrosión de estructura de aeronaves, mayores al máximo permitido por la entidad responsable del diseño de tipo o por la Autoridad Aeronáutica.*" [9] Demostrando así

la inquietud que la presencia de la corrosión genera en el mantenimiento de la aeronavegabilidad.

Dentro de la misma norma se hace debida mención a la necesidad del desarrollo de Programas de Control y Prevención de la Corrosión (CPCP); Este programa apareció por primera vez en una institución de regulación aeronáutica en 1993 por parte de la *Federal Aviation Administration* (FAA) en 1993 en la forma de la ya expirada orden 8300.12 “*Corrosion prevention and control programs*” [10] en la cual se establecieron los requerimientos para operadores y las subsecuentes técnicas de inspección sobre las cuales son responsables. Dentro de estas técnicas se estableció un sistema de “niveles” de corrosión detectable en una aeronave para catalogar su severidad y las posibles consecuencias en la aeronavegabilidad. Esta clasificatoria es de carácter cualitativo:

- Corrosión Nivel 1: Daño presentado entre inspecciones sucesivas reclusos a un área específica, el cuál es de carácter superficial y puede ser reparado por medio de pulido acatando con los límites permitidos y establecidos por el fabricante de la aeronave en su debido manual de reparaciones estructurales (SRM), boletín de servicio, etc.
- Corrosión Nivel 2: Daño presentado dentro inspecciones sucesivas cuya reparación sobrepasa los límites permitidos por el fabricante, requiriendo entonces de una reparación sustancial o en su defecto, la sustitución total o parcial de un elemento estructural principal, en concordancia con lo establecido por el fabricante de la aeronave en el SRM.
- Corrosión Nivel 3: Daño encontrado durante la primera o posteriores inspecciones evaluada como un riesgo o preocupación que atentan contra la aeronavegabilidad de la aeronave, necesitando de atención rápida y acciones inmediatas.

El catalizador para la creación de este programa fue el accidente del vuelo 243 de Aloha airlines el 28 de abril de 1988, en el cual de acuerdo con el reporte de accidente NTSB/AAR-89/03 [11], la aeronave-un Boeing 737-200 sufrió una descompresión explosiva y fallo estructural volando a 24,000 pies de altura. El recuento de los hechos describe qué una porción del fuselaje superior-frontal de la aeronave se desprendió, cobrando la vida de un sobrecargo quien fue expulsada de la aeronave, y dejando a 7 pasajeros y un sobre cargo con heridas severas. Los resultados de la investigación revelaron que la causa había sido negligencia en el programa de mantenimiento y por parte de la comitiva administrativa de la aerolínea que impidió la correcta identificación del desprendimiento, daño por fatiga, y corrosión en las uniones de los paneles del fuselaje.

La orden previamente mencionada fue reemplazada por la actual Circular de Asesoramiento (AC) no. 43-4B de la FAA [12] la cual rige los lineamientos y requerimientos para la inspección y mantenimiento de corrosión cuyo contenido ofrece una descripción exhaustiva acerca de los mecanismos de corrosión, causas y áreas más susceptibles a la corrosión en una

aeronave, las técnicas de remoción y mantenimiento, entre otros recursos para el desarrollo de un programa robusto para enfrentar la corrosión, mencionando también que estos deben de ser complementados por los manuales y metodologías establecidos por las compañías fabricantes de aeronaves, quienes al igual que los operadores, tienen la responsabilidad de asegurar la seguridad de operaciones; los responsables de la aeronave deberán de acatar las normativas nacional e internacionales así como las circulares, manuales adicionales, entre otros recursos para generar su CPCP.

Enfocándose propiamente en la detección de corrosión en las aeronaves, el uso de técnicas no-destructivas e in-situ es imperativo para mantenerse vigentes con las necesidades de la industria, principalmente el tiempo de análisis y resultados. En el capítulo 5 de la previamente mencionada AC podemos encontrar múltiples técnicas implementadas y recomendadas para detección de corrosión: La primera técnica mencionada se trata de la inspección visual, la cual, como su nombre lo indica, se trata de llevar a cabo una evaluación visual, empleando instrumentación sencilla como lupas, lámparas, reglas, y/o cámaras para documentar cualquier hallazgo en la superficie de la aeronave. Esta metodología, mientras práctica carece de la capacidad de determinar velocidades de corrosión, profundidad, tipo de mecanismo, etc. La segunda estirpe de métodos caracteriza de manera eficaz estos aspectos avanzados por medio de técnicas como líquidos penetrantes, partículas magnéticas, corriente de Eddy, rayos X, ultrasonido y emisión acústica son algunos de los mencionados.

Los primeros tres pueden caracterizar las zonas donde agrietamientos, picaduras, o defectos no son fácilmente vistos con la inspección visual, permitiéndonos determinar el tamaño, locación, punto de origen y severidad [13]. La desventaja que poseen es que su tiempo de uso y procesamiento de resultados puede ser algo extenso, ya que requieren de un preparamiento de las superficies particular, la aplicación de los elementos variados según su técnica, la medición propiamente y el posterior lavado de superficie y remoción de elementos para luego procesar los datos. Como mínimo se demandan 5 horas y en casos más tardados un día entero. Aunado a esto, técnicas como corrientes magnéticas de Eddy pueden tener efectos negativos en la aeronavegabilidad en caso de no ser propiamente removidas, pudiendo interferir con el sistema de telecomunicaciones, o generando concentraciones de partículas metálicas en alguna zona, propiciando el desgaste. Por su parte diagnósticos como ondas acústicas o rayos X permiten la observación a profundidad de la estructura en búsqueda de la presencia de agrietamientos o corrosión localizada. Sin embargo, estas no ayudan a emitir un juicio sobre la predicción de crecimiento y/o la velocidad de corrosión.

Por lo que la técnica de Ruido Electroquímico (RE) se utiliza como una herramienta complementaria no-destructiva en conjunto con las técnicas tradicionales de monitoreo, permitiendo mejorar la precisión del diagnóstico y así generar sistemas más robustos para la confirmación de los resultados. Esta técnica consiste en exponer las muestras de interés, o electrodo de trabajo, en un medio electrolítico que simule un ambiente específico en conjunto con un electrodo de referencia cuyo potencial será el punto comparativo para el electrodo de

trabajo, y adicionalmente se emplea un electrodo auxiliar que suele ser una malla de platino o bien otro material conductor inerte para cerrar el circuito, formando así una celda electroquímica [14,15]. A partir de su montaje, se miden las fluctuaciones de potencial y voltaje que ocurren de manera natural y espontánea en la superficie del material conforme este reacciona con el electrolito. En promedio estas pruebas duran 1024 segundos.

La normativa que rige la aplicación del RE se basa en el estándar de ASTM G199 [16], la cual establece los procedimientos para la aplicación y monitoreo de la corrosión mediante ruido electroquímico (RE), tanto en entornos de laboratorio como en condiciones “in situ”. Esta normativa se enfoca en sistemas donde los procesos internos o las condiciones ambientales externas pueden favorecer el desarrollo de fenómenos corrosivos. Además, cubre situaciones en las que se emplean inhibidores para el control de la corrosión, ofreciendo una metodología para verificar su eficacia. La técnica permite obtener información precisa sobre la tasa de corrosión y los mecanismos de ataque presentes de manera rápida y eficiente, facilitando así la toma de decisiones oportunas para mitigar los riesgos asociados y optimizar la gestión de la corrosión en equipos y sistemas.

Esta técnica es empleada en un número de industrias, por ejemplo, en industrias como gas y petróleo con trabajos de investigación publicados en conjunto con empresas como PEMEX [17,18], Shell Global [19], entre otras [20,21]. También se encuentra la aplicación en la industria nuclear [22,23] las cuales han incrementado con los años, cimentando así la relevancia de la técnica y su fiabilidad para análisis in-situ. El uso de la técnica RE y la presencia de normativas aplicables en diversas industrias críticas para el funcionamiento de nuestra sociedad reflejan la necesidad de la implementación de procesos y metodologías rigurosas que garanticen la seguridad operativa y protección del medio ambiente, ya que estas industrias enfrentan riesgos catastróficos de presentarse fallas estructurales.

Los antecedentes en la industria aeronáutica son extensos enfocándose primordialmente en la evaluación de recubrimientos de vanguardia con aplicaciones aeronáuticas [24,25,26], así como en la detección de corrosión localizada [27] entre otras aplicaciones de interés como lo es el desarrollo de sensores para aeronaves utilizando ruido electroquímico [28].

A pesar de su presencia en la literatura científica y su potencial demostrado, el ruido electroquímico aún no se ha consolidado como una herramienta común en el mantenimiento de aeronaves. Esto se debe, en gran parte, a los desafíos que implica la interpretación precisa de los datos obtenidos. Facilitar esta interpretación permitiría integrar su uso de forma más efectiva en los procesos de mantenimiento, optimizando la detección de corrosión.

Aunque la técnica de ruido electroquímico (RE) es relativamente fácil de implementar, la dificultad radica en el procesamiento de los datos. Este análisis se realiza en dos dominios principales: el dominio del tiempo, donde se obtienen métricas estadísticas, y el dominio de la frecuencia, que emplea técnicas más determinísticas y exige un conocimiento matemático profundo y estructurado. Otro aspecto de la técnica es que los resultados indicaran la

velocidad de corrosión y el mecanismo dominante de la señal. Sin embargo, no se tendrá un entendimiento claro del proceso que ocurrió que nos lleve a este punto. Y si bien, se podrá realizar análisis interpretativos de las señales de manera visual, estos son de carácter empírico, careciendo de métricas establecidas.

Para abordar este tópico se introduce al ruido electroquímico dos algoritmos importantes como contribución principal de este trabajo: el algoritmo de tiempo lineal exacto purgado (PELT), y el algoritmo de modelos ocultos de Markov (HMM), los cuales trabajando en conjunto, se generará una segmentación de la señal en base a los cambios dinámicos que se presenten en ella, y posteriormente con el HMM los datos de la señal serán debidamente categorizados según su mecanismo de corrosión a lo largo de la evolución de tiempo de la señal, dando así una visión concreta de lo ocurrido.

En la actualidad se carece de trabajos con este enfoque en el área de corrosión; trabajos como los de F. Caleyó (2009) empleando cadenas de Markov para modelar el crecimiento de la corrosión localizada en tuberías bajo tierra en su exterior, Wei-Ping Zhang (2021) quien modeló la evolución de la corrosión en barras de acero situadas en estructuras de hormigón armado por medio de cadenas de Markov, V. Venkatesu (2017) con el modelado matemático y análisis con cadenas de Markov para la propagación en tuberías para la predicción de falla, y E. A. Dizaj (2021) desarrollando un modelo basado en cadenas de Markov para la evaluación de la vulnerabilidad estructural de puentes de hormigón armado dañados por corrosión. Sin embargo, no existen precedentes para la implementación de modelos ocultos de Markov en corrosión, o en señales de ruido electroquímico en general. Cabe hacer la distinción que mientras las cadenas de Markov regulares modelan transiciones directas entre estados observables, el HMM nos abre las puertas al poder trabajar con señales en las cuales sus estados no son directamente observables, es decir, están ocultos, haciendo que su utilidad y aplicabilidad con el ruido electroquímico se realce, abriendo un abanico de posibilidades para mejorar el monitoreo y facilitar la interpretación de las señales obtenidas.

1.2 Situación actual y Desafíos

La industria aeronáutica se enfrenta a una amplia gama de condiciones extremas: desde temperaturas bajo cero durante el vuelo, hasta más de 100°C en las turbinas [12]; además de la exposición a gases industriales, ambientes marinos y esfuerzos constantes por flexión, compresión e impactos. Estas condiciones aceleran la degradación de componentes críticos, como el fuselaje, superficies de control, tren de aterrizaje, motor, y la estructura interna de la aeronave. Sin un control riguroso y un mantenimiento continuo, el deterioro de estas partes podría tener consecuencias catastróficas.

Uno de los mayores retos actuales en la industria aeronáutica es la corrosión, exacerbada por las exigentes condiciones de servicio. Su presencia y desarrollo son inevitables, pero es nuestra responsabilidad controlar y minimizar su impacto. Para ello, contamos con sistemas regulados por entidades federales e internacionales para la identificación, mitigación, reparación y, cuando es necesario, reemplazo de componentes. La prolongación de vida útil de las aeronaves es una prioridad para aerolíneas, concesionarios y permisionarios, pero para tomar acciones preventivas y correctivas, es indispensable emplear herramientas de detección eficaces, ya que muchos mecanismos de corrosión no son visibles en las primeras etapas, sino hasta que el daño es crítico.

Por ello, detectar el tipo de corrosión presente y su cinética es crucial para la comunidad aeronáutica. El desarrollo de herramientas innovadoras que respondan a las necesidades del sector es esencial para obtener resultados de manera rápida, segura y precisa, asegurando así la integridad y eficiencia de los procesos de mantenimiento.

Adoptando este contexto a los requerimientos de la industria aeronáutica, es posible integrar la técnica de Ruido Electroquímico (RE) con la vertiente de la aplicación de los algoritmos de segmentación PELT y modelos ocultos de Markov HMM para obtener resultados certeros que evidencien la evolución de las señales y su comportamiento al paso del tiempo.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este proyecto se centra en el desarrollo de un programa que realice la integración de las señales de corriente de ruido electroquímico RE por medio de los algoritmos de segmentación PELT y modelos ocultos de Markov HMM con el propósito de facilitar la clasificación dinámica de los mecanismos de corrosión presentes y ofrecer una interpretación clara, cuantificable y visual de las señales, permitiendo la simplificación de su aplicación en el mantenimiento preventivo de aeronaves.

Los objetivos en particular competen:

- Implementar el algoritmo de segmentación PELT para identificar los cambios dinámicos en las señales de RE, segmentando los periodos relevantes a lo largo del tiempo.
- Desarrollar un modelo oculto de Markov HMM para clasificar los segmentos identificados según los tipos de corrosión y pasivación, permitiendo así un análisis preciso de su evolución.
- Evaluar y validar los resultados obtenidos mediante comparaciones con métodos tradicionales de cálculos en dominio de tiempo, frecuencia y por medio de metalografías.
- Optimizar la interpretación de las señales de RE para detectar la presencia de corrosión en etapas tempranas, reduciendo la posibilidad de daños estructurales no detectados en componentes críticos de aeronaves.
- Proveer un marco metodológico innovador que facilite la integración del RE en los programas de mantenimiento predictivo de la industria aeronáutica.

1.4 Hipótesis

El análisis de señales de corriente de ruido electroquímico RE por medio de los algoritmos de segmentación PELT y modelos ocultos de Markov HMM permitirá una clasificación precisa y dinámica de los mecanismos de corrosión presentes utilizando una base de datos compuesta por señales de ruido electroquímico obtenidas previamente en condiciones controladas del laboratorio compuestas por diversos materiales bajo distintos electrolitos con el fin de diversificar los resultados. Esta metodología mejorará la interpretación cuantitativa y visual de las señales, facilitando su implementación en programas de mantenimiento preventivo aeronáutico y permitiendo la detección temprana de procesos corrosivos que, de otra forma, pasarían desapercibidos.

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1 Materiales Aeronáuticos

La construcción de una aeronave requiere de condiciones muy específicas en cada zona que la conforma para poder crearla; la primera aeronave de vuelo controlado creada por los hermanos Wright en 1903 había sido conformada por madera de picea, madera de fresno, y muselina [32], no lejos de como inició nuestra contraparte marina, los barcos. A partir de este punto histórico y en adelante el desarrollo tecnológico y los materiales que constituye una aeronave han tenido una estrechez evidente.

La selección y curaduría de materiales aeronáuticos es el resultado de muchos años de investigación, pruebas, y avances; El primer distanciamiento de la madera en 1919 buscó integrar los materiales metálicos para incrementar la resistencia y tiempo de vida de estos, reflejándose en el diseño del Junkers F13, aeronave fabricada con duraluminio [33], el cual es un nombre obsoleto para referirse a aleaciones de aluminio y cobre endurecidas por envejecimiento que contienen manganeso, magnesio o silicio [34], cuya versión moderna corresponde al AA2024, material que continúa siendo usado en las aeronaves. El aluminio comenzó a utilizarse debido a su ligereza, alta resistencia a la tensión y buena resistencia a la corrosión, mientras que el acero se reservó para componentes críticos de la aeronave, como el tren de aterrizaje, sujetadores del motor y conectores del ala. Esto se debe a la rigidez, dureza y resistencia al calor del acero; sin embargo, su peso es considerablemente alto, por lo que su uso se limita a estas áreas específicas [34,35]. La aparición del titanio se dio durante el resurgimiento de los vuelos comerciales tras la segunda guerra mundial, apareciendo tanto en el exterior de la aeronave, como el interior. Este material y sus aleaciones poseen una alta resistencia a la tensión, a altas temperaturas, y la mejor resistencia a la corrosión, haciendo que su uso en componentes estructurales sea altamente deseado. Sin embargo, su elevado costo limita su aplicación en la industria aeronáutica [34].

Con el paso del tiempo, cada aeronave ha ido definiendo sus objetivos específicos, lo cual ha permitido identificar y cubrir necesidades particulares, por ejemplo, una aeronave militar necesita operar a altas velocidades y ofrecer un alto grado de maniobrabilidad, mientras que una aeronave comercial requiere ser competitiva en costo, ligera, y contar con gran capacidad

de transporte de pasajeros o carga [36], lo que exige materiales que permitan cumplir con estas demandas. Hoy en día las aeronaves están conformadas por materiales metálicos (aleaciones diversas), materiales compuestos, cerámicos, y polímeros, de los cuales podemos ver aeronaves como el 787 Dreamliner de Boeing con el 50% de sus componentes siendo materiales compuestos, 20% Aluminio, 15% titanio, 10% acero, y el 5% a otros variados [37]. Y en contraste tenemos al Lockheed Martin F-22 Raptor con el 42% de su peso siendo titanio, 24% aluminio, 24% compuesto polimérico, y 10% aleaciones ferríticas [38]. Las proporciones y materiales específicos varían en función de las exigencias operativas de cada aeronave, aunque los grupos de materiales siguen patrones comunes de diseño.

2.1.1 Aluminio

Actualmente la industria del aluminio en el sector aeroespacial ha tenido un incremento significativo, siendo que la tasa de crecimiento anual compuesta para el 2024 a 2031 en Norte América es del 6.2% con una expectativa de ganancia de venta para el país de \$320.87 millones de dólares y un crecimiento esperado del 6.7% en los años por venir [39]. Aunado a esto, de acuerdo con el gobierno mexicano en el censo económico correspondiente al año 2019, en la región de Nuevo León se presenta el mayor índice de producción de Aluminio del país, alcanzando una producción bruta total de \$17,898M MX, señalando a San Nicolás de los Garza, y Monterrey como los municipios de producción principales [40].

Antes de adentrarnos más en las características mecánicas y químicas de estas aleaciones y su funcionalidad dentro de la aeronave, es importante hacer la distinción sobre sus clasificaciones y designaciones. Su categorización principal consiste en su metodología de fabricación, las aleaciones forjadas y las fundidas, con sus respectivos tratamientos térmicos -cuando éstos son aplicables, denominada como la Designación de Aleaciones de la Asociación de Aluminio Internacional [41], protegida bajo el Instituto de Estándares Americanos Nacionales. La nomenclatura para aleaciones fundidas se basa en cuatro dígitos. El primer número indica el elemento de aleación principal. El segundo dígito identifica las variaciones de una aleación específica, donde el número 0 denota su forma original. El tercer y cuarto dígito son valores arbitrarios que representan la cantidad de un elemento de aleación que conforma a un material específico, a excepción de la serie 1XXX, en cuyo caso denota el grado de pureza. Los grupos principales existentes se encuentran ilustrados por la tabla 1.

Designación	Elemento(s) de aleación principal(es)
1XXX	Aluminio
2XXX	Cobre
3XXX	Manganeso
4XXX	Silicio
5XXX	Magnesio
6XXX	Magnesio y silicio
7XXX	Zinc
8XXX	Otros elementos
9XXX	Serie no utilizada

Tabla 1. Designación de Aleaciones de Aluminio Forjadas [41]

La identificación de aleaciones forjadas se basa en un sistema de tres dígitos y un decimal. El primer dígito representa el elemento de aleación principal. El segundo y tercer dígito identifica la aleación de aluminio o indica su grado de pureza. El último dígito correspondiente al decimal indica la forma del producto, es decir si por fundición (0) o lingote (1). Modificaciones a aleaciones preestablecidas pueden ser señaladas por una letra de serie antes de la designación numérica, la secuencia de la serie inicia con la letra A continuando en orden alfabético, omitiendo las letras “I, O, Q, y X”

Designación	Elemento(s) de aleación principal(es)
1XX.X	Aluminio
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silicio, con cobre y/o magnesio
4XX.X	Silicio
5XX.X	Magnesio
7XX.X	Zinc
8XX.X	Estaño
9XX.X	Otros elementos
6XX.X	Serie no utilizada

Tabla 2. Designación de Aleaciones de Aluminio fundidas [41]

El sistema de designación del temperado indica el tipo de tratamiento térmico empleado para producir distintos temperados, y es aplicable para todas las formas de aluminio forjado y fundido. Están representados por el sistema alfabético presente en la tabla 3. Subdivisiones existen con un sistema alfanumérico para señalar secuencias o tratamientos específicos.

Designaciones básicas	
F	En condiciones de fábrica, sin tratamiento
O	Recocido
H	endurecimiento por deformación o trabajo en frío (solo aleaciones forjadas)
W	Tratado en solución sin envejecimiento
T	Tratado térmicamente
Subdivisiones H	
H1	Endurecido por trabajo frío
H2	Endurecido por trabajo frío y parcialmente recocido
H3	Endurecido por trabajo frío y estabilizado
Subdivisiones T	
T1	Enfriado desde una alta temperatura de trabajo y envejecido naturalmente
T2	Enfriado desde una alta temperatura de trabajo, trabajado en frío, y luego envejecido naturalmente
T3	Tratado en solución, trabajado en frío y luego envejecido naturalmente
T4	Tratado en solución y envejecido naturalmente hasta alcanzar una condición estable
T5	Enfriado desde una alta temperatura de trabajo y luego envejecido artificialmente
T6	Tratado en solución y envejecido artificialmente
T7	Tratado en solución y envejecido artificialmente para estabilizarlo, a menudo usado para reducir la sensibilidad a la corrosión y lograr un equilibrio entre resistencia y ductilidad
T8	Tratado en solución, trabajado en frío y luego envejecido artificialmente

T9	Tratado en solución, envejecido artificialmente y luego trabajado en frío para mayor resistencia
10	Enfriado desde una alta temperatura de trabajo, envejecido artificialmente y luego trabajado en frío

Tabla 3. Designación de tratamientos térmicos y subcategorías [41]

El aluminio y sus aleaciones han estado presentes en las aeronaves desde los inicios, evolucionando con la industria, compartiendo una historia entrañada; Parte de su atractivo general consiste en su disponibilidad, maleabilidad para trabajar, ligereza, y alta resistencia a la tensión; pero para comprender de manera más concreta cómo y por qué, discutiremos las características y propiedades físicas de la familia de aleaciones con más presencia en las aeronaves, correspondientes a la serie 2XXX, 6XXX, y 7XXX [42].

Las aleaciones de la serie 2XXX tienen como su elemento de aleación principal el cobre, y generalmente emplea en menores cantidades magnesio como elemento suplementario. Las aleaciones pertenecientes a esta serie pueden ser encontradas en componentes estructurales de fuselaje y en las cubiertas inferiores del ala, zonas en las cuales es crucial la resistencia a la tensión y dureza [43]. Algunas de estas aleaciones que destacan hoy en día corresponden a las AA2024, 2224, 2324, y 2524 [44,45]; aleaciones que fueron desarrolladas para incrementar la resistencia, tolerancia a la fatiga, y tenacidad, haciéndolas candidatas ideales para fines aeronáuticos. Estas características pueden ser acentuadas aún más por medio de endurecimiento por precipitación en el cual se generan fases de refuerzo como S' (Al_2CuMg) y θ' (Al_2Cu) en aleaciones ricas en magnesio y cobre respectivamente [45]; El aspecto negativo de este tratamiento es la reducción moderada de la elongación.

La serie 6XXX posee como elemento de aleación principal el magnesio y silicio, formando siliciuro de magnesio Mg_2Si (fase β') siendo este su precipitado que le da a las aleaciones de su serie, su resistencia a la tensión [45]. Algunas de sus aleaciones destacadas consisten en la AA6013 y 6050 usadas para el revestimiento del fuselaje, largueros y componentes de los asientos [12]. Generalmente sus aplicaciones se centran en zonas donde de resistencia a la tensión moderada (siendo las aplicaciones de alta resistencia a la tensión reservadas para las series 2XXX y 7XXX [46]). Gracias al Mg_2Si estas pueden utilizar tratamientos térmicos, y poseen una buena formabilidad, capacidad de soldar, y maquinabilidad [47].

El zinc es el elemento principal de las aleaciones de la serie 7XXX representando entre el 1 al 8% de la aleación; la presencia de este elemento le permite formar las fases de refuerzo como $MgZn_2$, Al_2CuMg y $Al-Cu-Mg-Zn$, cuya presencia aumenta significativamente la resistencia a la tensión, sobrepasando a las pertenecientes de la serie 2XXX [45]. Otros elementos secundarios consisten en el cobre para mejorar la resistencia a la corrosión bajo tensión (SCC), el magnesio para incrementar aún más la resistencia a la tensión, y trazas de manganeso, zirconio, o cromo con el fin de regular el tamaño de grano. Algunas de las aleaciones más notables son la AA7049, 7050, 7075, 7175, 7178, y 7475, desarrolladas específicamente para tener una alta tenacidad contra la fractura, podemos encontrarlas en engranajes, componentes de misiles, y acoplamientos de aeronaves [43]. Una desventaja de estas aleaciones son que tienden a ser las más susceptibles a la corrosión de todas las aleaciones, y no tiende a tener buena soldabilidad [47].

2.1.2 Titanio

En la actualidad, el desarrollo de materiales aeronáuticos y astronáuticos han situado a la reducción de peso como el ápice de las investigaciones actuales; para los fabricantes y aerolíneas el reducir el peso de la aeronave tiene la prioridad debido a que con ello se podrá incrementar la eficiencia del combustible. Sin embargo, estas estructuras ligeras deben de, dentro de su ligereza, resistir los cambiantes esfuerzos mecánicos, cambiantes temperaturas, e inclementes ambientes, de la misma manera que los materiales convencionales.

Un candidato excelente para cubrir con esta necesidad constituye al titanio y sus aleaciones, el cual posee una resistencia a la tensión equiparable a la del acero, pero siendo 45% más ligero [48], así como una excelente resistencia a la corrosión y a altas temperaturas.

Las aleaciones de titanio pueden ser catalogadas en concordancia con su fase cada una con una alotropía particular que le otorga sus características. Las aleaciones Alpha (α) poseen una estructura HCP dentro de las cuales tenemos una subcategoría de superaleaciones- α , compuestas únicamente por granos α -Ti, y aleaciones casi- α , las cuales tienen estabilizadores β en bajas cantidades. Su uso en la aeronáutica se centra en su retención de resistencia a la tensión y otras propiedades mecánicas posterior a tratamientos térmicos, permitiendo su exposición a altas temperaturas [48-50].

Las aleaciones Alpha-Beta (α/β) al tener estabilizadores de ambas fases, su tenacidad a la fractura, resistencia a la fluencia y ductilidad superan a las de aleaciones α -Ti, y con una resistencia a la tensión y a la fatiga superiores a las de las aleaciones de β -Ti [48-50]. Un ejemplo de esta aleación consiste en la Ti-6Al-4V, utilizada en la estructura general del fuselaje, pernos, rieles de asientos y componentes de motores, específicamente en la sección de admisión con los ventiladores y carcasas. Su uso en las áreas listadas se debe a que poseen [50].

Las aleaciones Beta (β) poseen una estructura BCC la cual adquieren gracias a la inclusión de los estabilizadores isomorfos Hf, V, Ta, Cr, Nb, Mo, etc. [50-51] Otorgándoles una resistencia a la fatiga y a la tensión notable, enfocando su aplicación en piezas estructurales con mucha carga. Un representante ilustro de estas aleaciones es la Ti-10V-2Fe-3Al, de cuyas características destaca una resistencia a la fatiga y tensión incrementada, enfocando su uso en áreas que sufren de grandes cargas tensionales, como lo es el tren de aterrizaje [51].

2.1.3 Acero

Se podrá encontrar la aplicación de este material en múltiples industrias, particularmente en la construcción y edificación, en la cual en el año 2022 representó el 52% de uso de acero global [52]; su notoriedad en esta industria se debe a su alta tenacidad y ductilidad a un precio accesible. Sin embargo, su uso en las aeronaves se ve limitado a causa de su alta densidad el cual puede representar un incremento de peso significativo [45]. A pesar de esta limitante, el acero sigue teniendo una presencia firme particularmente en componentes estructurales críticos para la seguridad que requieren una resistencia muy alta y donde el espacio es limitado [53].

El acero tiene múltiples estilos de nomenclatura cambiantes entre países e industrias, de ellos el más comúnmente empleado se trata de la designación SAE-AISI [54]; Consiste en un sistema de cuatro dígitos que categorizan el contenido químico de aleaciones de acero y aceros al carbono. El primer dígito indica el elemento de aleación principal, el segundo dígito representa elementos de aleación secundarios o adicionales. La cantidad de carbono es representada por los últimos dos dígitos en porcentaje.

Designación	Tipos de aceros
-------------	-----------------

1XXX	Acero al carbono
2XXX	Acero con níquel
3XXX	Aceros níquel-cromo
4XXX	Aceros con molibdeno
5XXX	Aceros con cromo
6XXX	Aceros cromo-vanadio
7XXX	Aceros con tungsteno
8XXX	Aceros níquel-cromo- vanadio
9XXX	Aceros manganeso-silicio

Tabla 4. Designación SAE-AISI [54]

Los aceros inoxidable siguen un sistema de tres dígitos según la AISI, en el cual el primero indica el elemento de aleación principal, el segundo indica elementos de aleación adicionales, mientras que el tercero representa variaciones particulares a la aleación original en menores cantidades [45,54].

Designación AISI		
2XX	Acero inoxidable austenítico	Cr-Ni-Mn
3XX		Cr-Ni
4XX	Acero inoxidable Ferrítico	Cr
	Acero Inoxidable Martensítico	Cr (Endurecidos con tratamiento térmico)
---	Dúplex	Cr-Ni-Mo (fases austeníticas y ferríticas)
PH	Endurecibles por Precipitación	Cr-Ni + otros elementos

Tabla 5. Designación Aceros inoxidables, de acuerdo con AISI [54].

Los tipos de acero más utilizados en la industria aeronáutica consisten en aceros de medio carbono los cuales poseen entre 0.3 a 0.8% de carbono [65] y su congénere, los aceros de medio-carbono con baja aleación cuya distinción recae en la incorporación de elementos de aleación como Ni, Cr, Mo, y V en mayor cantidad a fin de incrementar su dureza y resistencia

a altas temperaturas [53]. Su uso se centra en componentes del tren de aterrizaje. Un ejemplo de este tipo de material es el acero 4140, cuya aleación se basa en el Cr y Mo. Dentro de sus características deseables se encuentran la soldabilidad, maquinabilidad, y buena respuesta a tratamientos térmicos, cuyos elementos de aleación le otorgan una resistencia a la tensión de 862 MPa y una resistencia a la fluencia de 690Mpa [56].

Los aceros “maraging” cuyo nombre es una combinación de martensíticos con envejecimiento tienen un porcentaje de carbono por debajo del 0.03% y concentraciones de elementos de aleación de Ni al 18%, Co al 12%, y Mo al 4% [54]. La combinación de su fase y tratamiento térmico permite una alta tenacidad, ductilidad y resistencia a la fractura, teniendo un rango de resistencia a la tensión de 1500 a 2300 Mpa [55]. En aeronaves y transbordadores espaciales se puede encontrar en componentes con altas cargas de peso. La aleación de acero 250 Maraging tiene 18% Ni, 7% Co y Mo al 4% cuyo tratamiento térmico consiste en un doble proceso de fundición al vacío mediante VIM (Vacuum Induction Melt) seguido de VAR (Vacuum Arc Remelt). ideales para aplicaciones críticas y piezas sometidas a grandes esfuerzos, como componentes de motores, trenes de aterrizaje de aeronaves y cigüeñales [57].

2.2 Corrosión

La corrosión se trata de una reacción química o electroquímica la cual involucra un proceso de oxidación y reducción, también conocido como “Redox”, en el cual ocurre una transferencia de electrones por parte del metal a el ambiente donde se encuentra expuesto. Adentrándonos en las minucias de la teoría, en este contexto nos referimos al material afectado -el metal- propiamente como el electrodo, y el medio que permite este intercambio como el electrolito, el cual se puede presentar en forma líquida, gaseosa, o un híbrido de tierra-líquido [58]. Dichos ambientes permiten esta transferencia gracias a su capacidad conductiva y contenido iónico, variable entre sustancias siendo el agua un ejemplo común.

La manera en que el electrodo reacciona con el electrolito es en realidad dos reacciones complementarias: El electrodo al estar expuesto a un medio conductivo como el electrolito genera una corriente anódica en la cual el electrodo pierde o cede ne electrones y el electrolito los gana para reducir los iones pertinentes. Esta reacción anódica indica la oxidación, y puede ser representada por la expresión:



La reacción de reducción se presenta con una corriente catódica fluyendo en sentido de la solución al metal



O bien en la forma de:



La dirección de este proceso dependerá de las condiciones de su entorno y material, contemplando factores como la temperatura, pH, composición, etc. Permitiendo que en ciertos casos sea esto reversible [58-59].

Una consideración importante que nos habla acerca de la dirección del proceso es primero identificar los elementos presentes, tanto en el electrolito como en el electrodo. Los elementos de aleación dictaminan las propiedades mecánicas, químicas, y termodinámicas de una aleación particular en conjunto con el material principal [59]. La combinación de

elementos de aleación se trata de un balance muy delicado entre mejorar ciertos aspectos a costa de otros. Por ejemplo, al tener una aleación de aluminio con cobre, esta mejora su resistencia mecánica, pero reduce su resistencia a la corrosión. Además de estas propiedades otro factor que compete al proceso de corrosión es el potencial de reducción que pertenece a los elementos; estos se organizan en la serie electroquímica o de actividad, el cual se trata de un listado que clasifica los electrodos en función de su tendencia a oxidarse o reducirse, utilizando como referencia al electrodo estándar de hidrógeno (SHE), cuyo potencial es 0.00v [60]. En la tabla 6 se presentan algunos elementos con sus respectivos potenciales. Los valores negativos indican la tendencia a actuar como ánodos (materiales activos) en relación con el SHE, mientras que los valores positivos tienden a comportarse como cátodos (materiales nobles). Este potencial define la predisposición de los elementos a oxidarse o reducirse en presencia de un electrolito, y englobando su velocidad y dirección de la reacción [56].

Material	Reacción	Potencial (V)
Li	$\text{Li}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.0401
K	$\text{K}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{K}$	-2.931
Ca	$\text{Ca}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2.868
Na	$\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.71
Mg	$\text{Mg}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.372
Al	$\text{Al}^{+3} + 3\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.662
Zn	$\text{Zn}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.7618
Cr	$\text{Cr}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cr}$	-0.913
Fe	$\text{Fe}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.447
Cd	$\text{Cd}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0.4030
Ni	$\text{Ni}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.257
Sn	$\text{Sn}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.1375
H ₂	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	0.00000
Cu	$\text{Cu}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.521
Ag	$\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag}$	0.7996
Hg	$\text{Hg}^{+2} + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Hg}$	0.851

Tabla 6. Serie de fuerza electromotriz [60].

Retomado el ejemplo de una aleación de aluminio con cobre expuesta en agua, el aluminio tiene un potencial de -1.66V , actuando como un ánodo, mientras que el cobre tiene un valor de $+0.34\text{ V}$, actuando como un cátodo. Estas al estar juntos en un mismo electrolito crean un par galvánico en el cual el aluminio perderá electrones y se los dará al cobre, acelerando la corrosión del aluminio.

2.2.1 Mecanismos de corrosión

Aluminio.

El aluminio reacciona con la presencia del oxígeno y/o agua, ante los cuales, formando una capa pasiva de óxidos amorfa en su superficie, protegiéndolo del medio en el que se encuentra [61]. Esta capacidad le concede una buena resistencia a la corrosión, teniendo un grosor de alrededor de $2\text{-}4\text{nm}$ [62], permaneciendo en ambientes con un pH entre los 4 a 8. La formación de esta capa ocurre primero por parte de los elementos de aleación menos nobles, como lo son el Li, Mg, y Be los cuales -debido a su potencial de reducción- se oxidan primero, formando una capa de óxidos de baja calidad en los extremos de la superficie. Los elementos más nobles generan una capa de óxidos mixta, precipitándose entre los 0.5 a 50nm [63]. Existen ciertas zonas donde no ocurrirá oxidación debido a que precipitados muy grandes no tendrán compatibilidad con la matriz.

Refiriéndonos a las series mencionadas con mayor presencia en la industria aeronáutica, la serie 2XXX presenta la mayor tendencia a la corrosión, particularmente a corrosión localizada esto debido a su alta concentración de cobre el cual, al formar precipitados en los límites de grano, reduce la resistencia de la capa pasiva [63]. La serie 6XXX tiene buena resistencia general, pero ante la presencia de cloruros se puede presentar corrosión intergranular y localizada. En la serie 7XXX se tiene una susceptibilidad a la corrosión bajo tensión (Stress Corrosion Cracking, SCC), especialmente cuando están en ambientes húmedos o cargados de cloruros. Esta susceptibilidad se debe a la microestructura de los precipitados formados en el tratamiento térmico, los cuales pueden debilitar la matriz y hacerla vulnerable a la SCC [61].

Titanio

Las aleaciones de titanio destacan sobre el resto de las aleaciones en el área de la resistencia a la corrosión; El titanio tiene la capacidad de auto pasivarse con una facilidad mayor a la del aluminio, generando una capa de dióxido de titanio con un grosor entre los 2.5 a 40 nm. Esta capa de óxidos es altamente resistente y se regenera de manera espontánea requiriendo únicamente trazas de oxígeno o agua, teniendo así la posibilidad de ser usadas en áreas donde se vea limitado su acceso [64-65].

En general, el titanio es resistente a la mayoría de los tipos de corrosión localizada, como ataque intergranular, corrosión galvánica, y SCC. La corrosión por agrietamiento o hendidura es la más peligrosa, ya que en áreas con flujo estancado se crean condiciones químicas agresivas locales que aceleran la corrosión. Esto puede presentarse cuando el material se encuentra a una temperatura de $>70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ante soluciones de cloruro, bromuro, yoduro o sulfato [65].

Acero

El acero de medio carbono presentan una buena resistencia a la corrosión en general sin embargo tienen ciertas limitaciones y susceptibilidades presentes. Estos tienen una fuerte dependencia a su microestructura, los aceros de medio carbono poseen una estructura con perlita la cual bajo ciertas condiciones de temperatura pueden propiciar la corrosión intergranular la cual puede progresar a corrosión localizada debido a los posibles efectos galvánicos entre las fases de ferrita y cementita [66].

Otra susceptibilidad que presenta es el SCC, generalmente presente en casos donde se tiene un componente sujeto a tensión en ambientes corrosivos, particularmente en ambientes donde el hidrógeno y/o sulfuros abundan [67]. De la misma mano, la corrosión por hidrógeno por si mismo también es una posibilidad, en donde su presencia penetra la matriz estructural, resultando en microgrietas [68].

2.2.2.1 Corrosión en la aeronáutica

Las aeronaves se ven sujetas a condiciones de operación y factores ambientales extremos como las variaciones en presión atmosférica, temperatura, humedad, altitud, densidad del aire, tipo de combustible y sus emisiones, entre otros las cuales tienen una influencia muy grande en la presencia y desarrollo de los mecanismos de corrosión. En una primera instancia se deben de identificar todos estos contribuyentes para comprender la genuina razón por la cual un componente experimenta cierto ataque; no se puede tomar acciones preventivas o de mantenimiento sin antes llegar a la raíz del causante, de lo contrario el problema no será propiamente atendido, llevando a un reemplazo prematuro.

Tomando como ejemplo las aeronaves comerciales más utilizadas, la altitud máxima en la que pueden volar o techo operacional está marcada para un Boeing 737-800 como 41,000 pies [69] mientras que para un Airbus 321-neo tenemos 39,000 pies [70]. A estas alturas las condiciones del aire tienen una temperatura externa de alrededor de los -56.5°C con una presión atmosférica de 2.1 psi [71], estas condiciones reducen la cantidad de moléculas de oxígeno por unidad de volumen, considerando que en la superficie de la aeronave exista algún desgaste previo, daño superficial, o zona debilitada que no haya sido previamente detectada, se verá impactada la habilidad de diversas aleaciones discutidas para la regeneración de su capa de óxidos superficiales debido a condiciones anaeróbicas. En adición con esto, la temperatura operacional de los motores en el compresor llega a los $1,600^{\circ}\text{C}$ a máxima potencia, y en el escape se tiene una temperatura entre los 450°C a 600°C [72]. Las emisiones que despiden los motores en el Boeing 737-800 a lo largo de su trayecto es de 604.9 gr de HC, 10,980.4 gr de CO, y 9,523.8 gr de NO_x [73]. El efecto de estos gases contaminantes en combinación con la alta temperatura en la que son despedidos resulta en un incremento en la velocidad de la corrosión, oxidando la superficie metálica que se encuentre expuesta [74]. La formación de carburos en presencia de una matriz metálica con elementos que tengan afinidad por el carbono como lo son el niobio, titanio, y cromo puede hacer al material más frágil al formarse precipitados en los límites de granos, y la reducción de la resistencia a la corrosión [75].

Otro aspecto que se considera es el constante cambio de zona ambiental al que se sujetan durante los vuelos; estando expuestos en zonas urbanas e industriales en cuyo aire se encuentran emisiones de SO_2 , NO_2 , CO, PM_{10} , y $\text{PM}_{2.5}$ entre otros posibles reactivos químicos

los cuales contribuye a la corrosión atmosférica [75] para luego pasar a las áreas costeras donde las aeronaves se ven expuestas a altos grados de salinidad en el aire, en las cuales el NaCl en el aire propicia la corrosión y desgaste de los materiales [76]. Este constante cambio que ocurre en cuestiones de horas, múltiples veces al día puede contribuir a la corrosión superficial de la aeronave. En adición a esto, durante los horarios fuera de servicio de las aeronaves al verse refugiadas en los hangares pueden estarse exponiendo a un ambiente que agrave la corrosión en el caso de no tener ventilación adecuada, acumulando entonces la humedad y propiciando a la corrosión y acelerando el deterioro de la estructura.

Según la AC 43-4B [12], ciertas zonas de la aeronave requieren atención especial debido a su susceptibilidad a la corrosión. Estas áreas incluyen huecos, costuras, bisagras y carenados en las zonas de escape del motor, así como compartimentos de batería y sus aberturas de ventilación. Además, las áreas de sentina, pozos de rueda y tren de aterrizaje, junto con la superficie exterior de la aeronave y cualquier lugar donde el agua pueda acumularse, son puntos críticos para inspecciones preventivas. La acumulación de humedad y residuos en estas zonas aumenta significativamente el riesgo de corrosión, lo que puede comprometer la integridad estructural y el rendimiento de la aeronave.

Tipos de corrosión

La corrosión se puede manifestar a través de diversos mecanismos o combinación de estos, motivo por el cual su predicción es incierta y su presencia estará dictaminada por el tipo de material, el ambiente al que se encuentre expuesto, los efectos de algún pretratamiento (en el caso de este existir), y los materiales que lo circunden.

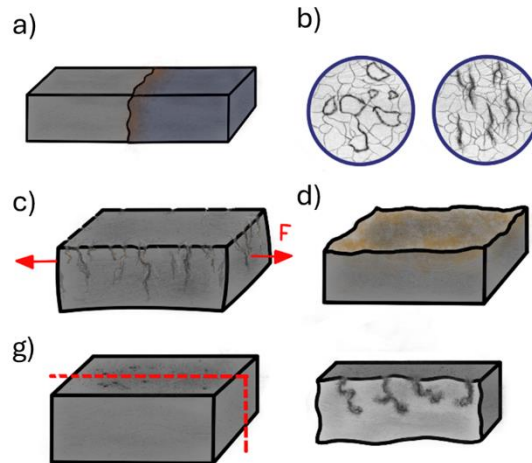


Ilustración 1. Tipos de corrosión: a) corrosión galvánica, b) corrosión intergranular/transgranular, c) agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo, d) corrosión generalizada, e) corrosión localizada. (autoría propia)

Corrosión generalizada

Considerada como el tipo de corrosión más común en el cual se presenta de manera uniforme por toda la superficie del material, o también por zonas delimitadas (considerada corrosión generalizada impropia). Se tiene una pérdida o adelgazamiento del metal que se ve reflejada en la pérdida de peso y se caracteriza por la generación de productos de corrosión o herrumbre, es predecible y fácilmente detectable [78-79]. Se presenta en ambientes en el cual la capa pasiva del material no puede regenerarse [34].

Corrosión Localizada

Como su nombre lo indica, este se presenta de manera focalizada iniciando en áreas del material donde se presente alguna irregularidad o discontinuidad en su superficie que lo deje expuesto, los tipos de corrosión localizada son corrosión por picadura (generando puntos centralizados de pérdida del material), por hendidura (en zonas de acumulación de desperdicio o electrolitos variados), y filiforme (presentándose por debajo del recubrimiento o capa protectora) [59]. Dicha imperfección puede atribuirse a un defecto de fabricación, daño mecánico o haber estado expuesto a algún químico; una vez que se inicia la picadura o hueco, este continuará creciendo y penetrando el material, disminuyendo significativamente sus propiedades mecánicas, y generando una concentración de esfuerzos no deseada, debilitando la estructura o componente y llevándolo a un fallo o fractura [34,78].

Corrosión Intergranular/Transgranular

Ambas forman parte de los ataques localizados y se presentan a nivel de los granos cristalinos del material, particularmente en las segregaciones químicas en los límites de grano o tensiones residuales. En el primer caso, se presenta propiamente en los límites y progresa en función a ellos; aquí tendremos una zona actuando como el ánodo en contacto con otra que actúa como el cátodo [34,79]. Comúnmente se presenta en altas temperaturas debido a los cambios de fase no controlados que generan segregaciones. En el caso de la corrosión Transgranular el trayecto de la corrosión no sigue el de los límites de grano, atravesándolos [78].

Corrosión Galvánica

Las condiciones que dan lugar a este tipo de corrosión consisten en la presencia de metales disimilares entre los cuales existe un conducto o medio a través del cual pase una corriente eléctrica. El trasfondo de este comportamiento se atribuye a la diferencia de potenciales que existe entre los metales, siendo uno de ellos más noble que el otro en el cual uno se convertirá en el ánodo y el otro en el cátodo, y al momento de entrar en contacto en la presencia de una fuente de electricidad el metal más reactivo (ánodo) se corroerá [79]. Otro factor importante que influye en la corrosión galvánica es la relación de áreas de los metales, es decir, si tenemos un área catódica más grande que el área anódica, la tasa de corrosión puede variar centenas de veces mayor que si estas fueran del mismo tamaño debido a la densidad de corriente, es decir puede sufrir de una aceleración grave. Si tenemos el caso contrario, entonces la densidad de corriente y el daño serán mucho menores [79-80].

Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzo

También conocida como SCC por sus siglas en inglés, se presenta como el producto o consecuencia de sujetar un metal a un desgaste tensional sostenido en la presencia de un ambiente corrosivo [34]; la combinación de ambos factores resulta en la fisuración del material metálico cuyo comportamiento corrosivo tiende a ser intergranular, pero puede ser transgranular bajo condiciones y materiales específicos, otros factores que se ven involucrados se tratan propiamente de la microestructura y composición del material, posibles defectos durante su producción como la presencia de contaminantes, tratamientos térmicos fallidos, entre otros pueden resultar en SCC [79-80]. Este fenómeno es particularmente peligroso en aplicaciones industriales y estructurales, ya que la fisuración por corrosión bajo

tensión puede provocar fallas imprevistas y catastróficas en componentes que de otro modo se considerarían estructuralmente sólidos.

2.3 Ruido Electroquímico: Herramienta para la Detección de Corrosión

En contraste con otras técnicas electroquímicas, el ruido electroquímico no introduce corrientes o voltajes externos, midiendo únicamente las fluctuaciones presentes en la superficie de la muestra que se presentan debido a la liberación de electrones, siendo esta la respuesta en condiciones naturales [79-80]. El término "ruido", cuya etimología proviene del latín *rugitus* (rugido o sonido sordo) [81], podría parecer en primera instancia incongruente al asociarse con un fenómeno electroquímico, dado que las muestras no generan sonidos en un sentido físico; sin embargo, las ondas de potencial y corriente registradas en estas mediciones presentan características caóticas y fluctuantes que evocan la imprevisibilidad de un rugido o un ruido en el sentido sonoro de la palabra.

El descubrimiento de las interacciones eléctricas generadas por los metales al contacto con diferentes sustancias (electrolitos) se les atribuye a los trabajos de Luigi Galvani y Alessandro Volta, a partir de los cuales se nombró la celda galvánica o voltaica. Los hallazgos de Galvani partieron de la experimentación de los efectos de diversos metales en contacto con los nervios expuestos de una rana diseccionada, a partir de los cuales descubrió que al momento de conectarle dos metales disimilares se producía una contracción muscular que atribuía a una forma de electricidad inherente a los tejidos vivos, denominándola "electricidad animal" [82].

Volta empleó los conocimientos de Galvani desde otra hipótesis, considerando que esta condición descrita por su predecesor no era inherentemente única de los seres vivos o materia orgánica, sino el resultado del contacto entre dos metales diferentes [83]. Este descubrimiento sentó las bases para el conocimiento moderno, sugiriendo que el contacto entre distintos metales genera potenciales eléctricos diferentes. Posteriormente, científicos como Michael Faraday, Walter Nernst, H.H. Uhlig, Allen J. Bard, [84-88], entre otros, tomaron estos principios fundamentales y los desarrollaron en lo que hoy conocemos como la electroquímica moderna.

Figuras clave en el desarrollo del análisis de ruido electroquímico fueron Iverson [89], quien descubrió que los metales corroídos en su potencial de circuito abierto (EOCP) generan fluctuaciones aleatorias en la corriente y el potencial debido a inestabilidades locales en la interfaz metal-solución. Posteriormente F. Mansfeld refinó la técnica mediante exploración cuantitativa de las señales de corriente y potencial por medio de parámetros como la

resistencia al ruido (R_n) y la densidad de potencial espectral, impulsando la aplicación de estos y validando su utilidad [90-92]. Por su parte, F. Huet y D. Keddam profundizaron en el entendimiento físico del fenómeno contribuyendo al modelado matemático del ruido electroquímico al estudiar sistemas complejos con superficies metálicas de geometría irregular y su relación con procesos electroquímicos localizados como la corrosión por picadura. Ambos promovieron la aplicación del análisis espectral y el uso de modelos eléctricos equivalentes para interpretar las señales [93-94]. Finalmente, M. Cottis desempeñó un papel fundamental para la estandarización del RE contribuyendo al análisis estadístico de las señales de EN, promoviendo el uso de técnicas como la transformada rápida de Fourier, y desarrollando métodos para interpretar las fluctuaciones en términos de mecanismos de corrosión y tipos de ataque, como la corrosión localizada o uniforme [80].

En México J. Uruchurtu representa un pilar en la comunidad electroquímica al impulsar el uso de RE cuyo trabajo de investigación abarca desde el monitoreo de corrosión atmosférica, evaluación de recubrimientos, estudios de la erosión-corrosión en cobre, etc. [95-98] Actualmente el grupo de investigación de corrosión del CIIA ha contribuido significativamente a la aplicación de RE y su continua innovación en aspectos de monitoreo y análisis de fenómenos de corrosión en materiales utilizados en la industria aeronáutica y otras áreas, la evaluación de recubrimientos de grado aeronáutico por medio de RE, así como propuestas de aplicación de teoría del caos para el análisis de resultados en las señales de ruido [99-104].

Refiriéndonos ahora a la configuración convencional de esta prueba, esta consiste en el sistema de tres electrodos, con el electrodo de trabajo, contraelectrodo, y electrodo de referencia; sin embargo, múltiples configuraciones han sido propuestas como lo son dos electrodos de trabajo nominalmente iguales y un electrodo de referencia (midiendo el potencial del par de electrodos de trabajo con respecto al electrodo de referencia utilizando un amperímetro de cero resistencia), o bien usando un tercer electrodo en lugar de un electrodo de referencia, entre otras configuraciones; la selección de una u otra depende de la instrumentación disponible, disponibilidad de materiales, y metodología de grabación de datos [94-96].

La señal obtenida se caracteriza por ser de naturaleza estocástica, generada por una multitud de posibles eventos como rupturas súbitas de películas, propagación de grietas, eventos

discretos relacionados con la disolución del metal en hoyos de grabado, límites de grano, sitios de torsión y liberación de hidrógeno con la formación y desprendimiento de burbujas de gas [107]. Es importante destacar el término "estocástico": aunque a menudo se usa indistintamente con "aleatorio", describe de manera más precisa un proceso cuyos resultados están regidos por el azar. En el caso de la corrosión uniforme, se observa como fluctuaciones espontáneas de baja frecuencia en corriente y potencial, mientras que, en el caso de la corrosión localizada, se observan transitorios anódicos y catódicos distintos. En ambos casos, intervienen procesos estocásticos [105-108].

Antes de realizar cualquier cálculo sobre la señal obtenida, es necesario realizar un preprocesamiento. Normalmente, se aplica un filtro de paso bajo para eliminar frecuencias por encima de la frecuencia de Nyquist [108], asegurando así que la señal esté libre de ruido de alta frecuencia que pueda distorsionar los resultados. También se pueden utilizar filtros de paso alto para eliminar cualquier deriva de corriente continua (DC) de la señal [109].

2.3.1 Interpretación de las señales

Las señales de ruido electroquímico (EN) pueden analizarse a través de diversos dominios: tiempo, frecuencia o tiempo-frecuencia. En esta discusión, nos enfocaremos exclusivamente en el dominio del tiempo, pero se enfatiza que la metodología descrita es adaptable a los otros dominios y será demostrada en trabajos futuros.

El análisis inicial del cuál podemos derivar información es la examinación directa del potencial y corriente; un número de propiedades han sido determinadas como la picadura metaestable, manifestándose como transitorios en corriente hacia ambas direcciones y en potencial hacia la región negativa, dichos transitorios deben de concordar en corriente y potencial, de lo contrario se consideraría interferencia [107]. La iniciación de corrosión por cavitación tras la ruptura de la capa pasiva tendrá un comportamiento similar al descrito previamente, dónde el proceso de corrosión estable tendrá una caída significativa de potencial y corrientes de acoplamiento más amplias. La iniciación del agrietamiento por corrosión bajo tensión puede ser detectado por eventos transitorios los cuáles tienden a disminuir en amplitud conforme el agrietamiento incrementa [79]. Esta interpretación inicial sirve para dar

un diagnóstico rápido inicial, sin embargo, este debe de ser comprobado por las demás metodologías.

La interpretación en el dominio del tiempo se realiza mediante un análisis estadístico de las señales [108-109,11-112], donde se calculan métricas importantes como la media y desviación estándar, las cuales por sí solas no aportan información relevante al comportamiento presente y en su lugar, son utilizados para obtener otros datos relevantes como el índice de localización (LI). Este representa el coeficiente de varianza:

$$LI = \frac{\sigma_i}{i_{rms}} \quad (2.3.1.1)$$

El resultado de este cálculo arrojará un valor dentro de los intervalos presentes en la tabla 7:

Rango	Tipo de corrosión
0.001 Li 0.01	Corrosión uniforme
0.01 Li 0.1	Corrosión mixta
0.1 Li 1	Corrosión por picaduras

Tabla 7. Parámetros índices de localización [110]

La resistencia al ruido es otro dato relevante el cual nos habla acerca de la relación entre el promedio de potencial y corriente con respecto al área expuesta.

$$R_n = \frac{\sigma_E A}{\sigma_I} \quad (2.3.1.2)$$

Este dato suele ser comparado con la resistencia a la polarización y considerado como inversamente proporcional, sin embargo, este caso se presenta únicamente en sistemas en los cuales la impedancia ha llegado al límite de DC en el rango de Δf utilizado para la prueba [112]. A partir de la ecuación Stern-Geary se puede calcular la densidad de corriente i_{corr} dónde la B representa el coeficiente Stearn-Geary:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_n} \quad (2.3.1.3)$$

Otros datos estadísticos de importancia se tratan del sesgo, el cuál mide la asimetría de los datos en comparación con el promedio, eventos como ataques localizados y SCC tendrán distribuciones no-uniformes. La curtosis describe la forma de la distribución de datos, particularmente la “cola” y la concentración de valores alrededor de la media [108-109, 113].

$$Curtosis = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \quad (2.3.1.4)$$

$$Sesgo = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \quad (2.3.1.5)$$

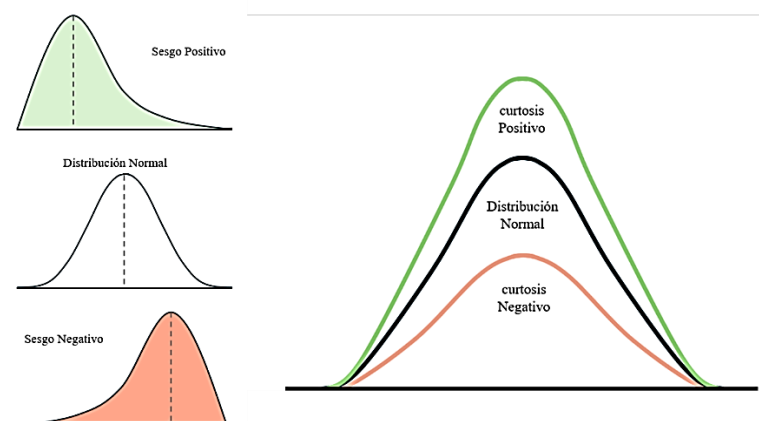


Ilustración 2. representación del sesgo y curtosis (autoría propia)

El sesgo está normalizado con respecto a la desviación estándar y su valor base es de 0. En el caso de la curtosis la distribución normal es de 3 positiva; Algunos autores obtienen la curtosis normalizada en la cual se sustrae 3 del calculado [108]. Los resultados de los cálculos son clasificados de acuerdo con la siguiente tabla:

Forma de Corrosión	Potencial		Corriente	
	Sesgo	Curtosis	Sesgo	Curtosis
General	$< \pm 1$	< 3	$< \pm 1$	< 3
Picaduras	< -2	$\gg 3$	$> \pm 1$	$\gg 3$
Transgranular SCC	+4	20	-4	20
Intergranular SCC #1	-6.6	18 – 114	1.5 – 3.2	6.4 – 15.6

Intergranular SCC #2	$-2 a - 6$	$5 - 45$	$3 - 6$	$10 - 60$
----------------------	------------	----------	---------	-----------

Tabla 8. Parámetros de sesgo y curtosis. [114]

Para analizar los datos en el dominio de frecuencia primero debemos de transformarlos; existen diversas metodologías para realizar esta conversión, entre las cuales la más común es la Transformada Rápida de Fourier (FFT), algoritmo el cuál descompone la señal de tiempo en componentes sinusoidales de distintas amplitudes y frecuencias, permitiéndonos analizar los datos desde la frecuencia [108,-110]. Además de la FFT existen otras técnicas que podemos emplear como el método de máxima entropía (MEP), que estima los coeficientes de una serie de filtros aplicados para analizar señales con características de ruido blanco [108].

Una vez que se tienen los datos en el dominio de la frecuencia, podemos estudiar el espectro de potencia y obtener así la resistencia espectral al ruido $R_{sn}(f)$, calculada por medio de la siguiente fórmula:

$$R_{sn} = \sqrt{\frac{\psi_V}{\psi_I}} \quad (2.3.1.6)$$

Dónde ψ_V y ψ_I representan la densidad de potencia espectral PSD del potencial y corriente.

Otras metodologías experimentales que se han explorado en la literatura se tratan de las técnicas de la teoría del caos, con herramientas como el método de *wavelet* dónde se tienen ondas de duración finita o wavelets en el tiempo, en lugar de ondas sinusoidales continuas [107]; El análisis mediante el exponente de Lyapunov y atractores caóticos también ha mostrado potencial en el estudio de la corrosión. Aunque estas técnicas aún no están completamente fundamentadas en este campo, sus resultados ofrecen indicios sobre la naturaleza dinámica y compleja de los procesos de corrosión, como la evolución de patrones en sistemas no lineales [99, 115]. En la era moderna muchos investigadores han visto por implementar técnicas como neuronas artificiales, inteligencia artificial, etc. En búsqueda de métodos de análisis que sean más rápidos, precisos, y con mayor capacidad a identificar patrones complejos.

El uso y la interpretación de métricas estadísticas en el análisis de corrosión han sido objeto de exploración y crítica por parte de la comunidad científica, particularmente debido a su

susceptibilidad para favorecer o predisponer ciertos comportamientos en función de la variabilidad de las señales analizadas, limitando su efectividad y, por ende, su aplicación.

Los autores F. Mansfeld y Z. Sun [116] investigaron el índice de localización, cuyos estudios concluyeron que este cálculo no representa directamente los mecanismos de corrosión, sino más bien una caracterización de la desviación de un sistema con respecto a su comportamiento idealizado, descartándolo como un indicador directo de los procesos de corrosión.

Por su parte, R.A. Cottis [117] señaló que el índice de localización comparte limitaciones similares con su predecesor, el coeficiente de variación. Dicha limitante consiste en que, debido a que la media de la corriente puede ser 0 entonces el resultado puede tender a infinito (o bien, menos infinito en casos negativos) siendo aplicable únicamente para una distribución unilateral. En su análisis, Cottis destacó que ambas métricas (el coeficiente de variación y el índice de localización) dependen fuertemente de la simetría de los electrodos.

En el caso de los cálculos estadísticos de tercer (sesgo) y cuarto (kurtosis) momentos, su fiabilidad ha sido investigada extensivamente. Los resultados demuestran que su efectividad para discernir mecanismos de corrosión depende fuertemente de la metodología empleada y del contexto de aplicación. H.A.A. Al-Mazeedi realizó una evaluación basada en un mapeo multidimensional de seis parámetros estadísticos, encontró que solo la desviación estándar logró discriminar correctamente entre mecanismos de corrosión. Sin embargo, el autor enfatiza la falta de más datos necesarios para alimentar su modelo [118]. En el estudio realizado por A.M. Naguib, el sesgo y la kurtosis fueron considerados como indicadores de distribución normal en los datos, y no necesariamente categorizadores definitivos de los mecanismos de corrosión. A pesar de ello, los resultados obtenidos mostraron una correcta determinación del mecanismo en comparación con otros métodos empleados en el mismo estudio, destacando su potencial cuando se utilizan en combinación con otros parámetros [119]. En el trabajo de Cottis y Bagley, se presentó esta metodología para caracterizar mecanismos de corrosión como una alternativa viable, pero experimental [120]. Los autores concluyeron que, aunque prometedora requiere validación mediante métodos adicionales. Punto que fue reforzado por una segunda publicación de Cottis dos años después, en la cual señaló que, si bien es viable, su aplicación demanda un enfoque cuidadoso y crítico.

Adicional a lo mencionado la patente desarrollada por Reid y Eden respalda la validez del uso del sesgo y la kurtosis como indicadores en la detección de mecanismos de corrosión [124]. En complemento, diversas publicaciones recientes emplean estas métricas en investigaciones sobre corrosión, demostrando su relevancia actual y presencia en el monitoreo y caracterización de corrosión [122-124].

2.4 Algoritmo PELT

La segmentación de la señal fue llevada a cabo utilizando el algoritmo PELT (*Pruned Exact Linear Time*) o en español, Tiempo Lineal Exacto con Poda o con descarte. Esta técnica fue introducida por primera vez en el 2012 por R. Killick [125-126] el cual es una optimización del Enfoque de Partición Óptima desarrollada por B. Jackson, 2005. En dicha metodología los puntos de cambio de una serie de datos $y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ son detectados por la siguiente ecuación:

$$\sum_{i=1}^{m+1} [C(y_{(\tau_{i-1}+1):\tau_i}) + \beta] \quad (2.4.1)$$

Los datos son segmentados en “m” segmentos cuyos puntos de cambio se encuentran en $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$. Estos puntos se determinan al minimizar el costo total, definido como la suma del costo de ajuste de cada segmento más una penalización que controla el número de segmentos. La configuración que genera el costo total más bajo identifica los puntos de cambio óptimos. Es importante señalar que en este contexto el término "costo" se refiere a una medida que cuantifica qué tan bien se ajusta un segmento dado a los datos y su cálculo se puede realizar a través de diferentes modelos cuya selección depende del comportamiento de los datos [127].

Las modificaciones realizadas por Killick consideran incluir el purgado o descarte como una manera para incrementar la eficiencia computacional sin abjurar el cálculo del costo mínimo global. El funcionamiento se basa en el descarte de los puntos de cambio τ que jamás podrán ser considerados como mínimos en concordancia con los resultados de minimización iterados. Los teoremas establecidos por Killick indican [125]:

TEOREMA 3.1: La introducción de un punto de cambio en una secuencia reduce el coste total C. Existe una constante K la cual, al agregar un punto de cambio, siempre decrementa el costo para cualquier $t < s < T$

TEOREMA 3.2: Si estimamos los parámetros del modelo utilizando la máxima probabilidad logarítmica y asumimos que los datos pertenecen a un solo segmento, el costo esperado del algoritmo PELT es proporcional a n (número de datos) bajo la

condición específica de los supuestos de la función de probabilidad logarítmica y longitudes de los segmentos.

TEOREMA 3.3: Para funciones de penalización cóncavas y diferenciables, la segmentación óptima será la cual minimice la suma de dichas penalizaciones y el costo de segmento por sobre los demás posibles segmentos generados.

El cálculo recursivo puede ser entonces representado por la siguiente ecuación, donde $F(s)$ representa el Coste acumulado hasta el punto s :

$$F(t) = \min_{s \in \{0, \dots, t-1\}} \{F(s) + C(y_{(\tau_{i-1}+1): \tau_i}) + \beta\} \quad (2.4.2)$$

2.5 Modelos Ocultos de Markov

Al tener un objeto de estudio el modelado representa un engrane fundamental para el entendimiento de que es lo que lo produce, porque medios, y las cuestiones que lo afectan directa o indirectamente; Los modelos pueden ser representaciones minuciosamente simplificadas o altamente complejas dependiendo de la disposición de datos mesurables, el uso que se le desea dar y el nivel de complejidad que se desea. Si bien un modelo simplificado será más fácil de realizar y ejecutar, este omitirá aspectos presentes en la vida real, siendo este el modelo “ideal”, mientras que en el caso contrario al agregar muchas variables, puede incrementar el peso y tiempo computacional que puede provocar sobre ajustar los resultados, por lo que es necesario encontrar un balance adecuado entre ambos.

Un modelado oculto de Markov describe un sistema en el cuál nuestra observación de interés es generado o dependiente estrechamente por un proceso oculto, dentro del cual se esconden los datos que describen nuestras observaciones. Esta técnica parte primero de las cadenas de Markov, las cuales describen un proceso o secuencia estocástico en el cual el futuro no depende del pasado, únicamente del presente. Su creación se atribuye al matemático ruso Andreu Markov, quien desarrolló el algoritmo con el fin de comprobar que los dos teoremas fundamentales de la probabilidad, la ley débil de números grandes y el teorema de límite central podrían extenderse a sumas de variables dependientes al azar por medio de la teoría de determinantes de matrices finitas cuadradas [128]. Su publicación titulada “Un ejemplo de investigación estadística del texto *Eugene Onegin* sobre la conexión de muestras en cadenas” [129] fue publicada en 1913 en la cuál se analizaron 20,000 letras del alfabeto ruso –*excluyendo las letras Ъ y Ь*– teniendo secuencias con vocales y consonantes dentro de las cuales se tiene una probabilidad “ p ” de que una letra observada sea vocal, la probabilidad de que hayan vocales continuas p_1 , la probabilidad de una vocal tras una consonante p_0 , probabilidad de una vocal tras dos vocales que son precedidas por una consonante $p_{0,1}$, y una probabilidad de una vocal seguida de dos consonantes $p_{0,0}$. También se calcularon las contrapartes de consonantes de las listadas probabilidades con la letra “q” manteniendo los mismos subíndices. La primera fase de sus cálculos fue la contabilización y categorización de vocales y consonantes, determinando la distribución de frecuencia de las vocales y consonantes y creando una tabla de frecuencias, a partir de aquí calculó que p tendría un valor de 0.432. Con esto procedió a calcular las probabilidades remanentes; para p_1 se presentaron 1104

secuencias con una probabilidad de 0.128, para p_0 se presentó 7534 secuencias, dando un valor de 0.663. Con esto Markov demostró que la probabilidad de tener una vocal cambiaba considerablemente dependiendo del tipo de letra que le precediera, teniendo un coeficiente de dispersión de $\delta = p_1 - p_0 = 0.128 - 0.663 = -0.535$, indicando por su estado negativo, que las letras poseían un patrón, es decir que existía una conexión real entre ellas. Comprobando esta proposición se calcularon los valores de coeficiente de dispersión cuyos cálculos empíricos arrojaron 0.208 mientras que los teóricos 0.3, reafirmando la existencia de un patrón dependiente no-aleatorio y modelando así un proceso estocástico de la escritura, explicando de manera efectiva las dependencias del tiempo. El trabajo de Markov fue bien recibido y con el paso de los años ha encontrado aplicaciones en las áreas del procesamiento de señales, biología, ciencias computacionales, psicología, mecánica entre muchos otros [130] donde el objeto de estudio sea el modelado y predicción de comportamiento presente en datos históricos.

Los modelos y cadenas de Markov no son territorio desconocido dentro de la investigación de la corrosión. En la investigación de F. Caleyó et al. [131] se modeló un proceso de Markov de crecimiento lineal no-homogéneo de nacimiento puro con estados discretos en tiempo continuo con el objetivo de predecir la evolución temporal de la profundidad de las picaduras y las distribuciones de tasa; su trabajo reflejó el supuesto de que las picaduras solo pueden aumentar de tamaño (nacimiento puro) en pasos discretos durante un tiempo continuo donde la tasa de crecimiento de las picaduras puede variar con el tiempo (no homogéneo), atribuido a las condiciones ambientales cambiantes alrededor de la tubería. Sus resultados mostraron la capacidad del modelo de estimar la distribución de probabilidad de las tasas de picaduras en toda la población de picaduras, así como en subpoblaciones con rangos específicos de profundidad y vida útil junto con su aplicabilidad a varios entornos.

Otro importante colaborador es K. McCallum et al. [132] cuyo trabajo se centró en el desarrollo de una herramienta interactiva para la gestión del riesgo de corrosión que evaluaba la probabilidad de fallo de equipos o infraestructura en función de diversas amenazas como la corrosión por picaduras y la degradación del revestimiento, así como la eficacia de las estrategias de mitigación como los inhibidores y los revestimientos protectores. Se modeló la iniciación y el crecimiento de las picaduras buscando simular la profundidad máxima

media de las picaduras en cupones de acero colocados en agua. Otros trabajos similares centrados en el crecimiento de la corrosión por picaduras, la detección de fallos y el modelado mediante técnicas markovianas son [133-136].

Actualmente, la literatura sobre cadenas y procesos de Markov aplicados a señales de ruido electroquímico en el área de corrosión es muy limitada. Una investigación realizada por T. Zang et al. [136] trabajó con el modelado estocástico de la susceptibilidad a la corrosión por picaduras usando análisis de ruido electroquímico en las aleaciones Mg–10Gd–2Y–0.5Zr, AZ91D, y magnesio puro a través de un proceso de Poisson no homogéneo con la distribución de tiempos de nucleación de picaduras simulados usando distribuciones de Weibull. Su enfoque consistió en obtener la probabilidad acumulada en cada frecuencia de eventos (f_n) utilizada para obtener el rango y el número total de datos f_n para calcular la tasa de generación de eventos condicionales que representan la probabilidad de generación de eventos en la siguiente unidad de tiempo. El modelo de Zang permitió determinar la susceptibilidad a la corrosión por picaduras por la tasa de iniciación y la probabilidad de crecimiento y validó sus hallazgos por medio de imágenes SEM.

H. Wang et al. [137] trabajó con la implementación de modelos ocultos de Markov combinado con la teoría de campos aleatorios para agrupar datos de la tierra para la evaluación de la corrosión externa en una tubería enterrada como una alternativa para los datos de estudio de suelos y los datos de inspección revelando los patrones subyacentes significativos de las propiedades del suelo y categorizando los defectos de corrosión.

El trabajo de D. Zang et al. [138] aplicó la identificación bayesiana utilizando modelos ocultos de Markov para desarrollar una alternativa de monitoreo basada en la condición sobre los procesos de degradación. Los datos introducidos en el modelo HMM correspondieron a las lecturas de sensores disponibles y los parámetros HMM se identificaron junto con la incertidumbre de estimación correspondiente utilizando un enfoque de estimación bayesiano, terminando en la propuesta de implementación en trabajos futuros para refinarlo y adaptarlo para otros fines.

El gran volumen de las investigaciones sobre corrosión relacionadas con HMM se enfocan particularmente en corrosión por picaduras y aplicaciones en tuberías, con algunos estudios aventurándose un poco más allá de este alcance. En el campo del análisis de ruido

electroquímico (EN) para corrosión, la cantidad de investigaciones que combinen HMM con EN es muy limitada, dejando un área de oportunidad muy grande.

2.5.1 Fundamentos matemáticos

Antes de adentrarnos al modelo oculto de Markov primero se debe de comprender su punto de partida, es decir las cadenas de Markov; la propiedad base de estas cadenas se basa en el supuesto de que el futuro depende únicamente en el presente y no en el pasado, esta propiedad está representada por:

$$P(q_i = a | q_1 \dots q_{i-1}) = P(q_i = a | q_{i-1}) \quad (2.5.1)$$

Donde los estados están representados por variables de estado aleatorias $Q = q_1, q_2, \dots, q_i$ que evolucionan a lo largo de una secuencia, indicando que la probabilidad de transición a un nuevo estado q_i depende únicamente del estado actual q_{i-1} y no de ninguno de los estados anteriores [139].

Las transiciones de estados son cuantificadas por medio de una matriz de probabilidad de transición:

$$A = [a_{ij}] \quad (2.5.2)$$

Donde cada elemento a_{ij} representa la probabilidad de pasar de un estado i al estado j y se deben incluir todos los posibles estados presentes. Adicionalmente todos los valores deben de ser positivos y la suma de sus filas siempre debe dar la cifra 1 [139-140].

El siguiente componente se conforma por la distribución de probabilidad inicial de los estados donde π_i representa la probabilidad de que la cadena de Markov inicie en el estado (i)

$$\pi = \pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N \quad (2.5.3)$$

Ahora volviendo al modelo oculto de Markov, su implementación se aplica en series de eventos donde los estados de interés no son directamente observables, de ahí el término 'oculto'. Este modelo representa las distribuciones de probabilidad sobre una secuencia de observaciones (O) en el tiempo t producidas por un proceso estocástico, donde el estado de interés (Q) está oculto; las transiciones de estado son probabilísticas y las observaciones son funciones probabilísticas del estado [141-142]. En un HMM de primer orden, se hacen dos suposiciones clave [140,141]:

La probabilidad de estar en un estado particular q_i en un tiempo t dado depende solo del estado anterior q_{i-1} y no de ningún otro estado preexistente, esto se expresa por:

$$P(q_i|q_1 \dots q_{i-1}) = P(q_i|q_{i-1}) \quad (2.5.4)$$

La segunda suposición establece que la probabilidad de una observación de salida o_i en un tiempo t depende solo del estado actual q_i que produjo la observación, y no de ningún otro estado ni de ninguna otra observación, esto se puede escribir como:

$$P(O_i|q_1 \dots q_i, \dots q_T, O_1, \dots, O_i, \dots, O_T) = P(O_i|q_i) \quad (2.5.5)$$

Los dos supuestos nos llevan a la siguiente expresión que representa la probabilidad conjunta de una secuencia de observaciones $O_{1:N}$ y estados $Q_{1:N}$ [136]:

$$P(O_{1:N}, Q_{1:N}) = P(Q_1) \prod_{t=2}^N P(Q_t|Q_{t-1}) \prod_{t=1}^N P(O_t|Q_t) \quad (2.5.6)$$

Los elementos que deben definirse previamente para poder aplicarla son los siguientes [151,153]:

N	Cantidad de estados ocultos.
O	Cantidad de observaciones distintas, es decir el resultado del sistema a modelar.
A	Cantidad de observaciones distintas, es decir el resultado del sistema a modelar.
B	Distribución de probabilidad de transición de estados (matriz de transición):
$a_{ij} = P[q_{t+1} = q_j q_t = q_i], \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (2.5.7)$	
π	Probabilidad de emisión, describiendo la probabilidad de que una observación sea producida o generada por un estado Q_t :

$$B = bi(o_t) = P[o_t | q_t = q_j], \quad 1 \leq j \leq N \quad (2.5.8)$$

Para asegurar que el modelo sea robusto y represente correctamente lo que deseamos modelar debemos de resolver los tres problemas o preguntas propuestas por Rabiner [143], autor que se propuso desarrollar un tutorial en la aplicación de HMM a raíz de su creencia de que, a pesar de la existencia de la teoría y sus preceptos, el HMM no había sido aprovechado por la comunidad científica, abogando por la falta de herramientas para comprender la teoría y

subsecuentemente aplicarlo. Dentro de su detallada explicación el definió los siguientes planteamientos:

Problema 1. Cálculo de la probabilidad: ¿cómo calculamos de manera eficiente la probabilidad de la secuencia de observación, dado el modelo?

Problema 2. Decodificación: ¿cómo elegimos una secuencia de estados correspondiente que explique mejor las observaciones?

Problema 3. Aprendizaje: ¿cómo ajustamos los parámetros del modelo para maximizar la probabilidad de la secuencia de observación?

La primera cuestión busca asegurar la correcta selección del modelo oculto $\lambda = (\pi, A, B)$ para nuestras observaciones $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$ las cuales determinan si dichas probabilidades son correctamente generadas por el modelo. Para evaluar esto, se determina el correcto ajuste del modelo con los datos proveídos utilizando el algoritmo de avance (*forward algorithm*) [139-146]. Este algoritmo dinámico calcula la probabilidad total de las observaciones considerando todas las posibles secuencias de estados ocultos que podrían generarlas:

Iniciación

$$a_1(j) = \pi_j b_j(o_1) \quad 1 \leq j \leq N \quad (2.5.9)$$

Donde π_j representa la probabilidad inicial de un estado j , y $b_j(o_1)$ representa la probabilidad de observar o_1 en dicho estado j .

Recursión

$$a_t(j) = \sum_{i=1}^N a_{t-1}(i) a_{ij} b_j(o_t); \quad 1 \leq j \leq N, \quad 1 < t \leq T \quad (2.5.10)$$

Se calculan las probabilidades para los instantes subsiguientes $t = 2, 3, \dots, T$ en donde $a_{t-1}(i)$ representa la probabilidad acumulada de existir en el estado i en el momento $t-1$ y a_{ij} la probabilidad de transición de estados.

Terminación

$$P(O|\lambda) = \sum_{i=1}^N a_T(i) \quad (2.5.11)$$

En el segundo planteamiento se utiliza el algoritmo de Viterbi el cual decodifica la secuencia de eventos que fueron generados. Este fue propuesto en 1967 por Andrew J. Viterbi quien desarrolló una metodología para minimizar el error probabilístico evaluando las probabilidades acumuladas de distintas secuencias de estados de transición posibles, y a partir de esto, decidir cuál de ellos posee la mayor probabilidad de ocurrir [144].

Para realizar esto, el algoritmo hace uso de una estructura llamada *trellis* o gráficos de celosías que organiza los estados y transiciones en un espacio temporal y posteriormente el algoritmo lo recorre para calcular la probabilidad acumulada más alta en cada paso, manteniendo un registro de las decisiones tomadas y así reconstruir el camino óptimo al final, es decir el que posee mayor probabilidad [144-145]; estos pasos pueden ser descritos en las siguientes ecuaciones:

Iniciación

en $t = 0$ para cada n estado (donde $n = 1$ a N)

$$\Gamma_{n0} = \ln \pi_n \quad 1 \leq n \leq N \quad (2.5.12)$$

$$sp_{n0} = [x_n] \quad (2.5.13)$$

Donde Γ_{n0} representa el logaritmo de probabilidad de iniciar en el estado n , la probabilidad inicial del estado n es representada por π_n , y sp_{n0} la secuencia inicial de estados.

Recursión

cálculos para: t donde $1 \leq t \leq T$, n donde $1 \leq n \leq N$, m donde $1 \leq m \leq N$

$$\Gamma_{nt} = \max_m [\Gamma_{mt-1} + \ln a_{mn} + \ln b_n(o_t)] \quad (2.5.14)$$

Donde Γ_{nt-1} representa el logaritmo de probabilidad del camino más probable para el estado m en un momento $t-1$. El logaritmo de probabilidad de transición de un estado m a n $\ln a_{ij}$, y el logaritmo de probabilidad de emisión para la observación o_t en un estado n se representa con $\ln b_n(o_t)$.

$$sp_t = \text{Append}[x_n, spm_t] \quad (2.5.15)$$

En donde se anexa el estado actual x_n a la secuencia spm_t que maximizó Γ_{nt}

Decisión

Cuando $t = T$

$$\Gamma_T = \max_n [\Gamma_{nT}] \quad (2.5.16)$$

Donde Γ_{nT} representa el logaritmo de probabilidad del camino más probable al estado n al final de la serie de tiempo.

$$spt = sp_{nt} \quad \text{para que} \quad \Gamma_{nt} = \Gamma_T \quad (2.5.17)$$

Finalmente, el último planteamiento encuentra su solución por medio del algoritmo de Baum-Welch, el cual es una adaptación del algoritmo avance-retroceso donde se maximiza la posibilidad de la secuencia de observaciones para reajustar los parámetros del modelo [144-147].

Los componentes principales son los pasos de expectativa (paso-E) y maximización (paso-M).

Paso-E

Cálculos utilizando el algoritmo avance-retroceso:

$$a_1(i) = \pi_i b_i(O_1) \quad \text{para} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.5.18)$$

Donde $a_1(i)$ representa la probabilidad inicial de la secuencia de observaciones parciales, mientras que $b_i(O_1)$ representa la distribución de probabilidad del resultado para el estado i .

$$a_{t+1}(j) = \left[\sum_{i=1}^N a_t(i) a_{ij} \right] b_j(O_{t+1}) \quad (2.5.19)$$

Esta ecuación representa la probabilidad acumulada de observar la secuencia $(O_1, O_2, \dots, O_t)$ y estar en el estado j en el momento $t+1$.

Ahora la variable de reversa es la probabilidad de observar la secuencia dado que el sistema está en el estado i en el tiempo t :

$$\beta_T(i) = 1 \quad \text{para} \quad 1 \leq i \leq N \quad (2.5.20)$$

$$\beta_t(i) = \sum_{j=1}^N a_{ij} b_j(O_{t+1}(j)) \quad (2.5.21)$$

La probabilidad de estar en un estado i en el momento t para la secuencia O (probabilidad de permanencia) es definida como:

$$\gamma_i(t) = \frac{a_i(t) \beta_i(t)}{\sum_{j=1}^N a_j(t) \beta_j(t)} \quad (2.5.22)$$

Y la probabilidad de estar en un estado i en el momento t y pasar al estado j en el momento $t+1$ (probabilidad de transición)

$$\xi_{ij}(t) = \frac{\gamma_i(t) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_j(t+1)}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i(t) a_{ij} b_j(O_{t+1}) \beta_j(t+1)} \quad (2.5.23)$$

Maximización (Paso-M)

Se maximizan todas las probabilidades con las que iniciamos el proceso (de inicio, de transición, y de emisión)

Se ajusta la probabilidad inicial utilizando la frecuencia relativa esperada de iniciar en el estado i

$$\tilde{\pi}_i = \gamma_i(1) \quad (2.5.24)$$

La probabilidad de transición ajustada se calcula como la tasa entre el número de transiciones esperadas de i a j , y el número total esperado de transiciones del estado i

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} \xi_{ij}(t)}{\sum_{t=1}^{T-1} \gamma_i(t)} \quad (2.5.25)$$

Para la probabilidad de emisión se calcula como la proporción del número esperado de observaciones específicas emitidas desde un estado i , dividido entre el número total esperado de veces que el sistema estuvo en el estado i .

$$\tilde{b}_{ij}(v_k) = \frac{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)}{\sum_{t=1}^T \gamma_t(j)} \quad (2.5.26)$$

$$\tilde{b}_{ij}(v_k) \frac{\text{Número esperado de veces en el estado } j \text{ y símbolo de observación } vk}{\text{Número esperado de veces en el estado } j}$$

Un factor relevante que aclarar es que las descripciones proveídas se enfocan estrictamente en modelos discretos, mientras que los cálculos y estructuras de los modelos continuos divergen de ellos. Para profundizar en la teoría de los modelos continuos basados en cadenas de Markov, se recomienda el libro *“Markov chains”* de J.R. Norris particularmente los capítulos 2 y 3 donde se abordan las bases teóricas y el desarrollo estructural de cadenas de Markov en tiempo continuo [148]. Asimismo, *“Hidden Markov models for time series – an Introduction using R”* por W. Zucchini, et al. ofrece una introducción accesible y detallada a los modelos ocultos de Markov en su variante continua acompañada de ejemplos prácticos [159]. Adicionalmente el libro *“Pattern recognition and machine learning”* por C.M. Bishop provee una explicación avanzada con un enfoque probabilístico de estos modelos, explorando a fondo los diferentes tipos y sus aplicaciones [150].

El principal cambio entre los enfoques discreto y continuo radica en la manera de tratar y calcular las observaciones y sus probabilidades de emisión. En este trabajo se adoptó un enfoque híbrido donde las probabilidades de iniciación y de transición se tratan de manera discreta al clasificar los segmentos por tipo de corrosión y obtener sus respectivas probabilidades en función a estas, mientras que las probabilidades de emisión se calculan de manera continua. Por este motivo, nos centraremos en el cálculo de las emisiones continuas, pero se recomienda revisar las obras mencionadas anteriormente para una comprensión más amplia de ambos enfoques.

En el caso discreto, la probabilidad de emisión puede calcularse de manera similar a las probabilidades de transición, contabilizando eventos y calculando su probabilidad de ocurrencia en un punto específico. Sin embargo, al tratar con datos continuos, esta técnica no es aplicable. La principal diferencia radica en que los sistemas discretos tienen un número finito de posibles resultados, mientras que, en los sistemas continuos, la probabilidad de distribución puede tomar cualquier valor dentro de un rango infinito. En consecuencia, al

intentar obtener la probabilidad de un valor específico en un conjunto continuo, el resultado sería 0, debido a la infinitud de posibles valores que la variable puede adoptar.

En lugar de utilizar probabilidades puntuales, en los casos continuos se emplean funciones de densidad de probabilidad (FDP), las cuales describen la probabilidad de que una variable aleatoria tome valores dentro de un rango definido. El cálculo de la FDP depende de la forma en que los datos estén distribuidos, pudiendo adoptar formas logarítmicas, exponenciales, sesgadas, de distribución T, gaussiana o, en casos no paramétricos, KDE.

La distribución más utilizada en datos continuos es la normal o gaussiana de la siguiente manera:

$$b_j(o_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} \exp\left(-\frac{(o_t - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (2.5.27)$$

Esta ecuación permite modelar las observaciones continuas dentro del marco de los modelos ocultos de Markov, calculando así las probabilidades de emisión continuas para el estado j , donde μ_j representa la media y σ_j^2 la varianza [151-152].

Capítulo 3. Metodología

El diseño metodológico del presente proyecto de investigación está basado en los objetivos planteados en el capítulo 1, de los cuales se reitera como objetivo principal es la implementación de las técnicas de PELT y HMM con la finalidad de:

- Observar la secuencia categórica tipificando la corrosión presente a lo largo de la señal de RE.
- Evaluar los patrones presentes en búsqueda de similitudes y relaciones entre la cantidad de segmentos detectados y transiciones observadas.
- Analizar puntualmente el desarrollo de la corrosión, los puntos exacerbantes y su conducta en cada fase de la prueba, y
- Establecer las bases metodológicas para su futura implementación en contextos similares.

Al ser una temática inexplorada en el contexto del RE aplicado en el área de corrosión, la profundidad del estudio será de carácter exploratorio; si bien el desarrollo exitoso de la hipótesis planteada resolverá una problemática particular como lo es el facilitar el análisis de corrosión en el mantenimiento de aeronaves, el esquema de posibilidades y panorama completo al comprobar dicho planteamiento se extiende fuera de únicamente el ámbito aeronáutico y puede trascender a resolver problemáticas en todas las áreas que incorporen el RE como metodología de detección de corrosión, abriendo las puertas a nuevas posibilidades. Siendo este el impacto que se busca lograr, el aspecto central para llevar a cabo el trabajo de investigación impulsará el desarrollo de estudios más profundos.

Con respecto a los planteamientos paradigmáticos el enfoque es un estudio cuantitativo, ya que los datos obtenidos de las señales serán procesados por metodologías estadísticas y probabilísticas, con las cuales podremos cuantificar la cantidad de segmentos de interés en una señal, calcular y determinar el tipo de corrosión al cual estos pertenecen, medir la cantidad de transiciones y probabilidad de que estas ocurran, determinar la densidad de probabilidad de las emisiones o datos, y habiendo aplicados los algoritmos de HMM, el evaluar la secuencia más probable de eventos corrosivos en la señal de RE.

3.1 - Recolección de datos y Criterio de selección

La base de datos de señales de RE constó de un total de 70, las cuales fueron obtenidas en el Laboratorio de Corrosión del Centro de Investigación en Innovación e Ingeniería Aeronáutica (CIIIA). Estas señales provienen de diversas pruebas realizadas con diferentes aleaciones, incluyendo aleaciones de titanio, aluminio, aceros y superaleaciones, expuestas a una variedad de electrolitos, primordialmente NaCl, H₂SO₄, y HCl. La variedad de tipos de materiales y medios electrolíticos fue esencial para evaluar la efectividad de la metodología propuesta para analizar diferentes materiales y condiciones de manera eficaz y certera. Las señales mencionadas fueron evaluadas tanto de manera individual como grupalmente aislando los grupos pertenecientes a los mismos materiales.

Una parte de las señales fueron recopiladas directamente por la autora durante la fase de experimentación utilizando el potencióstato/galvanostato VERSASTAT4, mientras que otras fueron proporcionadas por colaboradores del laboratorio, quienes compartieron sus datos obtenidos en estudios previos. Dicha colaboración fue crucial para obtener suficiente variabilidad de datos y enriquecer el análisis. El criterio de selección de las señales se basó en una longitud de 1024 puntos sin secciones faltantes o zonas de interrupción. La calidad de dichas señales fue inspeccionada asegurando condiciones controladas sin factores externos que les háyase afectado. Señales sin variabilidad o en su defecto, con ruido excesivo no relacionado con el comportamiento corrosivo fueron descartadas. De las señales obtenidas se trabajó únicamente con las señales de corriente obtenidas, esto debido a que la corriente representa la cinética de la corrosión en la superficie estudiada, mientras que el potencial representa la termodinámica [80,90,113], área que queda fuera del alcance de este estudio.

3.2 - Desarrollo computacional

Todos los cálculos fueron realizados utilizando el lenguaje de programación de *Python* versión 3.13.1 y sus respectivas librerías en la interfase *Visual Studio Code*. *Python* fue seleccionado debido a su gran cantidad de librerías disponibles y versatilidad, así como facilidad de uso.

Una consideración importante antes de proceder con la descripción del contenido se centra en que las señales analizadas fueron previamente filtradas para eliminar las tendencias de corriente directa utilizando un filtro polinomial de 9 grados; dicha metodología fue seleccionada debido a su conocida aplicación y uso en el análisis de estas señales dado a que provee una suavización de la señal sin eliminar datos fundamentales [88] cabe destacar que existe una multitud de filtros aplicables cuya selección se mantiene a discreción del investigador para cubrir con las características y necesidades de las señales por analizar [153]. Sin embargo, discusiones sobre el pretratamiento de la señal caen fuera del alcance del presente trabajo.

3.3 - Segmentación y clasificación

Para la implementación de HMM primero deben de ser definidas las variables relevantes antedichas en el capítulo previo; consiguiente a esto consideramos que dichos datos se encuentran ocultos en la señal y deben de primero ser sublimados para proceder con la aplicación del HMM.

La primera variable por extraer consiste en los tipos de corrosión detectados. De acuerdo con los métodos tradicionales explorados en el *capítulo 2*, las señales son procesadas por métodos estadísticos cuyo resultado es evaluado con respecto a la *tabla 8* para clasificar el tipo de corrosión presente. En razón a que nuestro objetivo es revelar lo que ocurre a lo largo de la señal y no solo el resultado final, el paso inicial consiste en detectar los puntos de cambio en la señal y con ello singularizar los eventos de interés que ocurren en la señal.

Para dicha tarea se emplea el algoritmo de Tiempo Lineal Exacto con Poda, o descarte “PELT” utilizándolo como modelo para el cálculo del costo la función de base radial (FBR). Esta función opera obteniendo el valor del costo en base a una representación *kernel* de los datos. El modelo tradicional actúa bajo la asunción de que el número de puntos de cambio incrementa linealmente conforme incrementa el tamaño de la serie de datos. Este comportamiento no se ve reflejado en nuestras señales ya que no es posible aseverar que dicho incremento se presentará en algún patrón definido, por lo que se optó por una función radial de base:

$$k(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2) \quad (3.3.1)$$

Los fundamentos operativos del RBF se centran en calcular las distancias euclidianas $\|x - y\|$ entre nuestros datos o vectores con respecto a un centroide de referencia o bien el origen dentro del espacio dimensional.

El valor de penalización influye fuertemente en la cantidad de segmentos generados y la sensibilidad de detección, ya que su función es proteger en contra del sobreajuste; tener un valor muy bajo puede llegar a más puntos de cambio y sobreajustar, mientras que un valor muy alto puede dejar pasar muchos puntos de interés. El proceso de selección de penalización no tiene una metodología directa o simple; las bases necesarias para comenzar son entender el comportamiento y distribución de la señal. Ante la ausencia de conocimiento previo sobre

la cantidad esperada de puntos de cambio, resulta crucial realizar una evaluación visual y analítica de la señal para identificar las ubicaciones apropiadas de dichos puntos, asegurando así la congruencia con las transiciones detectables. La selección del valor de penalización se efectuó de manera empírica, ajustando los parámetros según la variabilidad observada en las señales. Se estableció una cantidad mínima de datos de 30, en concordancia con lo estipulado por Reid, quien indica que para el cálculo de curtosis y sesgo se requieren entre 30 y 2048 datos. Una vez generados los segmentos, se procedió a la fase clasificatoria, donde se calcularon los valores de sesgo y curtosis correspondientes a cada segmento, y su clasificación se definió conforme a los criterios establecidos por Reid [114].

3.4 - Estimación de Parámetros: Iniciación, Transición y Emisión

Habiendo generado “N” cantidad de segmentos, se procede con la definición de parámetros establecidos en el capítulo anterior. La probabilidad de iniciación se refiere a la probabilidad de que alguno de los estados definidos sea el primero en iniciar la secuencia. Dentro de este marco podemos definir nuestros estados ocultos como los tipos de corrosión que se presentaron durante la fase de clasificación; es importante notar que los cálculos a partir de este punto deben de trabajar únicamente con los tipos de corrosión presentes en la señal procesada y aquellos que no se hayan detectado deben de ser descartados.

En vista de la ausencia de conocimientos previos acerca del tipo de corrosión y sus probabilidades iniciales, y considerando el enfoque exploratorio de este trabajo, se define como probabilidad inicial única aquella correspondiente al primer tipo de corrosión detectado en la secuencia. Esto puede ser refinado por medio del procesamiento de más señales para obtener así un promedio de los comportamientos iniciales. Habiendo procesado M señales tendremos el número de veces que se presenta un estado J representado por x_j , calculando,

$$\pi_j = \frac{x_j}{M}, \quad \text{donde } \sum_{j=1}^N \pi_j = 1 \quad (3.4.1)$$

El resultado debe de ser una matriz de $[1 \times N]$, donde las columnas representan los estados posibles, en este caso los tipos de corrosión mientras que la fila la probabilidad inicial.

Con respecto a la probabilidad de transición ($T_{i,j}$), se contabiliza la cantidad de estados detectados en la secuencia, y posteriormente se registran las transiciones observadas de un estado a otro. Para calcular la probabilidad de transición entre estados se determina cuántas transiciones ocurren desde un estado inicial hacia el siguiente estado ($C_{i,j}$), repitiendo este patrón continuamente con el siguiente estado hasta terminar la secuencia. Estas transiciones se dividen entre el número total de transiciones pertenecientes a ese grupo de estados total ($C_{i,k}$), y finalmente normalizando para que la suma de probabilidades en cada fila de la matriz sea igual a 1. Los resultados son utilizados para construir la matriz de transición la cual debe de tener una estructura de $[N \times N]$ con una columna y una fila por cada estado para representar las transiciones o bien, si se mantiene en la misma.

$$T_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{\sum_{k=1}^N C_{i,k}}, \quad \text{donde } \sum_{j=1}^N T_{i,j} = 1, \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (3.4.2)$$

El siguiente paso corresponde a los cálculos de emisión. Para esto se selecciona una distribución normal o gaussiana para modelar las densidades de probabilidad asociadas con cada estado.

Se genera una secuencia de observaciones concatenando todos los segmentos correspondientes a cada tipo de corrosión para permitir que cada observación sea evaluada en función de los estados definidos en el modelo, calculando para cada estado la media (μ), varianza (σ^2), y desviación estándar (σ) de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (3.4.3)$$

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N} \quad (3.4.4)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.4.5)$$

Con esto calculado, se genera un bucle para iterar a través de cada estado y calcular la densidad de probabilidad de cada observación para su respectivo estado utilizando la distribución gaussiana. Los resultados obtenidos son normalizados.

$$b'_j(o_t) = \frac{b_j(o_t)}{\sum_{j=1}^N b_j(o_t)} \quad (3.4.6)$$

El siguiente paso consiste en inicializar el modelo GaussianHMM (Modelo Oculto de Markov Gaussiano) de la librería “*hmmlearn*”. Este modelo fue seleccionado para representar las emisiones continuas mediante distribuciones normales, apegándose a un modelo ideal y reduciendo el costo computacional.

Es importante señalar que las señales electroquímicas obtenidas de sistemas reales no necesariamente se ajustan a una distribución gaussiana, debido a la naturaleza compleja y estocástica de los fenómenos involucrados. Por ello, se considera pertinente que en futuros trabajos se evalúe el uso de distribuciones no gaussianas, tales como las asimétricas o

aquellas con colas pesadas, que permitan representar con mayor fidelidad las variaciones presentes en escenarios de corrosión compleja.

En esta fase se establece el número de estados ocultos de manera dinámica a partir de la dimensión de la matriz de transición, adaptándose a las señales estudiadas. El tipo de covarianza debe definirse, considerando una configuración diagonal bajo la suposición de que las características de las observaciones son independientes entre sí. El motivo de esta selección se reduce en que, en muchos casos las señales de ruido electroquímico podrían no exhibir fuertes dependencias entre características. Adicionalmente esta selección reduce el costo computacional sin comprometer la precisión de los cálculos. Un total de 1000 iteraciones se establecen como máximo para garantizar la correcta convergencia del modelo y mantener su estabilidad.

Una vez que se hayan inicializado los parámetros predefinidos se procede al entrenamiento utilizando la secuencia de observaciones (señales originales). En este paso se ajustarán las probabilidades de emisión para revelar el patrón de estados ocultos en los datos, maximizando el logaritmo de probabilidad de las observaciones en concordancia con las configuraciones iniciales. Habiendo entrenado el modelo se reescribe y predice la secuencia más probable de estados ocultos que generaron las observaciones, calculando la trayectoria utilizando las probabilidades de inicio, transición y emisión.

Capítulo 4. Resultados y Discusión

A partir de la base de datos se seleccionaron los resultados más representativos del análisis realizado. Se incluyen tanto ejemplos de señales individuales como el análisis conjunto de las mismas con el objetivo de presentar diversos comportamientos en señales con baja, media y alta variabilidad para exponer la capacidad del modelo para identificar los patrones relevantes de los estados ocultos.

Las señales seleccionadas se analizarán utilizando cuatro valores de penalización diferentes establecidos individualmente para cada señal durante el proceso de segmentación. Esto permitirá visualizar el refinamiento de los resultados y evaluar su relevancia en el estudio. Es relevante mencionar que algunas de las señales utilizadas provienen de muestras con recubrimientos específicos. No obstante, los efectos de dichos recubrimientos sobre la superficie no se analizan en el presente estudio, ya que el objetivo principal consiste en comprender y demostrar la aplicación de la herramienta desarrollada.

La simbología implementada para la identificación de mecanismo de corrosión en las ilustraciones que presentan la segmentación PELT corresponden a los siguientes:

	Corrosión general
	Corrosión localizada
	Corrosión mixta

Tabla 9. Simbología representativa de mecanismos de corrosión

4.1 Señales Individuales

La señal seleccionada corresponde a una muestra de AA6061 con recubrimiento de anodizado en H_2SO_4 por 10 minutos a una concentración de 1.7 mol/L a temperatura ambiente expuesta a un electrolito de NaCl al 3.5%. Los resultados globales por el método tradicional fueron de 0.3513 en sesgo y -1.3503 de kurtosis, catalogándolo como corrosión general. De acuerdo con el índice de localización de 0.0107 indica corrosión mixta, situándose en el límite con corrosión general.

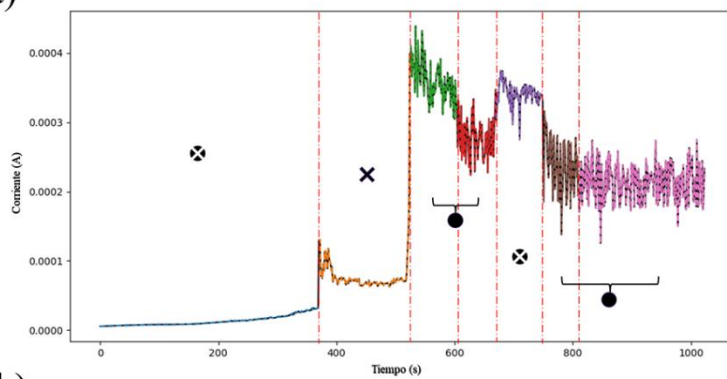
La segmentación fue llevada a cabo con los valores de penalización de 2, 8, 16, y 24. En la primera iteración utilizó un valor de penalización de 2, generando 7 segmentos en total. El primero pertenece a corrosión mixta compuesto por 370 puntos, seguido de corrosión localizada con 155 puntos, a continuación, aparecieron dos segmentos consecutivos de corrosión general de 80 y 65 puntos respectivamente, posteriormente, se observa corrosión mixta con 80 puntos, y finalmente dos segmentos de corrosión general con 60 y 214 puntos cada uno.

Con una penalización de 8 se identificaron 6 segmentos. Los primeros cuatro segmentos permanecen con la misma secuencia a excepción de el último segmento, el cual se fusionó convirtiéndose en un solo segmento de corrosión general con 274 puntos.

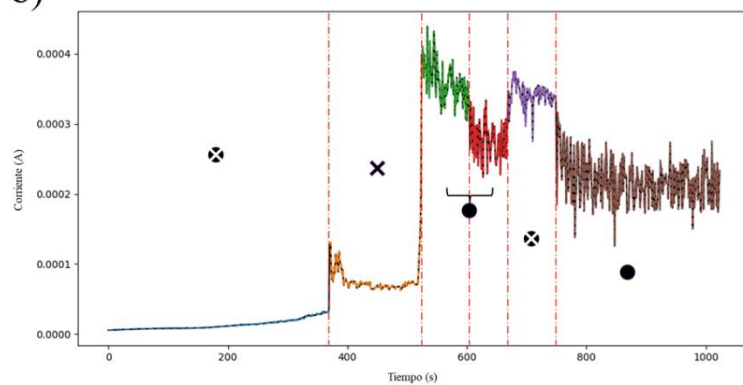
Al aplicar una penalización de 16, el resultado fue de 4 segmentos. Los primeros dos se mantienen igual a los anteriores, mientras que el tercer y cuarto segmento son categorizados como corrosión general con 230 y 269 datos respectivamente.

Finalmente, la segmentación con penalización de 24 no se presentaron discrepancias o cambios con respecto a la segmentación anterior, conservando la misma estructura y categorización de segmentos.

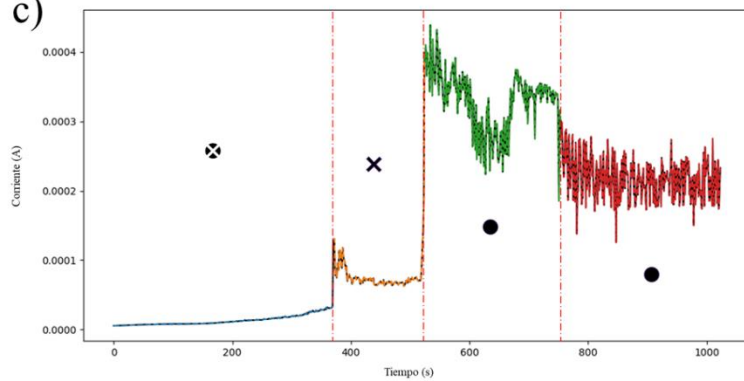
a)



b)



c)



d)

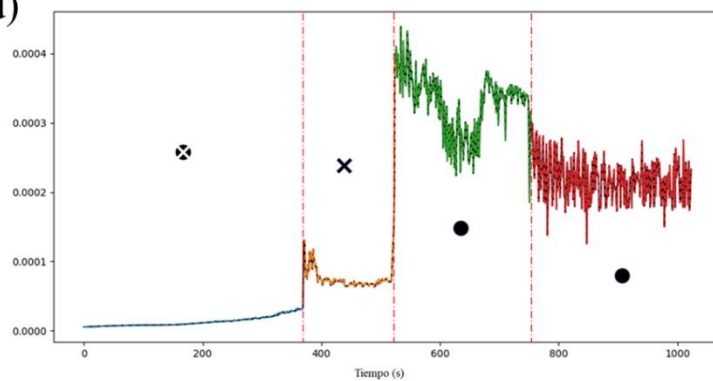


Ilustración 3. segmentación de señal RE 6061. a) penalización = 2, b) penalización = 8, c) penalización = 16, d) penalización = 24.

Las probabilidades de iniciación para los cuatro casos analizados se mantuvieron constantes, identificando la corrosión mixta como el estado inicial en todos ellos. Esto se presentó en forma de un vector:

$$[0 \quad 0 \quad 1]$$

Dónde las columnas representan, en orden, corrosión general, localizada, y mixta.

En las matrices de transición para el primer caso se tuvieron un total de 6 transiciones. La probabilidad de que corrosión general se mantuviera en esa misma fue de 0.67, y una probabilidad de pasar de corrosión general a mixta de 0.33. en corrosión localizada se presentó únicamente seguida de corrosión general teniendo ésta un valor de 1. En el caso de corrosión mixta podemos observar que esta tiene partes iguales de probabilidad de pasar a corrosión general o localizada, siendo ambas con valor de 0.5.

En el caso de la segmentación con penalización de 8 se tuvieron 5 transiciones. En esta se presentó un cambio en la probabilidad de transición de general a otros estados, la probabilidad de que la corrosión general se mantuviera en sí misma decrementó a 0.5 mientras que la probabilidad de corrosión general a mixta incrementó a 0.5. Esto es consistente con los resultados de la segmentación ya que los últimos dos segmentos se fusionaron en uno solo de corrosión general. El resto de las transiciones se mantuvieron sin cambios con la segmentación anterior.

Las segmentaciones de penalización 16 y 24 se mantuvieron estables, reflejando que su segmentación fue idéntica en ambos casos. estas matrices se registraron únicamente probabilidades singulares: corrosión general a corrosión general, localizada a general, y mixta a localizada. Esta simplificación se atribuye a la reducción en la cantidad de segmentos, siendo un total de 4, con solo 3 transiciones registradas.

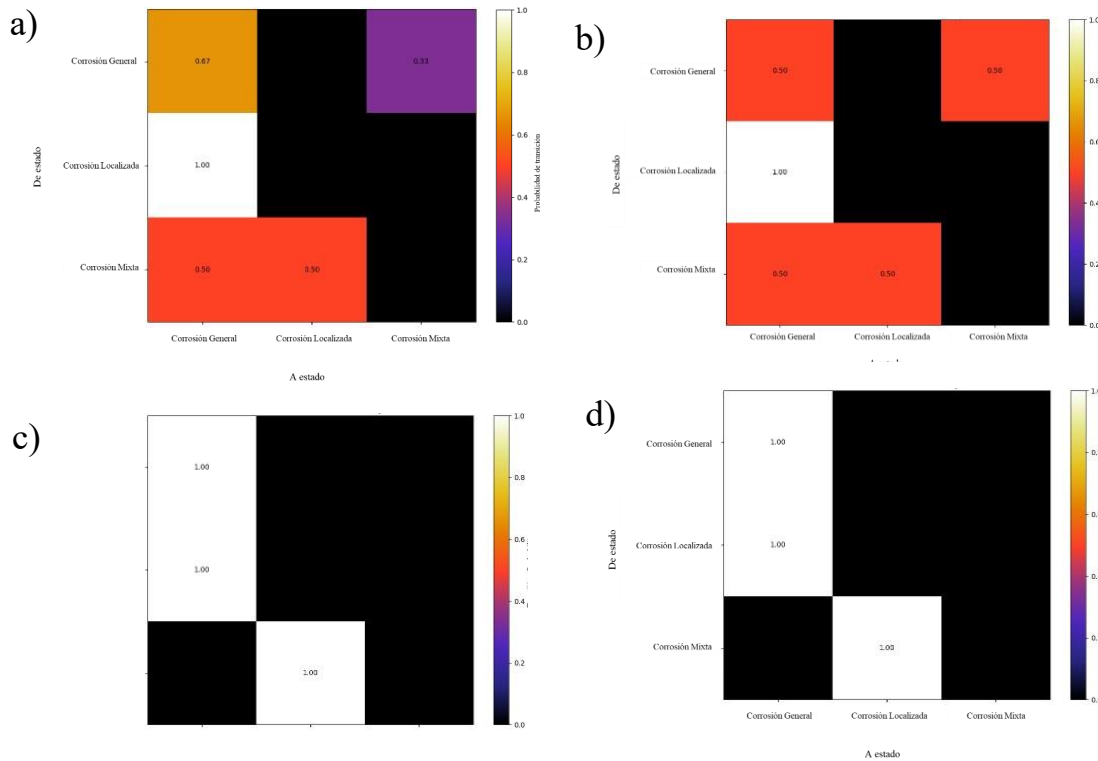


Ilustración 4. Probabilidades de transición 6061. a) penalización = 2, b) penalización = 8, c) penalización = 16, d) penalización = 24

Con respecto a la densidad de probabilidad de observaciones (puntos) en la ilustración 5 se puede denotar que en el caso de segmentaciones con penalizaciones de 2 y 8 se tiene una distribución idéntica. Esto debido que a ambos poseen la misma cantidad de datos en sus tipos de corrosión identificados, diferenciándose únicamente en que en el caso a) se tienen dos segmentos finales de corrosión general separados, y en el caso b) estos se ven fusionados en uno solo.

En la figura 5 a) y b). se puede observar una concentración media inicial de corrosión general la cual comparte probabilidades con la corrosión mixta en un grado menor. posteriormente, entre los intervalos de 400 a 600, se observa una alta concentración de corrosión localizada, lo que coincide con el cambio de los segmentos dos y tres en ambos casos, mostrando un incremento significativo en la actividad, consistente con la distribución presentada.

En los segmentos finales, se presentan distribuciones equitativas entre corrosión localizada y mixta, con un ligero incremento hacia el final que culmina en una probabilidad variable

para corrosión general. Los espacios sin valores (representados como negativos) reflejan la ausencia de datos clasificables dentro de los estados definidos.

En los casos de segmentación con 16 y 24 segmentos se tienen distribuciones idénticas, lo cual se debe a que ambas segmentaciones generaron la misma cantidad de segmentos y puntos asignados a cada uno. Estas iteraciones produjeron únicamente cuatro segmentos, lo que resalta diferencias más marcadas en las distribuciones, ya que menos datos compaginan con otros tipos de corrosión.

La corrosión general presenta la densidad más baja, atribuido a la alta difusión en sus segmentos, mientras que en corrosión localizada se tiene un segmento más corto pero mayor y más poblado, compartiendo valores bajos con la corrosión mixta. Finalmente, la corrosión mixta es la que presentó la mayor concentración, podemos atribuir esto a que dicho segmento posee la mayor cantidad de datos estables.

Las principales diferencias notables entre los casos a) y b) y los que se presentan en c) y d) pueden ser atribuidos a lo siguiente:

- En las primeras iteraciones se generaron una mayor cantidad de segmentos con actividades notables de corrosión diferentes, en ellas los segmentos 3 a 5 presentan corrosión general y mixta, mientras que en las iteraciones de mayor penalización dichos segmentos son fusionados y catalogados únicamente como corrosión general, esto genera que la interpretación de los datos y sus subsecuentes cálculos sean realizados diferente.
- En el caso a) y b) la corrosión mixta tiene dos segmentos, el inicial de baja variabilidad y el segmento 4 de alta variabilidad. Esto genera que los cálculos de corrosión mixta consideren ambos potenciales valores en la densidad de probabilidad mientras que en el caso c) y d) solamente tenemos un único segmento de corrosión mixta, perdiéndose de los datos de alta variabilidad.
- Los cálculos de corrosión general presentan mayores concentraciones en los casos a) y b) debido a que mientras poseen más segmentos que c) y d), tienen menos datos. Esto debido al segmento 5 de corrosión mixta en los primeros casos es fusionado con corrosión general en las subsecuentes iteraciones, haciendo notar que este segmento en particular juega un rol crucial en la interpretación de datos. Su ausencia de la

corrosión general en los primeros casos lleva a una mayor densidad de probabilidad, mientras que incluirlo resulta en un decremento en corrosión general y un aumento en corrosión mixta. El causante de esto se encuentra reservado a que la corrosión general presente posee mayores variabilidades, mientras que la corrosión mixta no. Si este segmento de corrosión mixta en los casos a) y b) es considerada como general, esto reduce la cantidad de datos para los cálculos mixtos, centrando sus resultados únicamente en el segmento inicial estable, reflejado por la alta concentración en su lugar.

- En el caso de corrosión localizada se puede ver que para todos los casos la figura general es muy parecida, sin embargo, en a) y b) tenemos una concentración alta compartiendo ciertos datos con corrosión mixta y levemente corrosión general mientras que en c) y b) esta se ve reducida y aislada. Considerando que en todas las iteraciones de segmentación realizadas se tiene un solo segmento de corrosión localizada de la misma cantidad de datos en todos los casos. Es así que podemos observar que los diferentes segmentos afectan directamente los cálculos de este estado, comprobado así que estos tienen una relación estrecha entre ellos. El motivo por este cambio y diferencias es entonces, nuestro segmento de corrosión mixta de los casos a) y b)

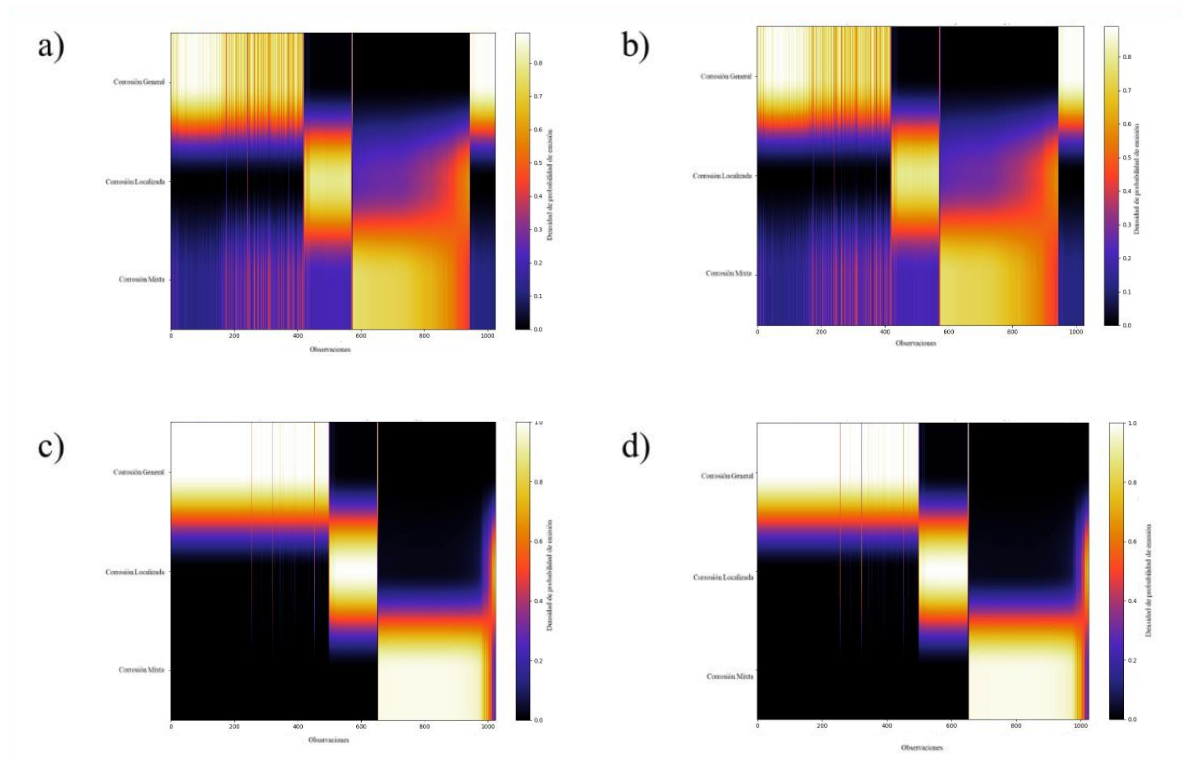


Ilustración 5. Densidad de probabilidad de observaciones 6061. a) penalización = 2, b) penalización = 8, c) penalización = 16, d) penalización = 24

La ilustración 6 muestra las predicciones de estados realizados por el modelo HMM. En la figura a) presentamos inicialmente intervalos de corrosión general y localizada de baja duración, los cuales pasan a convertirse en predominantemente corrosión general, teniendo hasta el final ciertos puntos de corrosión mixta intercalados en la señal, donde podemos ver un incremento en la presencia de corrosión localizada focalizándose al final de la prueba. De acuerdo con los resultados, el 89.84% de los datos pertenecen a corrosión generalizada, teniendo en menores porcentajes corrosión localizada y mixta, 5.08% respectivamente. Esto coincide con los resultados globales calculados a un inicio.

En la figura b), se puede observar un cambio notable con respecto al caso anterior. En esta iteración, la corrosión general abarca un 30.40% de los datos, mientras que la corrosión localizada y mixta representan un 33.30% respectivamente. Analizando la trayectoria y desarrollo de la señal, se identifica que el inicio está dominado por corrosión mixta, seguido de una transición con puntos alternantes entre los diferentes tipos de corrosión. Es importante destacar que la reconstrucción de los estados no necesariamente debe coincidir de forma

idéntica de la segmentación inicial; sin embargo, en este caso, se observa que la primera región antes del cambio alrededor de los 380 segundos coincide con el segmento de corrosión mixta identificado por el método PELT.

En las figuras c) y d), se presenta una reconstrucción de la señal dominada casi por completo por corrosión general, representando el 99.80% de los datos analizados. Por su parte, las proporciones de corrosión localizada y mixta son mínimas, alcanzando únicamente un 0.10% cada una.

Tomando en cuenta los resultados de reconstrucción de la señal, los resultados globales, y los segmentos generados, podemos observar que las iteraciones de penalización de 16 y superiores (*caso c y d*) tienden a simplificar excesivamente la señal a causa de falta de información adicional en comparación con las penalizaciones más bajas.

En el caso a) se generan segmentos excesivos, lo que se traduce en un comportamiento redundante que solo logra capturar los inicios de cambios en la señal. Los resultados con mayor aportación de información relevante es entonces del caso b); este nos muestra un mayor índice de comportamientos presentes en la señal sin embargo se ve limitado con respecto a las proporciones asignadas de corrosión mixta y localizada, atribuyendo esto a la categorización de corrosión mixta, cuyos componentes se encuentran en el límite con corrosión generalizada. Tras ponderar estos resultados, se procede a incrementar la cantidad de iteraciones a 4,000 para realizar un refinamiento adicional sobre la segmentación del caso b)

Los resultados presentados en la Ilustración 7 evidencian una distribución más equilibrada entre los tipos de corrosión. La corrosión general abarca el 73.05 % de la señal, manteniéndose como el comportamiento predominante. Por otra parte, la corrosión localizada y la corrosión mixta representan un 13.48 % cada una. Esta distribución sugiere una posible relación entre los eventos de corrosión mixta y localizada dentro de la señal analizada.

El desarrollo de la trayectoria comienza con un predominio de corrosión mixta, seguido de un incremento repentino atribuido a corrosión localizada. Posteriormente, la corrosión mixta retoma su predominancia hasta que es desplazada por la corrosión localizada. A partir de este

punto, la corrosión general se convierte en el comportamiento predominante, con eventos aislados de corrosión localizada y mixta hacia el final de la prueba.

Este comportamiento, en concordancia con el tipo de ensayo realizado, sugiere que el material pudo haber atravesado un proceso de pasivación posterior al primer incremento significativo, lo cual habría limitado el ataque a una forma más generalizada. No obstante, hacia el final de la prueba se detecta una posible degradación parcial o total de la capa pasiva, lo que permitiría el resurgimiento de mecanismos de corrosión localizada.

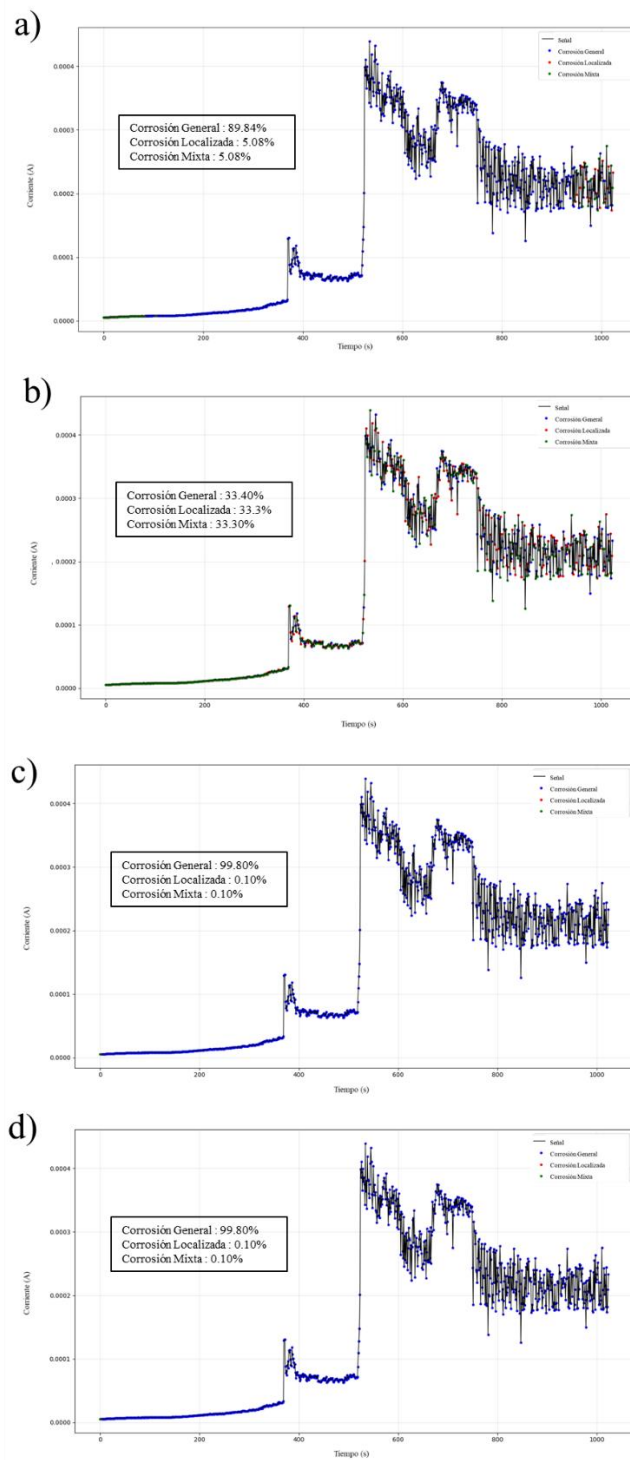


Ilustración 6. Predicción de estados ocultos 6061. a) penalización = 2, b) penalización = 8, c) penalización = 16, d) penalización = 24.

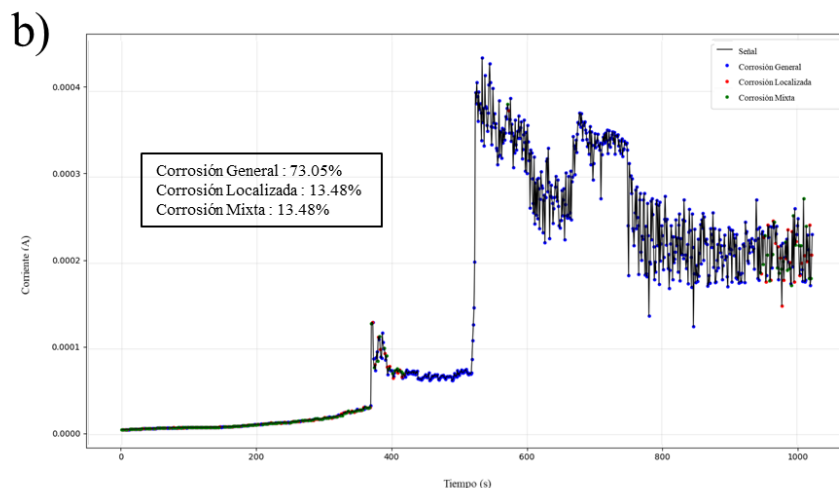


Ilustración 7. Predicción de estados ocultos AA6061 con penalización = 8 a 4000 iteraciones

La siguiente señal pertenece a la aleación $\text{Ti}-\beta$ en condiciones naturales expuesto a un electrolito de H_2SO_4 al 1.8%M. Los resultados globales por el método tradicional fueron de 0.0012 en sesgo y -0.5347 de kurtosis, que la cataloga como corrosión general. De acuerdo con el índice de localización de 0.00120 se asocia con corrosión general.

La segmentación se llevó a cabo con los valores de penalización de 2, 4, 6, y 16, visualizados en la ilustración 8. En la primera instancia empleando una penalización de 2 se generaron un total de 11 segmentos. El segmento primicio correspondió a corrosión localizada con una longitud de 30 puntos, dentro de los cuales se presenta una variación drástica. Los segmentos posteriores en el rango de 2 al 7 ostentan consecutivamente corrosión general, cuya cantidad de datos corresponden individualmente a 85, 45, 45, 50, 50, y 105 puntos. El octavo segmento fue categorizado con corrosión mixta con 135 puntos, y los subsiguientes noveno y décimo segmentos presentaron consecutivamente corrosión general, cada uno con 35 y 65 datos respectivamente. El segmento conclusivo presentó corrosión mixta, teniendo un total de 379 puntos, siendo este el segmento individual más largo. En total, se presentaron 480 datos de corrosión general con 6 segmentos, 30 datos de corrosión localizada con un segmento singular, y 514 datos de corrosión mixta con 2 segmentos.

Siguiendo con la partición resultante al emplear una penalización de 4, se obtuvieron 9 segmentos. Al igual que en la instancia anterior, el primer segmento se cataloga como

corrosión localizada, pero a diferencia de la anterior versión, esta tiene un incremento en su longitud, teniendo un total de 80 datos. Repitiendo el patrón anterior se tienen 4 segmentos consecutivos de corrosión general, con 80, 45, 60, y 145 puntos, difiriendo significativamente del caso a). Los segmentos 6, 7-8, y 9 mantienen una secuencia idéntica de categorías que los segmentos 8, 9-10, y 11 de la iteración anterior, portando la misma cantidad de datos. En esta segmentación se presentaron 6 segmentos de corrosión general con 430 datos, un segmento singular de corrosión localizada de 80 datos, y finalmente 2 segmentos con 514 datos de corrosión mixta. Al comparar estos resultados con los anteriores se aprecia un incremento en la cantidad de datos de corrosión localizada y un decremento en corrosión general.

Analizando ahora la segmentación con un valor de penalización de 6 se generaron 7 segmentos. Al igual que los anteriores, el segmento primigenio corresponde a corrosión localizada, teniendo un incremento en su longitud de datos, teniendo ahora 140. Los consecuentes bloques del 2 al 4 son pertenecientes a la corrosión general, poseyendo 65, 60, y 145 datos respectivamente. El quinto segmento presenta corrosión mixta con un total de 135 datos siendo congénere con el segmento 6 del caso b) y segmento 8 del caso a). El siguiente segmento resultante se trata de corrosión general con 35 datos, y finalmente el último corresponde a corrosión localizada teniendo 444 datos. En esta variante particionaria la corrosión localizada toma la dominancia con un total de 584 datos pertenecientes al conglomerado de 2 segmentos. La corrosión general tiene un total de 305 datos en 4 segmentos, y finalmente corrosión mixta con 135 datos en un segmento singular.

En la segmentación restante con 16 de penalización se detectaron 6 segmentos. El primero corresponde a corrosión mixta teniendo un total de 180 datos. En las versiones anteriores este primer segmento pertenecía a corrosión localizada sin embargo el incremento en su cantidad de datos ha generado un cambio hacia corrosión mixta. El segundo y tercer segmento consisten en corrosión general cada uno con 75 y 150 datos. El cuarto segmento corresponde a corrosión mixta con una longitud de 140 datos. El quinto segmento se trata de corrosión general con un total de 35 puntos, siendo este el más pequeño de la segmentación, y finalmente se tiene corrosión mixta con un total de 444 datos. En esta iteración se obtuvieron tres segmentos de corrosión general portando 260 datos, un segmento único de corrosión

localizada el cuál abarca la mayoría de los datos con 444, y finalmente dos segmentos de corrosión mixta con 320 datos.

En los tres primeros casos se puede ver un patrón repetitivo del orden en el cual se detectan y tipifican el tipo de corrosión, divergiendo en la cantidad de datos correspondientes a cada uno. La semejanza en comportamiento se pierde con el último caso, en el cual el primer tipo de corrosión se considera como corrosión mixta. Posterior a esto el patrón vuelve a ser retomado.

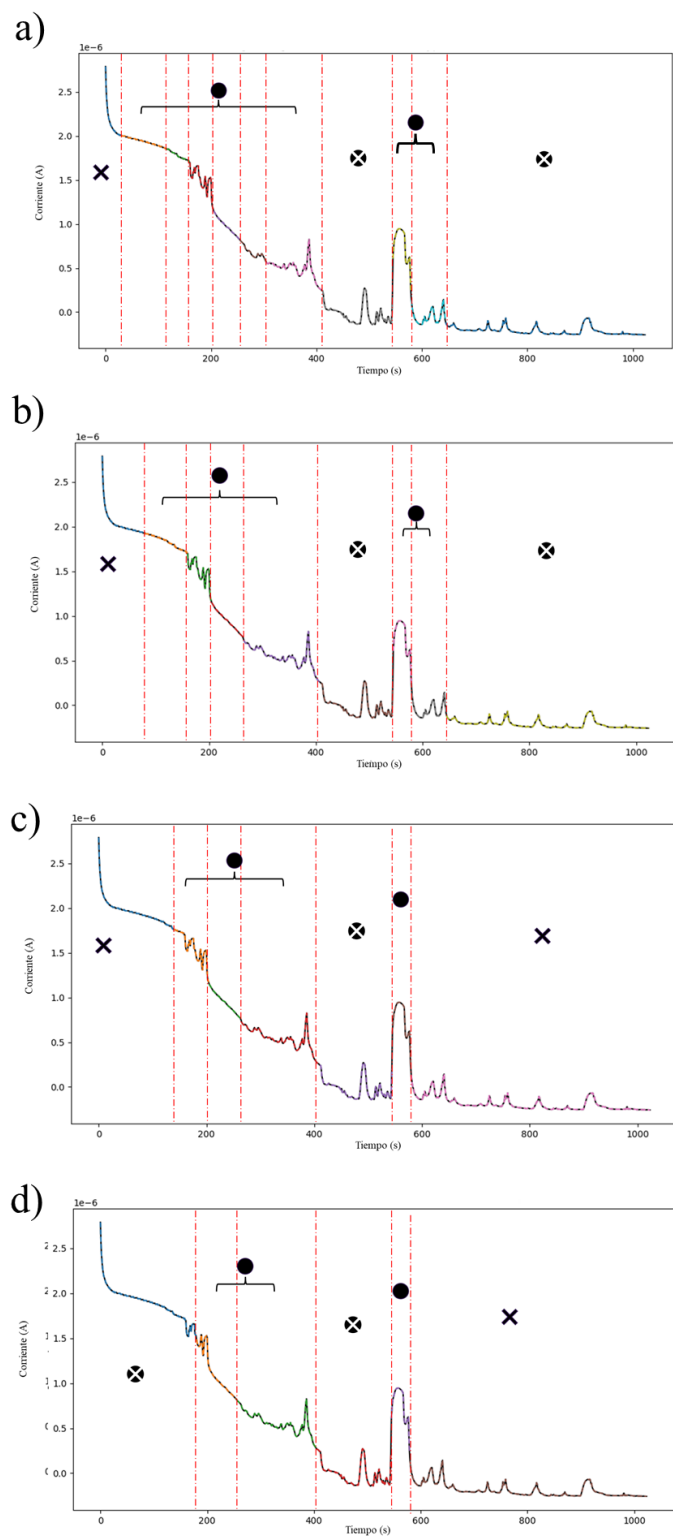


Ilustración 8. segmentación de señal RE de Ti- β . a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 6, d) penalización = 16.

Las probabilidades de iniciación para las primeras tres iteraciones se presentaron constantes, habiendo identificado a corrosión localizada como la categoría más probable para el inicio del proceso corrosivo, presentando esto en la forma vectorial de:

$$[0 \quad 1 \quad 0]$$

Dónde las columnas representan, en orden, corrosión general, localizada, y mixta.

En el caso de la segmentación con penalización de 16 se identifica el primer segmento como corrosión mixta, cambiando la probabilidad de iniciación a:

$$[0 \quad 0 \quad 1]$$

Ahora, observando la ilustración 9 a) durante la primera segmentación de penalización se obtuvieron un total de 10 transiciones. Su matriz de transición nos muestra qué al presentar corrosión general se tiene una mayor probabilidad de que esta se mantenga, representando el 0.75 de probabilidad. Dicho resultado refleja lo observado en la segmentación y sus múltiples dividendos consecutivos de esta categoría. Adicionalmente se calculó que, la transición de corrosión general a corrosión mixta tiene un 0.25 de probabilidad. La progresión de corrosión localizada a general, y mixta a general presentaron individualmente un valor entero de probabilidad habiendo en la segmentación únicamente dos instancias de lo prescrito. Los espacios negativos en nuestra matriz nos indican qué no se presentó transición alguna de algún estado hacia corrosión localizada, ni de corrosión localizada y mixta a esta última.

En la figura b) se puede visualizar un cambio relevante en las probabilidades presentes en la primera fila. Reparando que se redujeron la cantidad de segmentos, también disminuyeron la cantidad de transiciones. Partiendo de la corrosión general hacia sí misma se tiene una probabilidad de 0.67, mientras que pasar de corrosión general a mixta representa el 0.33 de probabilidad de transición. Este es el único cambio notable presente en comparación con el anterior.

Dirigiéndonos ahora a la figura c) en la cual se observó un decremento significativo en la detección de corrosión general y subsecuentemente, sus segmentos, tenemos una probabilidad de 0.50 de que corrosión general se mantenga en sí misma, presentando ahora partes iguales de probabilidad de que este estado pase a corrosión localizada o mixta de 0.25. el resto de las transiciones se mantienen iguales a los casos anteriores.

refiriéndonos al caso d) se tiene partes iguales de probabilidad de corrosión general al resto de los estados, con 0.33 de probabilidad. A diferencia de los anteriores, aquí nuestra probabilidad de corrosión localizada a general desaparece, propiamente debido a que el segmento inicial fue catalogado ahora como corrosión mixta. La transición presente del estado de corrosión localizada ocurre únicamente hacia sí misma. El resto de las transiciones se mantiene igual a las anteriores.

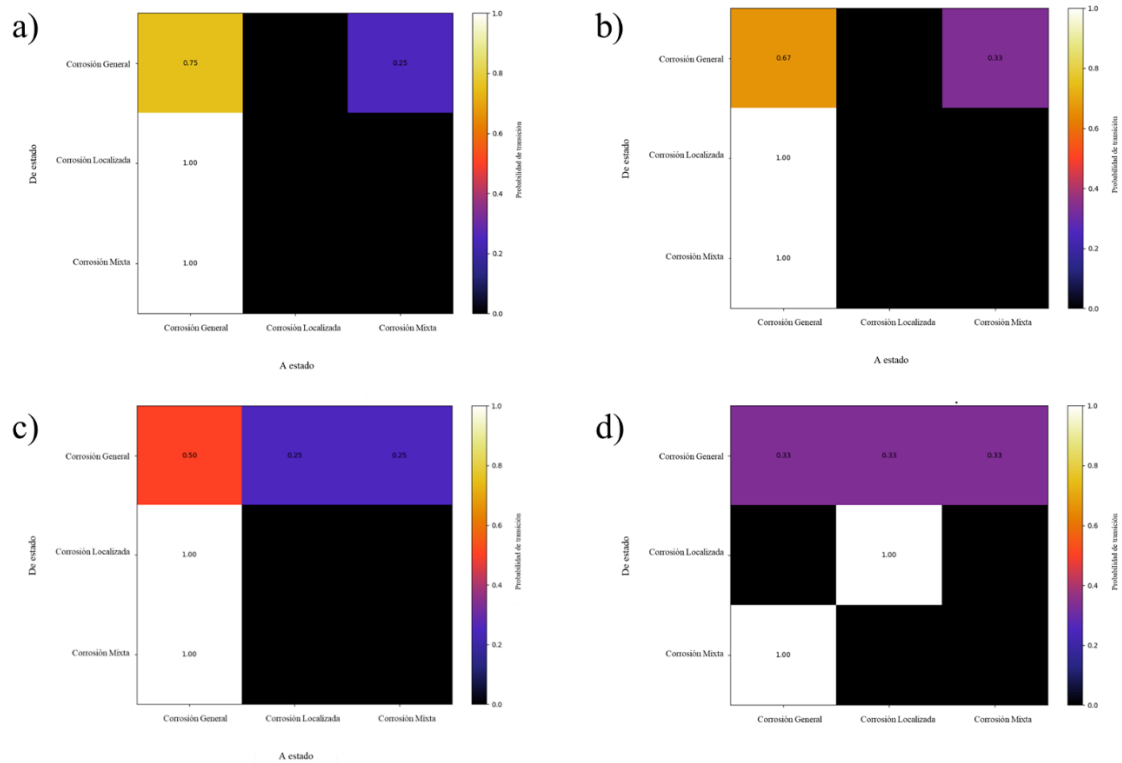


Ilustración 9. Probabilidades de transición $Ti-\beta$. a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 6, d) penalización = 16.

Enfocándonos en el siguiente componente, las densidades de probabilidad en el caso a) y b) presentan similitudes; las diferencias primordiales radican en el tamaño de las observaciones pertenecientes a la corrosión localizada, en las cuales durante la penalización de 4 se presenta un incremento en su longitud e intensidad. El motivo de esto se atribuye a la reducción de segmentos de corrosión general y el incremento en longitud del segmento de corrosión localizada.

El resto de la distribución permanece con un comportamiento similar, donde se inicia con una concentración media en corrosión localizada la cual se atenúa de manera radial. La

corrosión general mantiene una alta concentración de densidad aglomerada en su gran mayoría en los intervalos iniciales hasta los 400 puntos, posteriormente se presentan esporádicamente en segmentos cortos.

La corrosión mixta posee las densidades de mayor duración, concentrándose a partir de los 500 puntos teniendo un breve inicio antes de la corrosión localizada. Dichas densidades comparten una baja densidad con la corrosión localizada.

En la iteración c) se puede ver un cambio radical en los bloques iniciales. Primero se tiene una concentración media-alta en corrosión general, de la cual observaciones iniciales se ven yuxtapuestas con corrosión localizada con intensidades medias a bajas con intervalos separados. Posteriormente se puede ver un segmento concentrados en corrosión localizada con ciertos datos de baja a media intensidad compartidos en corrosión general.

A partir de dicho segmento el enfoque principal se encuentra en corrosión mixta con la porción más grande con altas intensidades. Adicionalmente se puede apreciar estelas de mediana a baja densidad que comparte con corrosión localizada, y líneas individuales con corrosión general.

Finalmente, en la iteración d) inicia con un segmento corto de alta intensidad de corrosión mixta seguido de baja densidad, los cuales se yuxtaponen con corrosión general, el cual mantiene un segmento inicial estable con poca variabilidad. Posteriormente se tiene un segmento continuo en los intervalos centrales en los cuales se tiene altas concentraciones con disminuciones radiales hacia ambos tipos de corrosión vecinos, posteriormente se tienen datos de alta concentración en corrosión mixta, aludiendo su exclusividad de datos y posteriormente tenemos segmentos variados de principalmente corrosión localizada.

En base a los resultados, se puede interpretar lo siguiente:

- En los casos a) y b) se puede atribuir el crecimiento de la cantidad de observaciones en la corrosión localizada debido al propio incremento en el segmento inicial de dicha categoría. Adicionalmente la reducción en corrosión general parece tener efectos si bien notables, no tan drásticos en las observaciones iniciales, y no parece afectar en los propios valores de densidad de probabilidad, manteniéndose en el rango bajo.

- El cambio en el comportamiento de la corrosión general en la iteración c) se debe a su reducción de segmentos, reflejado también por una reducción en su probabilidad de transición. Dicho evento demuestra una menor probabilidad de observaciones pertenecientes a este tipo de corrosión, presentando difusión hacia corrosión localizada con la cual presenta probabilidades de existir en esos mismos datos.
- El decremento de segmentos de corrosión mixta tiene un considerable efecto, dónde nos muestra cómo los datos que antes eran pertenecientes al último segmento de corrosión mixta, ahora pertenecen a corrosión localizada, y que precisamente estos datos son realmente considerados tanto para corrosión localizada como general.
- Con esto se puede considerar que dicho caso presenta una visión más certera a un caso real, puesto que no generaliza o globaliza los resultados en altas concentraciones de un solo tipo.
- Con respecto al caso d) se ven patrones más estables y segmentados en los cuáles iniciamos con comportamientos similares a los del caso a) y b) con respecto a la corrosión general, sin embargo, en la presente iteración estos tienen mejor intensidad. Se presenta antes una estela de corrosión mixta breve de alta intensidad, compartiendo datos con la corrosión general en menor grado. En dicho caso se recuerda qué la corrosión general presenta la menor cantidad de segmentos con respecto a sus contrapartes, con lo cual se puede aseverar como el motivo de la pérdida de intensidad.
- El comportamiento observado en corrosión mixta y su alta concentración en los intervalos finales se debe a qué el segmento final de la segmentación es considerado como corrosión localizada, mientras que el primer y cuarto segmento son corrosión mixta. Esto resulta en una alta concentración de corrosión mixta donde previamente se atribuía a corrosión localizada.
- La concentración central se encuentra en la corrosión localizada con segmentos de alta densidad con disminuciones radiales hacia la corrosión general y localizada, presentando dos segmentos de alta densidad con corrosión mixta, cuya densidad decreciente con respecto a los otros dos tipos.

- La reducción de intensidad en la corrosión mixta parte del primer segmento; al procesar ambos segmentos de corrosión mixta sus valores tienden a la reducción de la densidad de probabilidad debido a sus diferencias de datos, reflejando la alta importancia que este primer segmento tiene en los cálculos.

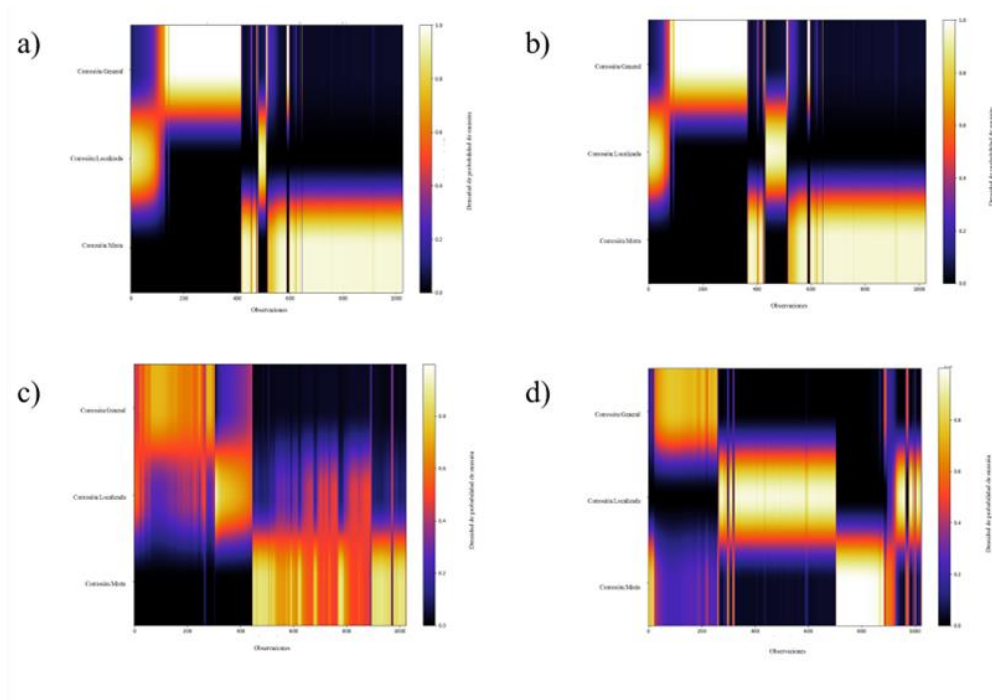


Ilustración 10. Densidad de probabilidad de observaciones Ti-β . a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 6, d) penalización = 16.

Pasando a la reconstrucción de los estados detectados más probables y su trayectoria, en la ilustración 11 iteración a) se puede observar un comportamiento predominante general con el 76.66% de la señal, presentando instancias negligentes de corrosión localizada del 0-10% y posteriormente a la altura de los 400 segundos fluctuaciones de corrosión mixta que incrementan hasta el final de la señal representando el 23.24%. Estos resultados se mantienen alineados con los resultados globales.

En la versión b) se puede observar que la corrosión general incrementó a un 99.90%, mientras que la corrosión localizada se mantuvo con un 0.10% y la corrosión mixta 0%. Si bien el comportamiento dominante refleja la realidad, estos resultados nos muestran que la segmentación con penalización de 4 no puede detectar adecuadamente los mecanismos detallados que ocurren a lo largo de la serie.

La penalización de 6 correspondiente con la figura c) tiene una mejor interpretación del sistema que el anterior, en donde presenta corrosión localizada con fluctuaciones de corrosión general hasta una altura de 470 datos, a partir de la cual se tienen fluctuaciones de corrosión localizada con mixta. En esta reconstrucción la corrosión general representa el 50%, la corrosión localizada el 23.24%, y la corrosión mixta el 26.76%. La corrosión mixta es muy parecida al caso a) donde se tenía el 23.24%, sin embargo, en esa primera instancia la corrosión localizada no es detectada a lo largo de la señal, mientras que en la actual sí.

La última penalización con un valor de 16 (el más elevado) presentó una reconstrucción que no se apega al resultado global o esperado, al haber detectado corrosión localizada como la más alta con un 74.80%, mientras que corrosión general y mixta tienen ambos 12.60% en base a las reconstrucciones anteriores y los resultados, se puede afirmar que el uso de penalizaciones de y mayores a 16 no son viables.

Considerando los resultados más certeros en los casos a) y c) estos serán refinados a 4000 iteraciones para observar los subsecuentes patrones existentes. En el primer caso, se tuvo un resultado mayoritariamente de corrosión general con el 93.16%, detectando pocas instancias de corrosión mixta con 6.74%, y corrosión localizada de 0.1%.

En el caso c) se puede detectar corrosión general al 50.00%, con índices de corrosión localizada del 9.86% y corrosión mixta del 40.10%. Estos resultados nos muestran en la figura una trayectoria más certera en el transcurso de los datos; la corrosión general se mantuvo igual a previo antes de la refinación, mientras que incrementó la corrosión mixta, indicando que estas instancias previamente detectadas como localizadas son, en realidad, corrosión mixta.

En base a los resultados observados se puede determinar lo siguiente:

El refinamiento del caso a) decrementa su capacidad de detección de eventos corrosivos en la señal acorde a la ilustración 11 muestra mejores resultados en este punto, sin embargo generaliza muchos datos pertenecientes a corrosión mixta como corrosión general. Esto es reforzado por los resultados del caso c) y sus resultados refinados. En ellos la corrosión mixta tiene una mayor presencia durante los segmentos medio y finales. El refinamiento mostró un

decremento en corrosión localizada en ambos casos, así como en los resultados a) b) y c) de la figura 11. Esto confirma que dichos eventos son aislados y mínimos, pero presentes.

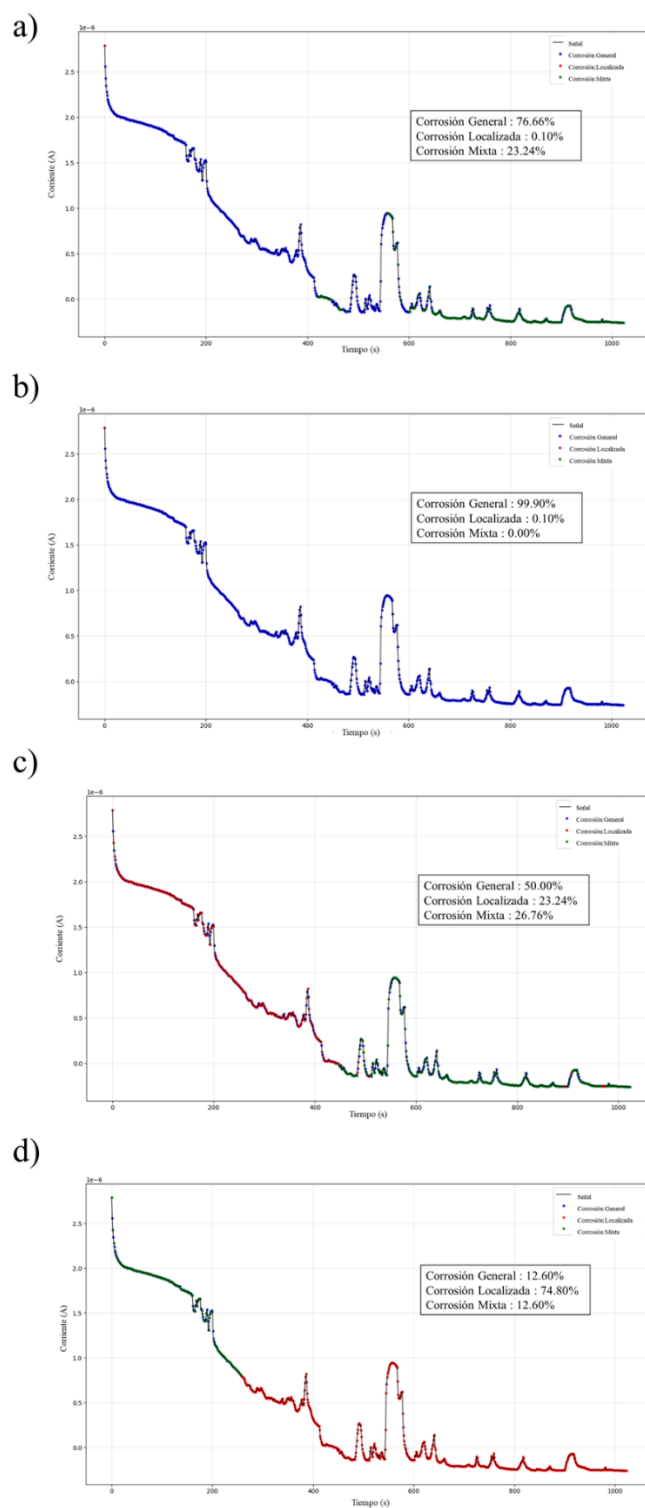


Ilustración 11. Predicción de estados ocultos Ti- β . a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 6, d) penalización = 16.

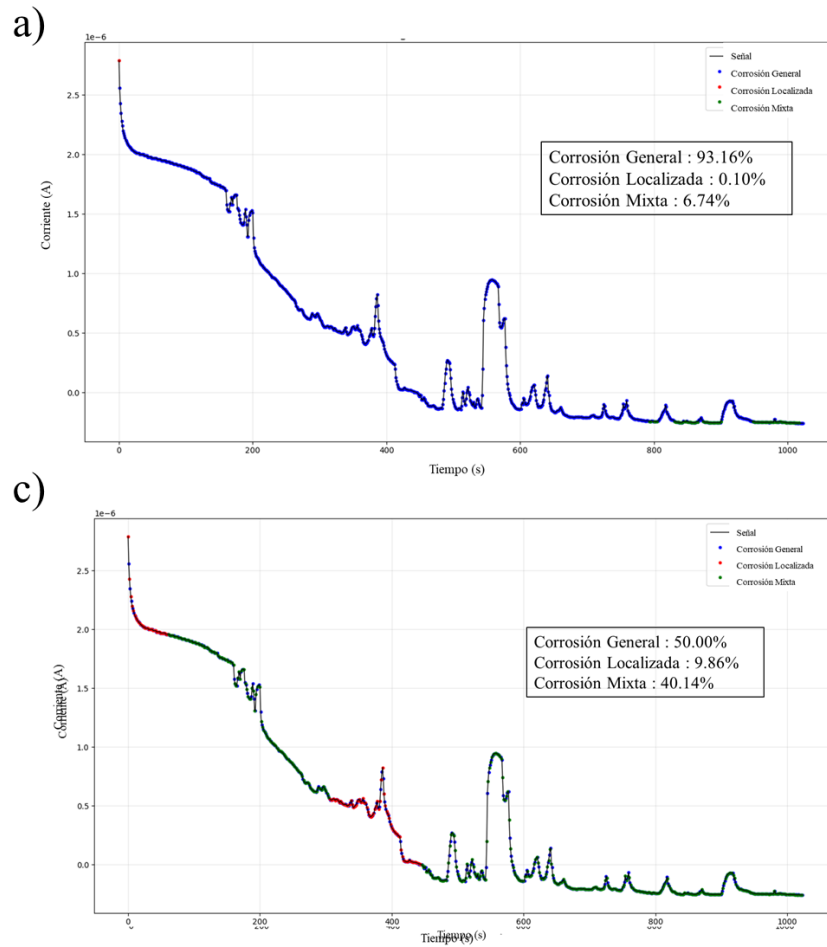


Ilustración 12. Predicción de estados ocultos $Ti-\beta$ a) penalización = 2, c) penalización = 6, a 4000 iteraciones

4.1.2 Señales de baja variabilidad

La señal seleccionada corresponde a una muestra de AA2055 en condiciones recibidas, expuesta a un electrolito de NaCl al 3.5%. Los resultados obtenidos por metodología tradicional de sesgo y curtosis presentan valores de 2.4432 y 6.3412, respectivamente, lo que la clasifica como un caso de corrosión localizada.

En las primeras iteraciones a), b), y c) presentan toda enteramente corrosión general, teniendo 12, 11, y 9 segmentos respectivamente. Esto puede ser atribuido a la estabilidad que presenta la señal, sin diferencias clasificables entre los segmentos cuando utilizamos penalizaciones unidígito.

Con una penalización de 16, observamos un cambio notable en la segmentación. Aquí, los primeros segmentos, que abarcan desde el inicio del análisis hasta el punto 525, son clasificados como corrosión general. Esto refleja cómo el modelo segmenta y clasifica los datos basándose en variaciones más sutiles que pueden no ser evidentes a simple vista.

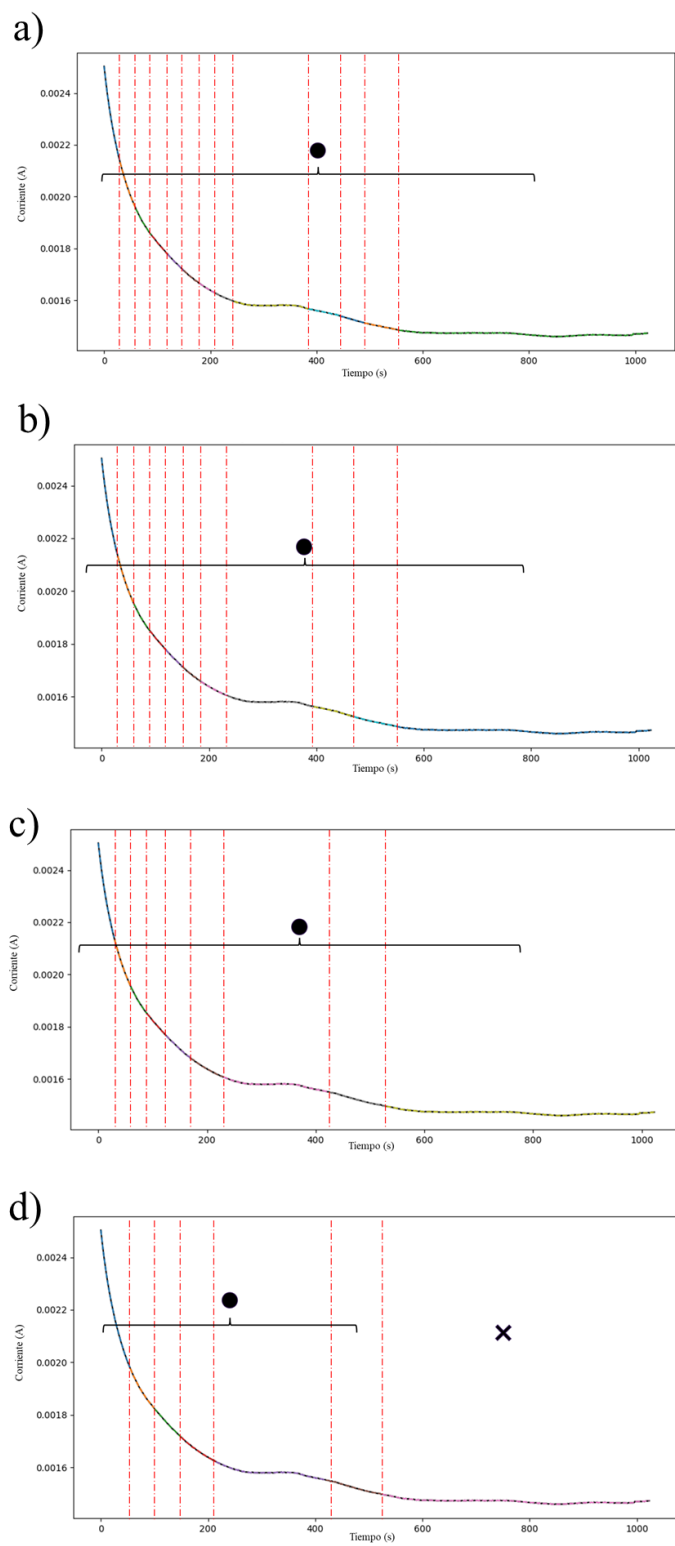


Ilustración 13. segmentación de señal RE de AA2055 . a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 8, d) penalización = 16.

Las probabilidades de iniciación para las primeras tres iteraciones fueron idénticas, habiendo identificado a corrosión generalizada como la categoría más probable para el inicio del proceso corrosivo, y la única presentando esto en la forma vectorial de:

$$[1]$$

En la última segmentación se presentó corrosión general como el tipo de corrosión más probable de iniciar, presentándose esto de la siguiente forma:

$$[1 \quad 0]$$

Dónde cada columna representa corrosión general y mixta.

Observando la ilustración 14, se puede verificar las transiciones presentes y sus respectivos valores. Dado a que en las iteraciones a), b), y c) se tuvo un solo tipo de corrosión detectada, esta solo posee la probabilidad de pasar de corrosión localizada, a sí mismo. En el caso de la iteración d) presentamos un cambio. En él que se denota que la presencia del segmento de corrosión mixta ha generado cambios significativos. La probabilidad de que la corrosión general se mantenga en dicho estado se mantiene como superior, representando el 83%, mientras que la transición de corrosión general a corrosión mixta mantiene un 17%. En el caso de corrosión mixta, se tiene partes iguales de transición hacia corrosión general o corrosión mixta del 50%.

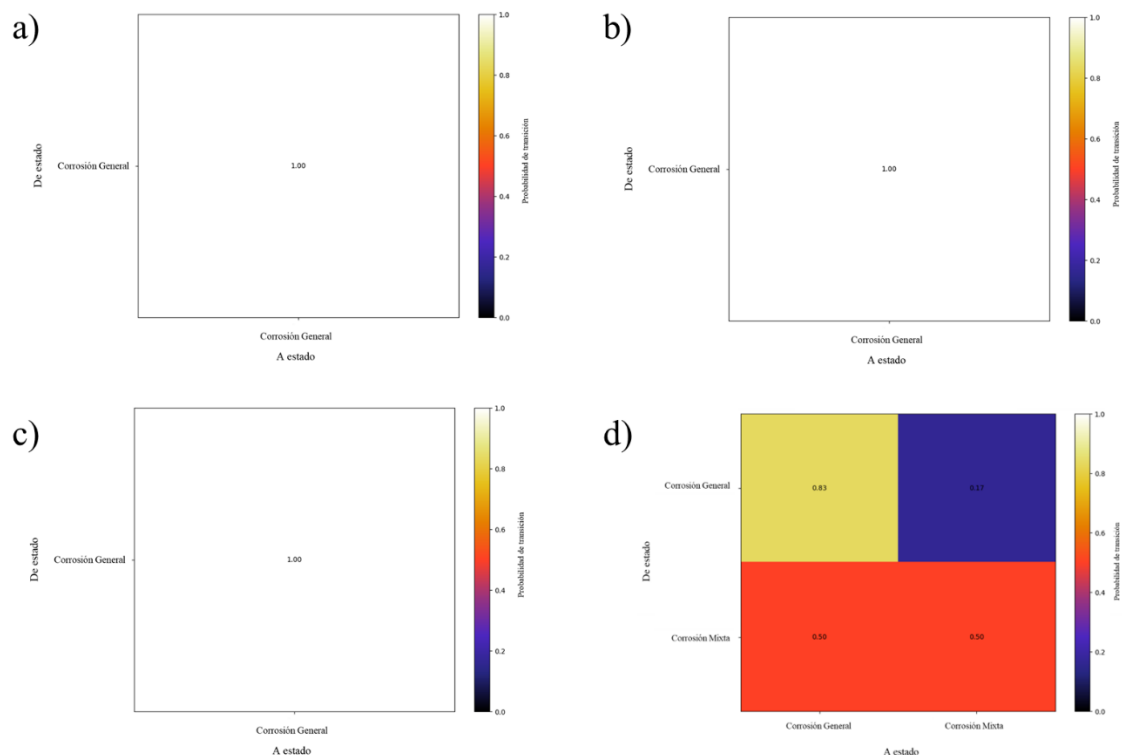


Ilustración 14. Probabilidad de transición AA2025 a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 8, d) penalización = 16.

Prosiguiendo con el análisis de las densidades de probabilidad obtenidas podemos ver reflejado el comportamiento de las probabilidades de transición, dónde las primeras tres iteraciones son de valores idénticos. En ella se puede ver distribuciones de valores totales para cada valor de observación, puesto que su segmentación no presentó variabilidad alguna, reduciendo su cálculo a absolutos.

En el caso de la iteración d) se puede ver los grupos marcados donde las primeras observaciones recorren hasta los 520 datos pertenecen en altas concentraciones a corrosión general, presentando una estela de menor densidad que se sobrepone con la corrosión mixta. Posteriormente la concentración se centra en la corrosión localizada con estelas superiores que se sobrepone en corrosión general a lo largo del segmento, teniendo un punto de interés compartido entre las 820 a 880 observaciones, donde se tiene un ligero decremento en la densidad de probabilidad de corrosión localizada la cual es percible en la corrosión general con menor densidad de emisión.

A partir de estos datos se puede interpretar qué:

- Ambos casos entre la detección de corrosión general única y con una variante de corrosión mixta cambian drásticamente y afectan los posteriores cálculos que se presentarán a continuación.
- Comparando estos resultados a los previamente explorado en otras señales podemos apreciar que las segmentaciones siempre estarán sujeto a una correcta segmentación que logre encapsular los eventos presentes. Una segmentación mayor o menor no necesariamente reflejan lo que realmente ocurre y debe de ser analizado en su totalidad para averiguarlo.

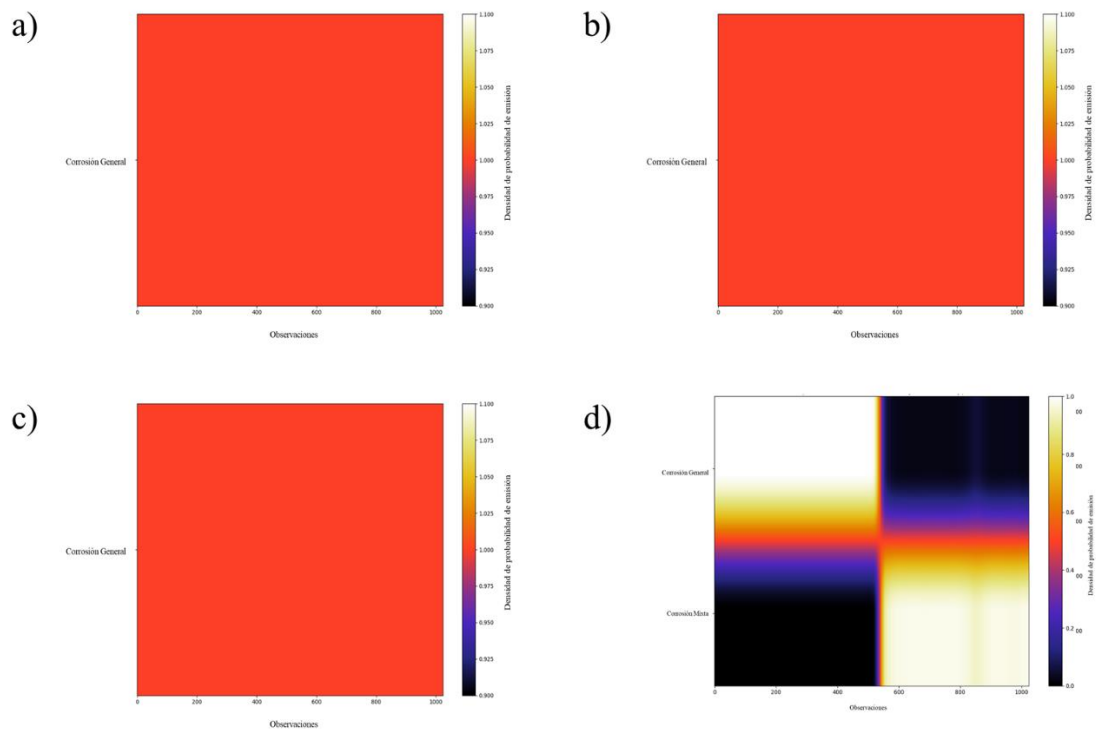


Ilustración 15. Densidades de probabilidad AA2055 a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 8, d) penalización = 16.

La reconstrucción de los eventos más probables según el modelo de HMM se presentan en la ilustración 16. En las primeras tres imágenes se puede observar que la reconstrucción de datos pertenece enteramente a los de corrosión general, lo cual se mantiene alineado con los resultados globales, así como los resultados presentes en la segmentación.

En la iteración d), se presenta un 20.61% de corrosión mixta al inicio de la señal, mientras que el resto de la señal se clasificó como corrosión general con 79.39%.

Para interpretar estos resultados es importante aclarar que los resultados de la segmentación y la reconstrucción no necesariamente deben coincidir de manera exacta, pero sí deben mantener una alineación lógica. Esto se debe a que la segmentación se centra en desglosar la señal para identificar y clasificar los tipos de corrosión de forma *independiente* en cada segmento. En contraste, la reconstrucción considera *dependencias temporales* para estimar la secuencia más probable de estados, basándose en las matrices de transición y las probabilidades iniciales establecidas en el modelo.

Las discrepancias entre la segmentación y la reconstrucción pueden deberse a varios factores, entre ellos:

- La priorización de las dinámicas de transición por parte del modelo.
- La influencia de las probabilidades de estado inicial.
- La alta complejidad de la señal analizada, que puede inducir interpretaciones diferentes.

En este caso específico, la penalización de 16 parece generar un resultado inconsistente con respecto a los comportamientos previamente observados, lo que sugiere que el modelo está sobre ajustando los datos. Este sobreajuste podría deberse a una segmentación excesivamente detallada que introduce ruido innecesario en la clasificación.

Por lo tanto, se puede concluir que las penalizaciones más bajas han demostrado ser más precisas en esta señal específica, ya que permiten una clasificación más coherente con el comportamiento general observado. En señales con baja variabilidad, es probable que solo se detecte un tipo de corrosión predominante, lo que indica que el modelo puede no aportar

información adicional significativa en estos casos. Sin embargo, el método sigue siendo útil para confirmar los resultados obtenidos mediante análisis tradicionales.

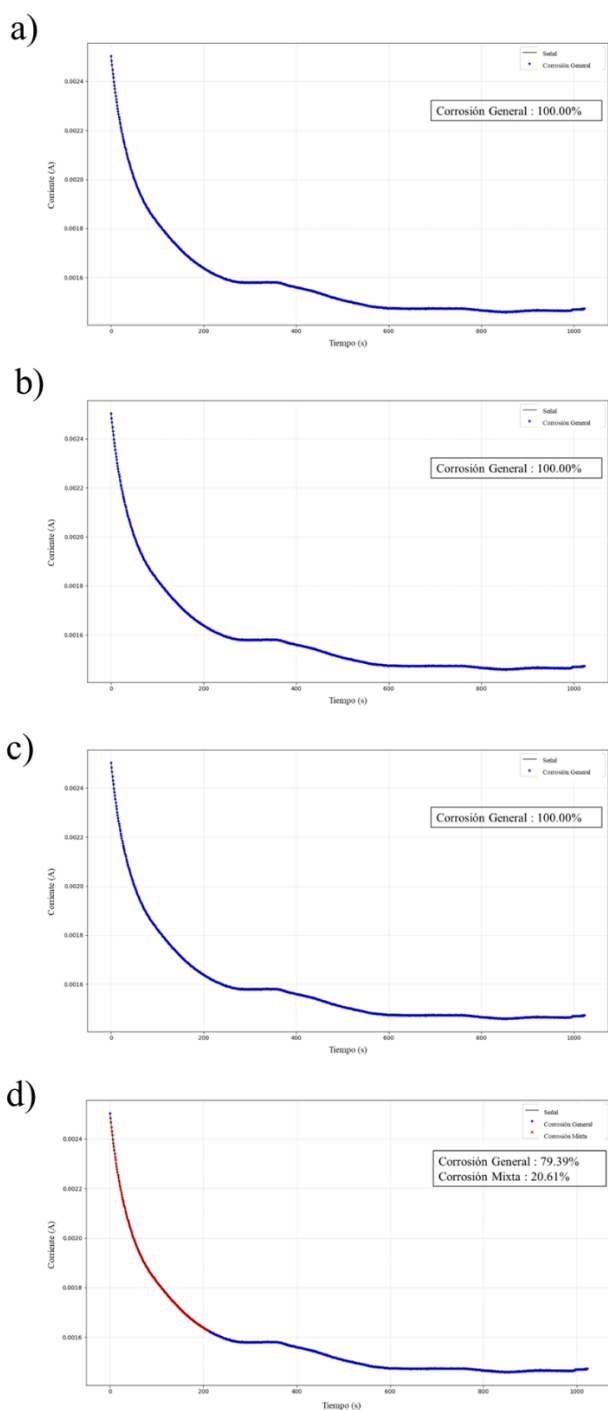


Ilustración 16. Predicción de estados ocultos AA2055 a) penalización = 2, b) penalización = 4, c) penalización = 8, d) penalización = 16.

4.2 Señales Múltiples

Se considera que se puede realizar una optimización y refinamiento de los resultados al evaluar múltiples señales al mismo tiempo. El ingreso y procesamiento de múltiples señales nos sirve para expandir el panorama de aprendizaje del modelo, alimentando más variables de datos que provean patrones, transiciones, y observaciones que puedan esclarecer posibles puntos que, previamente con una sola señal pudieran tener incertidumbres.

La base de datos a utilizar debe de ser curada cuidadosamente; siempre se debe de tener un conjunto de señales que presenten comportamientos razonablemente diferentes, para tener un buen enriquecimiento en el aprendizaje, sin embargo, no se deben de incluir señales excepcionalmente distantes a las que deseamos analizar, puesto que dichos resultados pueden sesgar el procesamiento de datos y rendir resultados de baja calidad.

Bajo esta consideración, si dicha señal atípica desea ser incluida, su análisis debe realizarse en conjunto con una serie de señales que, idealmente, correspondan al mismo material, en el mismo medio, y bajo las mismas condiciones de trabajo. Es importante señalar que, aunque estas recomendaciones proporcionan un marco general, la selección final de señales, así como su cantidad, dependen de la disponibilidad de datos y objetivo que tenga el investigador.

Como se había mencionado al inicio de esta sección y en el capítulo anterior, la base de datos total fue de 70 señales conformadas por materiales y electrolitos variados. Se considera que para generar una representación adecuada del análisis multi-señal no se emplearían todas, y en su lugar se generaría una colección aislada de 16 señales de aleaciones de aluminio las cuales fueron expuestas al mismo medio de NaCl al 3.5%. Recapitulando con la cantidad de señales, el agregar más siempre nos traerá una mejoría en el análisis, pero reglas de buena práctica nos indican que debemos tener, por lo menos, 10 veces los datos que deseamos analizar, por lo que 16 señales se consideran suficientes para generar resultados fructíferos.

La señal base que será explorada se trata de AA2055 con recubrimiento de anodizado en una mezcla de H_2SO_4 , H_3PO_4 , y $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$ por 30 minutos a temperatura ambiente expuesta a un electrolito de NaCl al 3.5%. Para generar la comparativa, se presentarán los resultados de análisis con la señal única, y multi-señal a una penalización de 2 para ambos casos. Los

resultados globales por el método tradicional fueron de -1.697 en sesgo y 1.203 de kurtosis, catalogándolo como corrosión general.

La segmentación para ambos casos será la misma. Se generaron 13 segmentos, iniciando con corrosión general el cuál fue repetido hasta el segmento 8. Los segmentos consecutivos representaron un total de 270 datos. Posteriormente en el segmento 9 presentamos un bloque de corrosión mixta con 30 puntos, seguido de 4 segmentos consecutivos de corrosión generalizada con 724 datos.

El total del desglose de segmentos correspondió en corrosión general un total de 994 puntos, mientras que corrosión mixta 30 puntos. Considerando los resultados del conglomerado de la metodología multi-señal, se obtuvieron 174 segmentos de corrosión general con 16,039 datos. En corrosión localizada se obtuvieron 974 datos con 5 segmentos, y 13 segmentos de corrosión mixta con un total de 1,419 datos.

Los resultados en esta fase demuestran que en el caso de una sola señal no se tienen datos algunos de corrosión localizada, habiendo identificado únicamente corrosión general y mixta. En el caso multi-señal si tenemos suficientes datos para percibir dicho tipo de corrosión faltante.

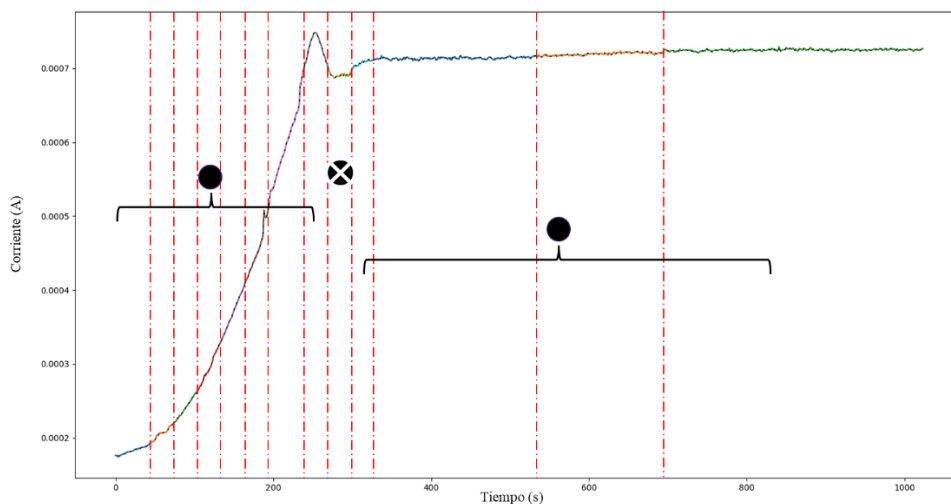


Ilustración 17. Segmentación AA2055 a penalización = 4

Con respecto a las transiciones, en el caso de una sola señal se presentó: transición de corrosión general a sí misma tuvo una probabilidad de 0.91, mientras que la transición de corrosión general a corrosión mixta se mantuvo en menor grado con 0.09. En el caso de corrosión mixta se tuvo únicamente la transición de corrosión mixta a corrosión general, valiendo este la totalidad de transición.

En el segundo análisis al tener una mayor cantidad de señales se lograron representar más transiciones. Iniciando con la corrosión general, su probabilidad de mantenerse en ese mismo estado es de 0.94, mientras que la probabilidad de transición a corrosión localizada es de 0.01, y la probabilidad de pasar de corrosión general a corrosión mixta es de 0.05.

Partiendo de corrosión localizada, su probabilidad de pasar a corrosión general es de 0.75, no teniendo probabilidad alguna de mantenerse en ese mismo estado. Posteriormente la probabilidad de pasar de corrosión localizada a corrosión mixta es de 0.25. El comportamiento de corrosión localizada y la falta de probabilidades donde se mantenga en sí mismo nos puede indicar que estos se presentan de manera aislada, y tras su aparición proceden a cambiar. Finalmente, en la corrosión mixta se tiene una probabilidad de 0.83 de transicionar a corrosión general, y partes iguales de pasar a corrosión localizada o mixta de 0.08.

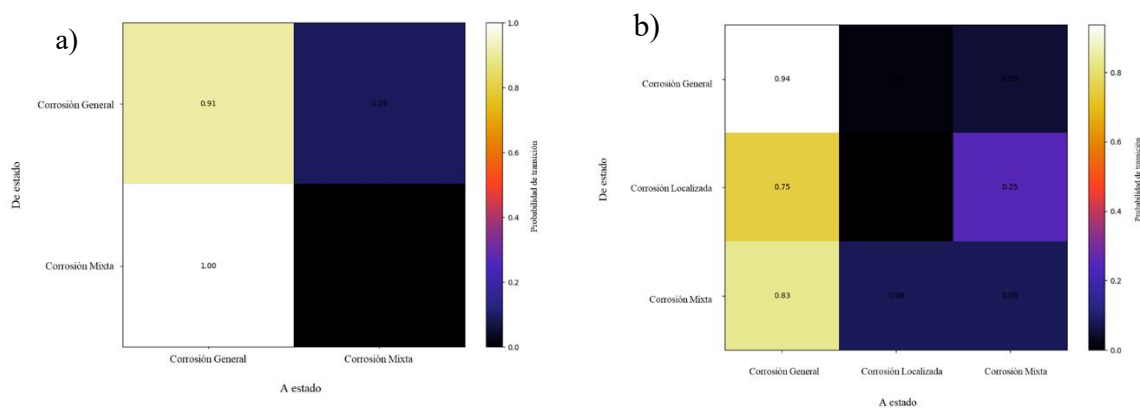


Ilustración 18. Probabilidades de transición AA2055. a) una señal, b) multiseñal

Revisando las densidades de probabilidad de emisiones calculadas podemos ver distribuciones muy diferentes. En el lado izquierdo correspondiente al análisis de la señal individual, se puede ver que la concentración absoluta se encuentra centrada en gran parte en la corrosión general, teniendo una reducción gradual hasta la parte superior de corrosión mixta, seguido de espacios negativos. Se observan dos destellos de alta concentración en corrosión mixta los cuales tienen una duración corta, y el segmento final de las observaciones replica el comportamiento descrito en corrosión general pero invertido.

En el caso del análisis multiseñal se puede observar que las densidades no se encuentran concentradas exclusivamente en un solo evento, como en el caso anterior. En el primer segmento hasta las 200 observaciones podemos ver que se tiene un gradiente de menor a mayor desde corrosión general a corrosión localizada y finalmente corrosión mixta. Posterior a este bloque inicial se tienen destellos de concentraciones variados entre corrosión general y mixta, teniendo difusión en corrosión localizada. Las variantes hasta este punto se mantienen en las densidades medias a bajas. A partir de las observaciones 300 se observa un cambio teniendo destellos de concentración en incrementos de corrosión general, donde las densidades para los otros tipos de corrosión se ven reducidos, hasta en el bloque central verse nulos. Posteriormente vuelve a reducirse ligeramente la concentración en corrosión general, seguido de un bloque que repite el comportamiento del bloque inicial con una duración menor. El siguiente bloque muestra alta concentración en corrosión general decrementando gradualmente para los otros tipos de corrosión, y repitiendo este patrón invertido alrededor de las 900 observaciones. Finalmente, la porción remanente muestra similitudes con las observadas en las observaciones 200, presentando ciertos haces de alta concentración con una duración corta.

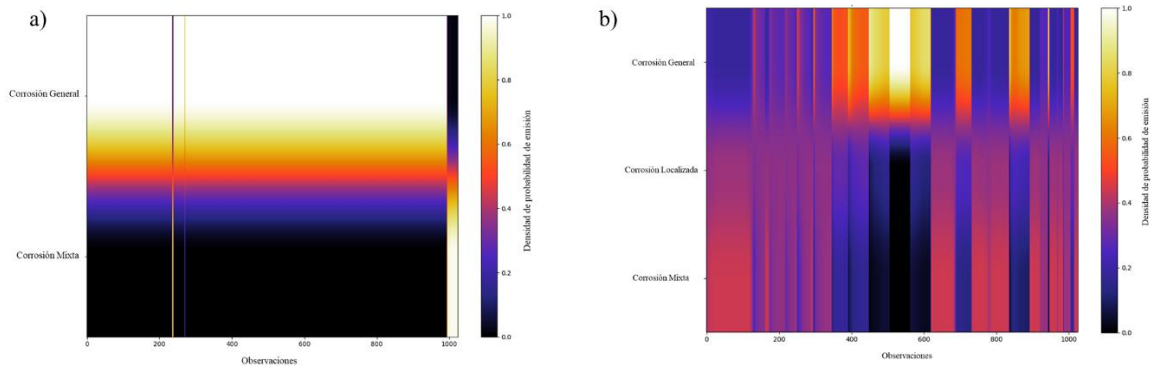


Ilustración 19. Densidad de probabilidad de emisiones. a) una señal, b) multiseñal

Enfocándonos con los resultados de la reconstrucción de estados más probables detectados por el HMM, se observa que en la figura a) la señal presenta inicialmente un comportamiento de corrosión mixta, el cual tras los primeros 160 segundos evoluciona hacia un estado de corrosión general que se mantiene constante hasta el final del experimento.

Por otro lado, en los resultados generados por las múltiples señales se puede identificar primero un comportamiento primordialmente mixto el cual es entremezclado con corrosión localizada hasta llegar a la cúspide de la señal, donde posteriormente se convierte en corrosión general teniendo ciertos puntos individuales de difusión.

En ambos casos se señala corrosión general como la principal o más dominante, sin embargo, se puede ver que en el caso de una sola señal no se logran discernir los eventos presentes detrás de ello como se pueden ver en la figura b). Con esto se puede afirmar que el uso y análisis de señales múltiples es una excelente opción para mejorar los datos y cálculos obtenidos, y para poder aprovechar su funcionalidad se debe de contar con una base de datos en la cual se tenga suficiente variabilidad para poder obtener una visión más completa.

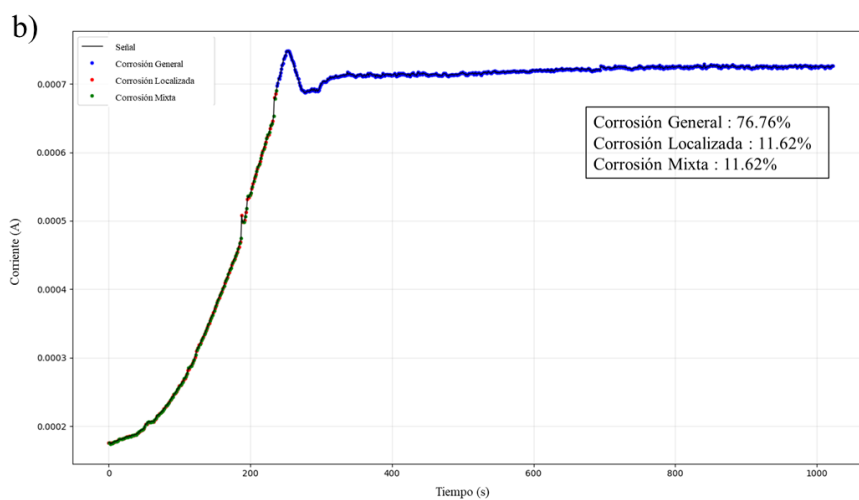
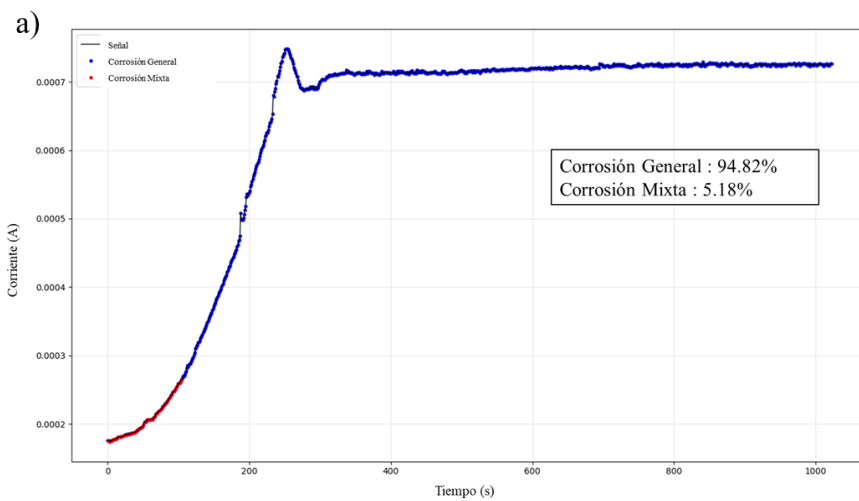


Ilustración 20. Predicción de estados ocultos. a) una señal, b) multiseñal

Capítulo 5. Conclusiones y observaciones

Al término de este estudio de investigación, se han cumplido con los objetivos establecidos y la hipótesis planteada, habiendo comprobado la viabilidad del desarrollo de un modelo predictivo de corrosión, cimentado en las técnicas tradicionales de detección de corrosión, así como en la teoría y metodología de los modelos ocultos de Markov para las señales de corriente de EN. Con esta implementación se logró generar una nueva forma de visualizar los patrones de corrosión presente en las señales que representaran su evolución temporal y no únicamente su resultado final

Durante las fases del desarrollo del modelo se identificaron las variables cruciales requeridas para llevar a cabo el proyecto, especificando las definiciones de las probabilidades de iniciación, de transición, y las densidades de probabilidad de las observaciones, las cuales fueron presentadas y detalladas en términos de su metodología de cálculo. El presente estudio ha recabado el conocimiento necesario y plasmado su metodología de aplicación el cuál puede ser utilizado como una guía en la aplicación e inclusión de la técnica HMM en el análisis de señales de RE, incentivando su utilización en futuros estudios.

Los resultados del modelado permitieron identificar patrones ocultos en las señales, mostrando una segmentación coherente con las características dinámicas observadas. Durante la fase comparativa logramos visualizar la gran influencia e importancia que presentan los valores de penalización en los resultados finales de reconstrucción. En base a lo observado se determina que no existe un valor óptimo de penalización ya que este es intrínsecamente dependiente de las características de cada señal, por lo que, al momento de este trabajo, no es posible establecer un criterio de estandarización para su determinación y este debe de ser probado manualmente.

La aplicación de la expuesta técnica en señales de baja variabilidad o estables es útil para corroborar los resultados globales, y a causa de la inherente estabilidad que estas presentan, no se suelen revelar eventos particulares. Adicionalmente, se estipula que el análisis de señales múltiples tiene una influencia positiva en los resultados y permite optimizar y refinar el trazo de las trayectorias más probables de los eventos de corrosión.

Las principales limitaciones de este estudio se relacionan con la suposición de una distribución gaussiana en la estimación de densidad de probabilidad, lo cual puede inducir una idealización de los modelos que no siempre representa con precisión el comportamiento real de las señales. Para futuras investigaciones se sugiere la implementación de medios más flexibles o adaptables como distribuciones que sigan estimaciones no-paramétrico como KDE, acentuando que el modelo de HMM deberá, en dicho caso, ser ajustado para reconstruir la trayectoria en base a dichas estimaciones. Otra consideración por tomar es la falta de estudios previos de la aplicación de HMM en este campo de estudio, no teniendo alguna métrica comparativa en la cual evaluar los resultados. Por esta razón, se invita a la comunidad científica a colaborar en la exploración y validación de esta técnica en diferentes entornos experimentales.

Finalmente, se considera que la aplicación de los Modelos Ocultos de Markov en el análisis de corrosión ha sido exitosa, y se espera que esta contribución sirva como un punto de partida para futuras investigaciones que busquen explotar y mejorar esta técnica en la caracterización de fenómenos corrosivos.

Referencias bibliográficas

1. Ahmad, Z. (2006). Principles of corrosion engineering and corrosion control. Elsevier.
2. Genescá, J., Llongueras, J. G. I., & Mendoza, J. Á. (1986). Más allá de la herrumbre. Fondo De Cultura Económica.
3. Davis, J. R. (2000). Corrosion: Understanding the Basics. ASM International (OH).
4. Samie, F., Tidblad, J., Kucera, V., & Leygraf, C. (2007). Atmospheric corrosion effects of HNO₃—Comparison of laboratory-exposed copper, zinc and carbon steel. *Atmospheric Environment*, 41(23), 4888-4896. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.02.007> ni de petroleo ni de aero
5. Chen, X., Zhang, Z., Zhang, H., Yan, H., Liu, F., & Tu, S. (2022). Influence of Air Pollution Factors on Corrosion of Metal Equipment in Transmission and Transformation Power Stations. *Atmosphere*, 13(7), 1041. <https://doi.org/10.3390/atmos13071041>
6. De Investigaciones Nucleares, I. N. (n.d.). Corrosión: la venganza de la naturaleza. gob.mx. <https://www.gob.mx/inin/articulos/corrosion-la-venganza-de-la-naturaleza>
7. PIB de México 2022. (2022). Datosmacro.com. <https://datosmacro.expansion.com/pib/mexico?anio=2022>
8. NACE International. (2016). Assessment of the Global Cost of Corrosion. NACE IMPACT. <http://impact.nace.org/economic-impact.aspx>
9. Norma Oficial Mexicana NOM-060-SCT3-2011. (2011). En Diario Oficial De La Federación.
10. Federal Aviation Administration. (1993, November 29). Order 8300.12 – Corrosion prevention and control programs (Cancelled November 8, 2018). U.S. Department of Transportation. https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/11770
11. National Transportation Safety Board. (1988). Aircraft Accident Report. In NTSB (NTSB/AAR-89/03).
12. Federal Aviation Administration. (2018). Corrosion control for aircraft (AC 43-4B). U.S. Department of Transportation. https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_43-4B.pdf
13. Hellier, C. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. McGraw Hill Professional.

14. He, Y. (2015). Corrosion monitoring. En Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03460-3>
15. Britton, C. (2009). Corrosion Monitoring and Inspection. En Elsevier eBooks (pp. 3117-3166). <https://doi.org/10.1016/b978-044452787-5.00130-x>
16. Materials, A. S. F. T. A. (2009). ASTM designation G 199 - 09 Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement.
17. PEMEX. (2000). Protección Interior de Ductos con Inhibidores. (NRF-005-PEMEX-2000).
18. Mendoza Meléndez, A. (2015). Estudio Electroquímico de un Tubo de Acero API 5LX-52 a Altas Presiones. Universidad Nacional Autónoma de México.
19. Mok, W. Y., Jovancicevic, V., & De Reus, H. (2005). Direct Assessment of Localized Corrosion Using Localized Corrosion Monitoring Technique. <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings/CORR05/All-CORR05/NACE-05341/115257>
20. Barr, E. E., Goodfellow, R., & Rosenthal, L. (2000). Noise Monitoring at Canada's Simonette Sour Oil Processing Facility. CORROSION, 1-15. <https://doi.org/10.5006/c2000-00414>
21. Ryder, J. C., Pickin, N. J., & Wooding, G. P. (2001). Electrochemical Noise Corrosion Monitoring in Hydrocarbon Pipelines - Field Experience. CORROSION, 1-14. <https://doi.org/10.5006/c2001-01293>
22. Song, S., Zhao, W., Wang, J., Li, J., Gao, Z., & Xia, D. (2018). Field Corrosion Detection of Nuclear Materials using Electrochemical Noise Technique. Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 54(2), 340–346. <https://doi.org/10.1134/s2070205118020211>
23. Sure, J., Gill, S. K., Wang, Y., Bawane, K., He, L., Halstenberg, P., Dai, S., Mahurin, S. M., Wishart, J. F., & Sasaki, K. (2022). Electrochemical noise studies on localized corrosion of Ni and Ni-20Cr in molten ZnCl₂. Electrochimica Acta, 431, 141126. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141126>
24. Zou, Y., Wang, J., Sun, H., Tan, Y., Jiang, J., & Sun, J. (2024). Electrochemical noise characterization of corrosion behavior for NiCrAl-NiC coating. Materials Letters, 137492. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137492>

25. Bierwagen, G. P., Tallman, D. E., Li, J., Zidoune, M., & Balbyshev, S. (2000). Electrochemical Noise Studies of Aircraft Coatings Over Al 2024 T-3 in Accelerated Exposure Testing. OnePetro.
26. Reynolds, L., Twite, R., Khobaib, M., Donley, & Bierwagen, G. (1997). Preliminary evaluation of the anticorrosive properties of aircraft coatings by electrochemical methods. *Progress In Organic Coatings*, 32(1-4), 31-34. [https://doi.org/10.1016/s0300-9440\(97\)00098-2](https://doi.org/10.1016/s0300-9440(97)00098-2)
27. Tan, Y. (2009). Sensing localised corrosion by means of electrochemical noise detection and analysis. *Sensors and Actuators B Chemical*, 139(2), 688–698. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.03.061>
28. Harris, S. J., & Mishon, M. (n.d.). Corrosion Sensors to Reduce Aircraft Maintenance. https://www.researchgate.net/profile/S-Harris/publication/268375420_Corrosion_Sensors_to_Reduce_Aircraft_Maintenance/links/5566313f08aeccd77735a0b7/Corrosion-Sensors-to-Reduce-Aircraft-Maintenance.pdf
29. Caleyó, F., Velázquez, J., Valor, A., & Hallen, J. (2009). Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines. *Corrosion Science*, 51(9), 2197–2207. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.014>
30. Venkatesu, V., & Sankara Babu, S. (2017). Mathematical Modeling and Markov Chain Analysis of Corrosion Propagation in Pipelines to Predict the Failures. *SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG-IJME)*.
31. Dizaj, E. A., Padgett, J. E., & Kashani, M. M. (2021). A Markov chain-based model for structural vulnerability assessment of corrosion-damaged reinforced concrete bridges. *Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 379(2203), 20200290. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0290>
32. Unitt, P. (2002). *A Dream Fulfilled: The Replica of the 1903 Wright Flyer at Wright State University*. Dayton, Ohio: Wright State University Libraries.
33. Junkers. (2023, 22 septiembre). Junkers F13 - the first All-Metal passenger aircraft. <https://junkersaircraft.com/en/aircrafts/junkers-f13/#:~:text=The%20story%20of%20the%20Junkers%20F13&text=At%20the%20time%2C%20it%20was,the%20aircraft%20manufacturer%20Hugo%20Junkers.>

34. Boyer, H., & Gall, T. (1998). Metals Handbook Desk Edition. En ASM International eBooks. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.mhde2.9781627081993>
35. Kumar Korukonda, S. (2022). Evolution of Aerospace Materials: A review. International Research Journal Of Engineering And Technology (IRJET), e-ISSN: 2395-0056. <https://www.irjet.net/archives/V9/i4/IRJET-V9I4165.pdf>
36. Sadraey, M. H. (2013). Aircraft design: a systems engineering approach. Chichester, West Sussex, U.K., Wiley.
37. Hawk, J. (2005). The Boeing 787 Dreamliner: More than an airplane [Diapositivas]. AIAA. <http://www.aiaa.org/events/aners/Presentations/ANERS-Hawk.pdf>
38. Cotton, J. & Clark, L.P. & Phelps, Hank. (2002). Titanium alloys on the F-22 fighter airframe. Advanced Materials and Processes. 160. 25-28.
39. Research, K. R. C. M. (2024, 24 julio). Global Aluminium Alloy for Aerospace Application market size is USD 8815.2 million in 2024. Cognitive Market Research. <https://www.cognitivemarketresearch.com/aluminium-alloy-for-aerospace-application-market-report>
40. Industria Básica del Aluminio: Salarios, producción, inversión, oportunidades y complejidad | Data México. (s. f.). Data México. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/alumina-and-aluminum-production-and-processing?fdiInvestmentSelector1=Total&fdiYearCountry=2022&investmentFdiTime=Year>
41. Aluminum Alloy Nomenclature and Temper Designations. (2016b). En ASM International eBooks (pp. 114-136). <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04e.a0006251>
42. Kuşhan, M. C., Gürgen, S., & Sofuoğlu, M. A. (2022). Materials, Structures and Manufacturing for Aircraft. En Sustainable aviation. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-91873-6>
43. Campbell, F. C. (2006). Manufacturing Technology for Aerospace Structural Materials. En Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-495-4.x5000-8>
44. Raj, R. J., Selvam, P. P., & Pughalendi, M. (2021). A Review of Aluminum Alloys in Aircraft and Aerospace Industry. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/352281767_A_Review_of_Aluminum_Alloys_in_Aircraft_and_Aerospace_Industry

45. Bhat, B. N. (2018). Aerospace Materials and Applications. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/4.104893>
46. Baucio, M. (1993). ASM Metals Reference Book, 3rd Edition. ASM International.
47. Davis, J. R. (1993). Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International.
48. Bhattacharya, N., Unde, 2Janhavi, & Kulkarni, K. (2020). Use of titanium and its alloy in aerospace and aircraft industries. International Journal Of Creative Research Thoughts, 8(4).
49. Singh, P., Pungotra, H., & Kalsi, N. S. (2017). On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications. Materials Today Proceedings, 4(8), 8971-8982. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.249>
50. Henriques, V. A. R. (2009). Titanium production for aerospace applications. Journal Of Aerospace Technology And Management, 1(1), 7-17. <https://doi.org/10.5028/jatm.2009.01010717>
51. Inagaki, I., Takechi, T., & Ariyasu, Y. S. N. (2014). Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry. Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report. <http://www.nssmc.com/en/tech/report/nssmc/pdf/106-05.pdf>
52. Statista. (2024, 5 febrero). Global steel usage by sector 2022. <https://www.statista.com/statistics/1107721/steel-usage-global-segment/#:~:text=In%202022%2C%20the%20building%20and,percent%20of%20total%20steel%20demand>
53. Mouritz, A. P. (2012). Introduction to Aerospace Materials. Woodhead Publishing.
54. Hosford, W. F. (2012). Iron and Steel. Cambridge University Press.
55. Singh, A. (2007). Aircraft metallurgy (Vol. 1). L.N.V.M. Society Group of Institutes. <https://soaneemrana.org/onewebmedia/AIRCRAFT%20METALLURGY%20BY%20S OA.pdf>
56. Colás, R., Totten, G. E., Altschuler, E., Atkinson, H., Belzunce, J., Blanter, M., Canale, L., D'Oliveira, A. S. C., Dispinar, D., Funatani, K., Guthrie, R. I., Hodgson, P., Kim, N. J., Klein, A. N., Krauss, G., Lee, Y., Li, L., Liscic, B., Lu, J., . . . Voort, G. V. (2016). Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys. CRC Press. <https://doi.org/10.4324/e-eisa>

57. Smiths Advanced Metals. (2023). Maraging 250. En <https://www.smithsadvanced.com>.
<https://www.smithsadvanced.com/pdf/maraging-250-steel-bar.pdf>
58. Milella, P. P. (2012). Fatigue and Corrosion in Metals. En Springer eBooks.
<https://doi.org/10.1007/978-88-470-2336-9>
59. Perez, N. (2004). Electrochemistry and Corrosion Science. En Kluwer Academic Publishers eBooks. <https://doi.org/10.1007/b118420>
60. Haynes, W. M. (2014). CRC Handbook of Chemistry and Physics. En CRC Press eBooks.
<https://doi.org/10.1201/b17118>
61. Vargel, C. (2004). Corrosion of Aluminium. Elsevier.
62. Revie, R. W. (2011). Uhlig's Corrosion Handbook. John Wiley & Sons
63. Charalampidou, C., Dietzel, W., Zheludkevich, M., Kourkoulis, S. K., & Alexopoulos, N. D. (2021). Corrosion-induced mechanical properties degradation of Al-Cu-Li (2198-T351) aluminium alloy and the role of side-surface cracks. Corrosion Science, 183, 109330. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109330>
64. Shoesmith, D., Noël, J., & Annamalai, V. (2016). Corrosion of Titanium and Its Alloys. En Elsevier eBooks. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.09219-5>
65. ISHII, Mitsuo & KANEKO, Michio & ODA, Takashi. (2003). Titanium and Its Alloys As Key Materials for Corrosion Protection Engineering.
66. Almomani, M. A., Momani, A. M., Abdelnabi, A. A. B., Zqebah, R. S. A., & Al-Batah, M. S. (2022). Predicting the Corrosion Rate of Medium Carbon Steel Using Artificial Neural Networks. Protection Of Metals And Physical Chemistry Of Surfaces, 58(2), 414-421. <https://doi.org/10.1134/s2070205122020034>
67. Findley, K. O., Lawrence, S. K., & O'Brien, M. K. (2021). Engineering Challenges Associated With Hydrogen Embrittlement in Steels. En Elsevier eBooks (pp. 235-249). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819726-4.00086-7>
68. Muhammad, A. A., Almula, T. A. D. M. S., & Sultan, D. A. (2021). Corrosion of Carbon Steel and alloy Steel: effect of humidity and hydrochloric acid. IOP Conference Series Materials Science And Engineering, 1173(1), 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1173/1/012061>
69. European Union Aviation Safety Agency. (2019, October 28). Type Certificate Data Sheet No. EASA.IM.A.115 – Boeing 787 (Issue 24).

<https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TCDS%20EASA%20IM%20A%2015%20B787%20Iss%2024%20-%2028%20Oct%2019.pdf>

70. European Union Aviation Safety Agency. (2025, April 4). Type Certificate Data Sheet No. EASA.A.064 – Airbus A318, A319, A320, A321 Single Aisle (Issue 38). https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/TCDS_EASA%20A%20064_%20Airbus_%20A318_A319_A320_A321_Iss_38.pdf
71. Young, T. M. (2017). Performance of the Jet Transport Airplane: Analysis Methods, Flight Operations, and Regulations. John Wiley & Sons.
72. Federal Aviation Administration. (n.d.) Aircraft engines (Chapter 1) im Aviation Maintenance Technitian Handbook – Powerplant (Vol 1). https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/03_amtp_ch1.pdf
73. Maciejewska, Marta & Galant, Marta & Fuc, Pawel. (2019). Comparison of exhaust emission from the most commonly used aircrafts with implementation LTO cycle to operating conditions. Combustion Engines. 179. 198-203. 10.19206/CE-2019-433.
74. Ornektekin, S. (1998). Effect of exhaust gas on corrosion of metals. International Journal Of Environmental Studies, 55(3), 199-210. <https://doi.org/10.1080/00207239808711177>
75. Kusmierek, E., & Chrzescijanska, E. (2015). Atmospheric corrosion of metals in industrial city environment. Data In Brief, 3, 149-154. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.02.017>
76. Valdez, B., Ramirez, J., Eliezer, A., Schorr, M., Ramos, R., & Salinas, R. (2016). Corrosion assessment of infrastructure assets in coastal seas. Journal Of Marine Engineering & Technology, 15(3), 124-134. <https://doi.org/10.1080/20464177.2016.1247635>
77. Pedferri, P. (2018). Corrosion Science and Engineering. Springer.
78. Vachtsevanos, G., Natarajan, K. A., Rajamani, R., & Sandborn, P. (2020). Corrosion processes: Sensing, Monitoring, Data Analytics, Prevention/Protection, Diagnosis/Prognosis and Maintenance Strategies. Springer Nature.
79. Kaya, S., Obot, I. B., Özkir, D., Serdaroglu, G., & Singh, A. (2023). Corrosion science: Theoretical and Practical Applications. CRC Press.

80. Cottis, R., & Turgoose, S. (1995). Electrochemical noise measurements - a theoretical basis. *Materials Science Forum*, 192-194, 663-672. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.192-194.663>
81. Real Academia Española. (s. f.). ruido. En Real Academia Española (N.o 9788467041897; 23.a ed.).
82. Galvani, A. L. (1972). The Effects of Artificial Electricity on Muscular Motion. *Clinical Orthopaedics And Related Research*, 88, 2-10. <https://doi.org/10.1097/00003086-197210000-00001>
83. Volta, A., & Banks, J. (1800). I. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. *The Philosophical Magazine*, 7(28), 289-311. <https://doi.org/10.1080/14786440008562590>
84. Faraday, M. (1834). VI. Experimental researches in electricity.-Seventh Series. *Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London*, 124, 77-122. <https://doi.org/10.1098/rstl.1834.0008>
85. Bard, A. J., & Fox, M. A. (1995). Artificial Photosynthesis: Solar Splitting of Water to Hydrogen and Oxygen. *Accounts Of Chemical Research*, 28(3), 141-145. <https://doi.org/10.1021/ar00051a007>
86. Bard, A.J. (Ed.). (2004). *Electrogenerated Chemiluminescence* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203027011>
87. Nernst, W. (1904). *Theoretical Chemistry from the Standpoint of Avogadro's Rule & Thermodynamics*.
88. Uhlig, H. H. (1954). Oxidation of metals and alloys. *Journal Of Chemical Education*, 31(2), 103. <https://doi.org/10.1021/ed031p103.1>
89. Iverson WP. Transient voltage changes produced in corroding metals and alloys. Frederick (MD): Fort Detrick; 1968.
90. Mansfeld, F. B. (1986). *Corrosion mechanisms*. CRC Press.
91. Mansfeld, F., & Xiao, H. (1993). Electrochemical Noise Analysis of Iron Exposed to NaCl Solutions of Different Corrosivity. *Journal Of The Electrochemical Society*, 140(8), 2205-2209. <https://doi.org/10.1149/1.2220796>

92. Mansfeld, F., Sun, Z., Hsu, C., & Naguib, A. (2001). Concerning trend removal in electrochemical noise measurements. *Corrosion Science*, 43(2), 341-352. [https://doi.org/10.1016/s0010-938x\(00\)00064-0](https://doi.org/10.1016/s0010-938x(00)00064-0)
93. Gabrielli, C., Huet, F., & Keddam, M. (1986). Investigation of electrochemical processes by an electrochemical noise analysis. Theoretical and experimental aspects in potentiostatic regime. *Electrochimica Acta*, 31(8), 1025-1039. [https://doi.org/10.1016/0013-4686\(86\)80018-4](https://doi.org/10.1016/0013-4686(86)80018-4)
94. Xia, D., Song, S., Behnamian, Y., Hu, W., Cheng, Y. F., Luo, J., & Huet, F. (2020). Review—Electrochemical Noise Applied in Corrosion Science: Theoretical and Mathematical Models towards Quantitative Analysis. *Journal of the Electrochemical Society*, 167(8), 081507. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ab8de3>
95. Uruchurtu, J. (2008). Correlation and interpretation of electrochemical impedance and noise measurements of hybrid organic-inorganic solgel coatings. Retrieved from <https://www.academia.edu/23057807/>
96. Castañeda, I., Romero, M., Malo, J. M., & Uruchurtu, J. (2010). Ruido electroquímico de la erosión-corrosión en cobre: su relación con los parámetros hidrodinámicos. *Revista de Metalurgia*, 46(5), 446-457. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1002>
97. Flores-Nicolás, A., Flores-Nicolás, M., Menchacacampos, E. C., & Uruchurtu-Chavarín, J. (2025). Study on Corrosion of Reinforced Concrete with Synthetic Fiber Using Electrochemical Noise Technique. *Civil And Environmental Engineering*. <https://doi.org/10.2478/cee-2025-0021>
98. Tres, G., Arriaga, R., Malo, J. M., & Uruchurtu, J. (2001). Monitoreo por Ruido Electroquímico de la Corrosión del Acero en una Atmósfera Contaminada. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 17(4), 171-178. <http://www.redalyc.org/pdf/370/37017401.pdf>
99. Martínez-Ramos, C., Olguin-Coca, J., Lopez-Leon, L. D., Gaona-Tiburcio, C., Lara-Banda, M., Maldonado-Bandala, E., Castañeda-Robles, I., Jaquez-Muñoz, J. M., Cabral-Miramontes, J., Nieves-Mendoza, D., & Almeraya-Calderón, F. (2023). Electrochemical Noise Analysis Using Experimental Chaos Theory, Power Spectral Density and Hilbert–Huang Transform in Anodized Aluminum Alloys in Tartaric–Phosphoric–Sulfuric Acid Solutions. *Metals*, 13(11), 1850. <https://doi.org/10.3390/met13111850>

100. Ramos, C. M., Tiburcio, C. G., Jáquez-Muñoz, J., López, F. E., Miramontes, J. Á. C., Del Refugio Lara Banda, M., & Calderon, F. A. (2023). Electrochemical Corrosion of Anodized Ti Beta-C Alloy. *ECS Transactions*, 110(1), 169-176. <https://doi.org/10.1149/11001.0169ecst>
101. Salgado, J., Tiburcio, C. G., Jáquez-Muñoz, J. M., Martínez-Ramos, C., Del Carmen Zambrano Robledo, P., Del Refugio Lara Banda, M., Estupiñán-Lopez, F., Calderón, F. A., & Miramontes, J. Á. C. (2023). Cyclic Potentiodynamic Polarization on Titanium Alloys Anodizing in Alkaline Solutions. *ECS Transactions*, 110(1), 49-61. <https://doi.org/10.1149/11001.0049ecst>
102. Jáquez-Muñoz, J. M., Gaona-Tiburcio, C., Cabral-Miramontes, J. A., Lara-Banda, M., Estupiñán-López, F. H., Zambrano-Robledo, P. R., & Almeraya-Calderón, F. (2021). Corrosion behavior of titanium alloys using electrochemical noise. *ECS Transactions*, 101(1), 167–172. <https://doi.org/10.1149/10101.0167ecst>
103. Almeraya-Calderon, F., Villegas-Tovar, M., Maldonado-Bandala, E., Lara-Banda, M., Baltazar-Zamora, M. A., Santiago-Hurtado, G., Nieves-Mendoza, D., Lopez-Leon, L. D., Jaquez-Muñoz, J. M., Estupiñán-López, F., & Gaona-Tiburcio, C. (2024). Use of Electrochemical Noise for the Study of Corrosion by Passivated CUSTOM 450 and AM 350 Stainless Steels. *Metals*, 14(3), 341. <https://doi.org/10.3390/met14030341>
104. Lara-Banda, M., Almeraya-Calderón, F., Jáquez-Muñoz, J. M., Nieves-Mendoza, D., Baltazar-Zamora, M. A., Olguín-Coca, J., Estupiñán-Lopez, F., Miramontes, J. C., Santiago-Hurtado, G., & Gaona-Tiburcio, C. (2025). A Study of the Corrosion Behavior of AHSS Complex-Phase CP 780 Employing an Electrochemical Noise Technique Analyzed by Different Methods. *Metals*, 15(1), 59. <https://doi.org/10.3390/met15010059>
105. Kearns, J., Scully, J., Roberge, P., Reichert, D., & Dawson, J. (1996). Electrochemical noise measurement for corrosion applications. <https://doi.org/10.1520/stp1277-eb>
106. Jáquez-Muñoz, J. M., Gaona-Tiburcio, C., Méndez-Ramírez, C. T., Martínez-Ramos, C., Baltazar-Zamora, M. A., Santiago-Hurtado, G., Estupinan-Lopez, F., Landa-Ruiz, L., Nieves-Mendoza, D., & Almeraya-Calderon, F. (2024). Electrochemical noise analysis: an approach to the effectivity of each method in different materials. *Materials*, 17(16), 4013. <https://doi.org/10.3390/ma17164013>

107. Cottis, R. A. (2021). Electrochemical noise for corrosion monitoring. In Elsevier eBooks (pp. 99–122). <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-103003-5.00005-9>
108. Cottis, R. A. (2001). Interpretation of electrochemical noise data. *CORROSION*, 57(3), 265–285. <https://doi.org/10.5006/1.3290350>
109. Obot, I. B., Onyeachu, I. B., Zeino, A., & Umoren, S. A. (2019). Electrochemical noise (EN) technique: review of recent practical applications to corrosion electrochemistry research. *Journal Of Adhesion Science And Technology*, 33(13), 1453-1496. <https://doi.org/10.1080/01694243.2019.1587224>
110. Smulko, J. (2006). Methods of Electrochemical Noise Analysis for Investigation of Corrosion Processes. *Fluctuation and Noise Letters*, 06(02), R1–R9. <https://doi.org/10.1142/s0219477506003252>
111. Eden DE, John DG, Dawson JL. Corrosion monitoring. International Patent WO87107022, World Intellectual Property Organization, 1987.
112. Bagotsky, V. S. (2005). *Fundamentals of Electrochemistry*. John Wiley & Sons.
113. Mansfeld, F. (2005). The Electrochemical Noise Technique — Applications in corrosion research. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.2036830>
114. S.A. Reid, D. E. (2001). Estados Unidos de América Patent No. US6264824B1.
115. Bahena, D., Rosales, I., Sarmiento, O., Guardián, R., Menchaca, C., & Uruchurtu, J. (2011b). Electrochemical Noise Chaotic Analysis of NiCoAg Alloy in Hank Solution. *International Journal Of Corrosion*, 2011, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2011/491564>
116. Mansfeld, F., & Sun, Z. (1999). Technical Note: Localization Index Obtained from Electrochemical Noise Analysis. *CORROSION*, 55(10), 915-918. <https://doi.org/10.5006/1.3283926>
117. Cottis, R. A. (2001). Parameters for the identification of localized corrosion: theoretical analysis. ECS. <https://personalpages.manchester.ac.uk/staff/bob.cottis/Parameters%20for%20the%20Identification%20of%20Localized%20Corrosion%20-%20Theoretical%20Analysis.pdf>
118. Al-Mazeedi, H., & Cottis, R. A. (2004). Parameter Maps for the Assessment of Corrosion Type from Electrochemical Noise Data. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/254545795_Parameter_Maps_for_the_Assessment_of_Corrosion_Type_from_Electrochemical_Noise_Data

119. Nagiub, A. M. (2014). Comparative Electrochemical Noise Study of the Corrosion of Different Alloys Exposed to Chloride Media. *Engineering*, 06(13), 1007-1016. <https://doi.org/10.4236/eng.2014.613091>
120. Cottis, R., Bagley, G., & Laycock, P. (1999). Higher Order Measures for the Analysis of Electrochemical Noise. *CORROSION*. <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings/CORR99/All-CORR99/NACE-99191/128227>
121. Cottis, R., Al-Awadhi, M., Al-Mazeedi, H., & Turgoose, S. (2001). Measures for the detection of localized corrosion with electrochemical noise. *Electrochimica Acta*, 46(24-25), 3665-3674. [https://doi.org/10.1016/s0013-4686\(01\)00645-4](https://doi.org/10.1016/s0013-4686(01)00645-4)
122. Jáquez-Muñoz, J. M., Gaona-Tiburcio, C., Cabral-Miramontes, J., Nieves-Mendoza, D., Maldonado-Bandala, E., Olguín-Coca, J., López-Léon, L. D., Rios, J. P. F. L., & Almeraya-Calderón, F. (2021). Electrochemical Noise Analysis of the Corrosion of Titanium Alloys in NaCl and H₂SO₄ Solutions. *Metals*, 11(1), 105. <https://doi.org/10.3390/met11010105>
123. Suresh, Girija; Mudali, U. Kamachi . (2014). Electrochemical Noise Analysis of Pitting Corrosion of Type 304L Stainless Steel. *Corrosion*, 70(3), 283–293. doi:10.5006/1003
124. Zhang, Zhen; Wu, Xinqiang; Tan, Jibo . (2019). Laboratory-Scale Identification of Corrosion Mechanisms by a Pattern Recognition System Based on Electrochemical Noise Measurements. *Journal of The Electrochemical Society*, 166(12), C284–C295. doi:10.1149/2.0761912jes
125. Killick, R., Fearnhead, P., & Eckley, I. A. (2012). Optimal Detection of Changepoints With a Linear Computational Cost. *Journal Of The American Statistical Association*, 107(500), 1590-1598. <https://doi.org/10.1080/01621459.2012.737745>
126. Haynes, K., Eckley, I. A., & Fearnhead, P. (2014). Efficient penalty search for multiple changepoint problems. *arXiv* (Cornell University). <https://doi.org/10.48550/arxiv.1412.3617>
127. Jackson, B., Scargle, J., Barnes, D., Arabhi, S., Alt, A., Gioumousis, P., Gwin, E., San, P., Tan, L., & Tsai, N. T. T. (2005). An algorithm for optimal partitioning of data on an

- interval. IEEE Signal Processing Letters, 12(2), 105-108.
<https://doi.org/10.1109/lsp.2001.838216>
128. Seneta, E. (2006). Markov and the creation of Markov chains. In A. N. Langville & W. J. Stewart (Eds.), MAM2006: Markov Anniversary Meeting (pp. 1–20). Raleigh, NC: Boson Books.
129. Markov, A. A. (2006). An Example of Statistical Investigation of the Text Eugene Onegin Concerning the Connection of Samples in Chains. *Science In Context*, 19(4), 591-600. <https://doi.org/10.1017/s0269889706001074>
130. Langville, A.N., & Hilgers, P.V. (2006). THE FIVE GREATEST APPLICATIONS OF MARKOV CHAINS.
131. Caleyó, F., Velázquez, J., Valor, A., & Hallen, J. (2009). Markov chain modelling of pitting corrosion in underground pipelines. *Corrosion Science*, 51(9), 2197-2207. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.06.014>
132. McCallum, K., Zhao, J., Workman, M., Iannuzzi, M., Kappes, M., Payer, J., Clemons, C., Chawla, S., Kreider, K., Mimoto, N., & Young, G. (2014). Localized Corrosion Risk Assessment using Markov analysis. *CORROSION*, 70(11), 1114-1127. <https://doi.org/10.5006/1184>
133. Zhang, W., Chen, J., Yu, Q., & Gu, X. (2020). Corrosion evolution of steel bars in RC structures based on Markov chain modeling. *Structural Safety*, 88, 102037. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102037>
134. Guo, C., Liang, Z., Zeng, J., Song, M., & Xue, Z. (2021). A predictive Hidden semi-Markov Model for bridges subject to chloride-induced deterioration. 2021 IEEE 21st International Conference On Software Quality, Reliability And Security Companion (QRS-C), 751-756. <https://doi.org/10.1109/qrs-c55045.2021.00114>
135. Valor, A., Caleyó, F., Alfonso, L., Velázquez, J. C., & Hallen, J. M. (2013). Markov Chain Models for the Stochastic Modeling of Pitting Corrosion. *Mathematical Problems In Engineering*, 2013, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2013/108386>
136. Zhang, T., Liu, X., Shao, Y., Meng, G., & Wang, F. (2008). Electrochemical noise analysis on the pit corrosion susceptibility of Mg–10Gd–2Y–0.5Zr, AZ91D alloy and pure magnesium using stochastic model. *Corrosion Science*, 50(12), 3500-3507. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.09.033>

137. Wang, H., Yajima, A., Liang, R. Y., & Castaneda, H. (2015). A clustering approach for assessing external corrosion in a buried pipeline based on hidden Markov random field model. *Structural Safety*, 56, 18-29. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2015.05.002>
138. Zhang, D., Bailey, A. D., & Djurdjanovic, D. (2016). Bayesian Identification of Hidden Markov Models and Their Use for Condition-Based Monitoring. *IEEE Transactions On Reliability*, 65(3), 1471-1482. <https://doi.org/10.1109/tr.2016.2570561>
139. Jurafsky, D. (2000). *Speech & Language processing*. Pearson Education India.
140. Fewster, R. (2014). Chapter 8: Markov Chains. Department of Statistics, University of Auckland. <https://www.stat.auckland.ac.nz/~fewster/325/notes/ch8.pdf>
141. Murty, M. N., & Devi, V. S. (2011a). *Pattern recognition: An Algorithmic Approach*. Springer Science & Business Media.
142. Değirmenci, A. (2015). Introduction to hidden Markov models. <https://www.semanticscholar.org/paper/Introduction-to-Hidden-Markov-Models-De%C4%9Firmenci/c7ac4fac38b740d2798c08515225598d793e892d>
143. Rabiner, L. (1989). A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proceedings of the IEEE*, 77(2), 257–286. <https://doi.org/10.1109/5.18626>
144. Forney, G. (1973). The viterbi algorithm. *Proceedings Of The IEEE*, 61(3), 268-278. <https://doi.org/10.1109/proc.1973.9030>
145. Akkidas, D., & Davidrichesemmanuel. (2015). Viterbi algorithm. *Journal of Experimental Algorithmics*
146. Dugad, Rakesh & Desai, Uday. (2000). *A Tutorial On Hidden Markov Models*.
147. Sundaram, R. H. (2000). The Baum-Welch algorithm. Department of Electrical and Computer Engineering, Mississippi State University. https://isip.piconepress.com/courses/msstate/ece_8463/projects/2000_spring/final_paper/baum_welch_v0.pdf
148. Norris, J. R. (1998). *Markov Chains*. Cambridge University Press.
149. Zucchini, W., MacDonald, I. L., & Langrock, R. (2017). *Hidden Markov Models for Time Series: An Introduction Using R*, Second Edition. CRC Press.
150. Bishop, C. M. (2016). *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer.

151. Huang, J., & Bagnell, J. A. (2014). Gauss-Markov Models. Carnegie Mellon University. <https://www.cs.cmu.edu/~16831-f14/notes/F14/gaussmarkov.pdf>
152. Bilmes, J. A. (1998). A gentle tutorial of the em algorithm and its application to parameter estimation for Gaussian mixture and hidden Markov models. CTIT Technical Reports Series. http://lasa.epfl.ch/teaching/lectures/ML_PhD/Notes/GP-GMM.pdf
153. Lentka, Ł.; Smulko, J. Methods of Trend Removal in Electrochemical Noise Data—Overview. *Measurement* 2019, 131, 569–581