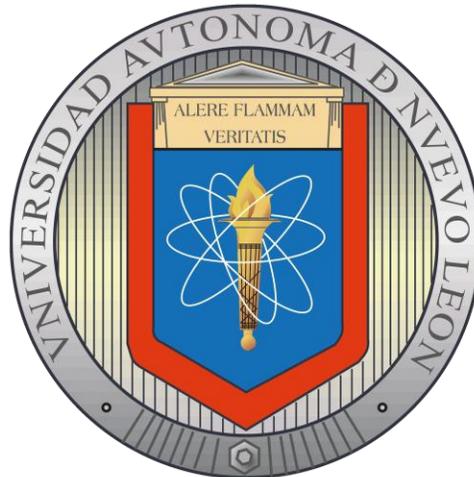


# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL, EN  
SOLUCIONES ACIDAS A BAJA TEMPERATURA**

**POR  
MIGUEL SERGIO HUERTA ZAVALA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA AERONAUTICA**

**JUNIO 2024**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**RESISTENCIA A LA CORROSIÓN DE SUPERALEACIONES BASE NÍQUEL, EN  
SOLUCIONES ACIDAS A BAJA TEMPERATURA**

**POR  
MIGUEL SERGIO HUERTA ZAVALA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN  
CIENCIAS DE LA INGENIERIA AERONAUTICA**

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

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

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MEXICO**

**JUNIO DE 2024**

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

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Resistencia a la Corrosión de Superaleaciones Base Níquel, en Soluciones Acidas a Baja Temperatura”, realizada por el estudiante Miguel Sergio Huerta Zavala, con número de matrícula 2129696, 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 Estupinán López  
Revisor

Dr. José Ángel Cabral Miramontes  
Revisor

Dr. Francisco Javier Olguín Coca  
Revisor

Vo.Bo.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 563512

Acta Núm. 4425

Ciudad Universitaria, a 15 de octubre del 2024

## Índice

<b>Capítulo I: Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Objetivo</b> .....	<b>4</b>
<b>Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
<b>Capítulo II: Marco Teórico</b> .....	<b>5</b>
2.1    Materiales en el sector aeronáutico .....	5
2.1.1    Aluminio y sus aleaciones.....	6
2.1.2    Titanio y sus aleaciones .....	8
2.1.3    Superaleaciones .....	9
2.2    Clasificación de superaleaciones .....	11
2.2.1    Superaleaciones a base de hierro.....	11
2.2.2    Superaleaciones a base de cobalto .....	11
2.2.3    Superaleaciones base níquel .....	12
Inconel 600:.....	13
Inconel 690:.....	13
Inconel 718:.....	14
2.3    Corrosión.....	14
2.3.1    Corrosión en la industria aeronáutica.....	15
Tipos de corrosión en aeronáutica .....	16
2.3.2    Corrosión electroquímica .....	18
2.3.3    Cinética de corrosión.....	19
2.4    Técnicas de evaluación electroquímicas .....	19
2.4.1    Ruido electroquímico .....	20
Ruido de Potencial Electroquímico .....	20
Ruido de Corriente Electroquímica .....	20
Análisis visual .....	21
Análisis estadísticos.....	21
2.4.2    Curvas de polarización potenciodinámica cíclica .....	25
2.4.3    Impedancia electroquímica .....	27
2.4.4    Resistencia de polarización lineal .....	28
2.5    Métodos de protección.....	28
2.5.1    Protección catódica.....	29
2.5.2    Inhibidores de corrosión .....	29

2.5.3	Recubrimientos .....	30
<b>Capítulo III: Metodología experimental .....</b>		<b>31</b>
3.1	Materiales .....	31
3.1.1	Composición Química .....	31
3.1.2	Preparación de Electroodos .....	31
3.1.3	Análisis Metalográfico .....	32
3.2	Pruebas electroquímicas .....	33
3.2.1	Curvas De Polarización Cíclica.....	34
3.2.2	Ruido Electroquímico .....	36
3.3	Microscopía Electrónica de Barrido.....	37
<b>CAPITULO IV: Resultados y Discusión .....</b>		<b>38</b>
4.1	Análisis de composición química.....	38
4.2	Caracterización microestructural.....	39
4.3	Curvas de Polarización Cíclica .....	41
4.4	Ruido electroquímico .....	49
4.4.1	Análisis visual de las series de tiempo .....	49
4.4.2	Análisis estadístico en la serie de tiempo .....	58
<b>CAPITULO V: Conclusiones .....</b>		<b>61</b>
<b>Referencias .....</b>		<b>62</b>

## Índice de figura

Figura 1. Materiales presentes en un turbo reactor, fabricado por General Electric [6].....	2
Figura 2. Evolución de material utilizados en distintas generaciones de aviones Boeing [17]. .....	6
Figura 3. Porcentajes de los diferentes materiales utilizados en el Airbus A380, sobresaliendo las aleaciones de aluminio [4]. .....	7
Figura 4 Aleación de titanio presente en el avión de combate avanzado Lockheed Martin-Boeing F22 Raptor [4].....	8
Figura 5. Tipos de materiales utilizados en turborreactor[25].....	9
Figura 6. Un esquema con los principales campos de aplicación de las superaleaciones [4]. .....	10
Figura 7 Superaleación base níquel presente principalmente en los alabes de turborreactor de aeronaves [imagen obtenida en línea].....	12
Figura 8. Estructura cristalina FCC, presentes en las superaleaciones base níquel, A) Gamma prima B) Gamma [4].....	13
Figura 11. Esquemas de las Formas Comunes de corrosión [30].....	17
Figura 12 Esquemización de celda electroquímica [33].....	18
Figura 13 Ilustración esquemática de la curva CPC y los parámetros de corrosión[49].....	26
Figura 14. Esquemización de interpolación Tafel [50].....	27
Figura 15. Métodos de protección A) ánodos de sacrificio, B) inhibidor de corrosión, C) recubrimientos [obtenidos de internet].....	29
Figura 16 .Pistola de Fluorescencia de rayos X.....	31
Figura 17. Devastadora metalográfica marca Struers.....	32
Figura 18. Microscopio óptico Zeiss modelo V12. ....	33
Figura 19 Potenciostato/galvanostato/ZRA VERSASTAT 4 y celda de corrosión. ....	34
Figura 20 Ejemplificación de extrapolación Tafel[50].....	35
Figura 21. Software Cview obteniendo datos electroquímicos. ....	35
Figura 22. Microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo 6510lv. ....	37
Figura 23. Microestructura, Superaleación 600 a 100X.....	39
Figura 24. Microestructura, Superaleación 690 A 100x. ....	40
Figura 25. Microestructura, Superaleación 718 A 100x. ....	40

Figura 26. Ilustración esquemática de pruebas CPC para tres condiciones diferentes: (a) exhibiendo potencial de protección, (b) con evolución de oxígeno, (c) sin potencial de protección. [49].....	42
Figura 27. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 25°.....	43
Figura 28. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 60°.....	44
Figura 29. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en NaCl a 25°.....	45
Figura 30. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en NaCl a 60°.....	47
Figura 31. Series de tiempo de RE de las superaleaciones en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 25 grados. Ruido en potencial (A) y ruido en corriente (B-C).....	51
Figura 32. Series de tiempo de RE de las superaleaciones en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 60 grados. Ruido en potencial (A) y ruido en corriente (B).....	53
Figura 33. Series de tiempo de RE de las superaleaciones en NaCl a 25 grados. Ruido en potencial (A) y ruido en corriente (B-C).....	55
Figura 34 Series de tiempo de RE de las superaleaciones en NaCl a 60 grados. Ruido en potencial (A-B) y ruido en corriente (C-D).....	57

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencia de los mecanismos de falla[8].	16
Tabla 2. Rango del índice de localización para el tipo de corrosión [47].	23
Tabla 3. Tipos de corrosión en base a sesgo y Kurtosis[48].	25
Tabla 4. Matriz de experimentación	33
Tabla 5. Parámetros de técnica de Ruido Electroquímico.	36
Tabla 6. Fórmulas para el análisis en el dominio del tiempo.	37
Tabla 7. Parámetros electroquímicos utilizados en CPC.	34
Tabla 8. Composición Química de las superaleaciones evaluadas	38
Tabla 9. Parámetros electroquímicos de la técnica de CPC de las superaleaciones Inconel 600, 690 y 718 en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> a 25 y 60°C (L=Localizada G= Generalizada).	48
Tabla 10. Parámetros electroquímicos de la técnica de CPC de las superaleaciones Inconel 600, 690 y 718 en NaCl a 25 y 60°C (L=Localizada G= Generalizada).	49
Tabla 11. Resultados de parámetro del ruido electroquímico cuando se realiza el análisis estadístico de las superaleaciones en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -	58
Tabla 12. Resultados de parámetro del ruido electroquímico cuando se realiza el análisis estadístico de las superaleaciones en NaCl.	59

## **Dedicatoria**

A mis padres y a mis hermanos,  
A mis amigos que me apoyaron,  
A Dios y a mí mismo.

## **Agradecimiento**

---

## Capítulo I: Introducción

---

Una industria pilar en el desarrollo de ciencia y tecnología en el último siglo ha sido la industria aeronáutica y aeroespacial, siendo la investigación y desarrollo de nuevos materiales de las áreas más cruciales, S. Arnold 2012 [1], nos presenta un resumen de toda la metodología, investigación y experimentación para la selección de un material para componentes aeroespacial, puesto que sus requerimientos y características son unos de los más exigentes en el mercado, al grado de ser utilizadas en otras industrias como petroquímicas, marítimas y nucleares por mencionar algunas [2].

La seguridad es una prioridad en la industria aeronáutica, las investigaciones de nuevos materiales han permitido el desarrollo de componentes más resistentes y duraderos, capaces de soportar las extremas condiciones a las que una aeronave es expuesta. Sin embargo, los requerimientos del mercado se actualizan seguido, por lo tanto, estos materiales están en constante procesos para mejorar sus propiedades mecánicas, su resistencia tanto a la fatiga oxidación y corrosión [3].

El control de la corrosión en la industria aeronáutica es un problema que siempre ha sido importante, pero lo es cada vez más a medida que la flota de aviones envejece. La corrosión puede hacer que una aeronave deje de estar disponible o, en las peores situaciones, falle catastróficamente [4,5]. En una industria tan importante como la aeronáutica (entre otras) requiere la eficiencia de los materiales y componentes ante situaciones o ambientes que los comprometan, como es el caso de los ambientes corrosivos y sus implicaciones [4].

Una de las partes importante y el motivo principal por el cual una aeronave puede volar son los turborreactores, los cuales deben operar de manera óptima desde todos los puntos de vista, por este motivo, el material de sus componentes debe de garantizar altas resistencias mecánicas y químicas especialmente en altas temperaturas.

El turbo reactor de un avión está conformado de diferentes materiales, el motor del Boeing 787 de General Electric (Fig.1), por ejemplo, está compuesto principalmente de

superaleación base níquel, seguido por aleaciones de titanio, base hierro, de aluminio y materiales compuestos [6].

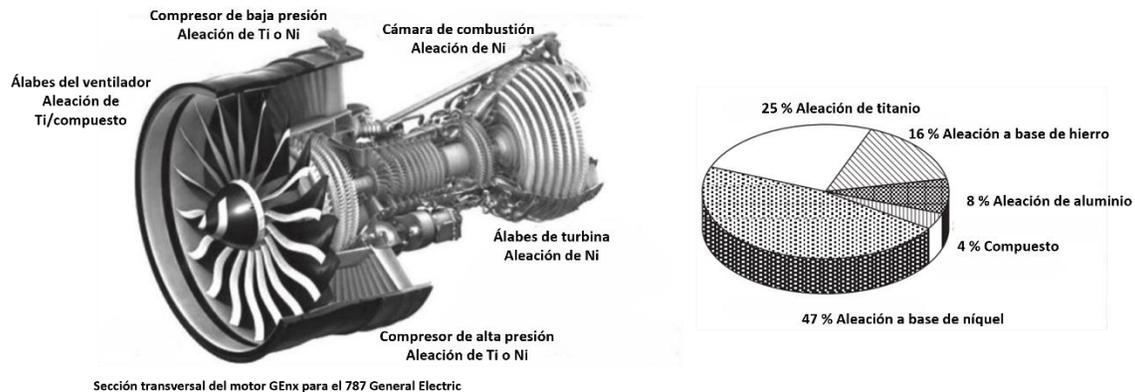


Figura 1. Materiales presentes en un turbo reactor, fabricado por General Electric [6].

Principalmente, debido a su excepcional resistencia a altas temperaturas y a la corrosión, las superaleaciones a base de níquel se utilizan en componentes de turborreactores. Estos materiales pueden soportar las condiciones extremas del entorno de un motor de reacción, manteniendo su integridad estructural y durabilidad a temperaturas que superan los 800°C [6,7].

Además, las superaleaciones base níquel ofrecen una excelente combinación de propiedades mecánicas, lo que las hace ideales para componentes críticos, principalmente en los álabes, discos, paletas y cámara de combustión asegurando un rendimiento confiable y una larga vida útil en aplicaciones de alta temperatura y presión [6,8,9].

La corrosión en los álabes del compresor puede ser provocada por la presencia de humedad en el entorno, combinada con niveles elevados de sales y ácidos, que tienden a acumularse principalmente en la zona de flowpath y Leading Edge. Incluso cuando la turbina no está en funcionamiento, el compresor puede verse afectado por la humedad si la temperatura del metal desciende por debajo del punto de condensación [8]. Esta misma humedad trae consigo compuestos corrosivos que se acumularán y se pueden introducir en cavidades de la turbina, donde una vez suba la temperatura por encendido aumentará su concentración y se hará químicamente más agresivo [12].

La severidad del daño causado por la corrosión está determinada por la composición química de la humedad. Como es conocido los ambientes más severos y que favorecen la corrosión son los ácidos, durante un vuelo las aeronaves están expuestas a diferentes ambientes, el más conocido son lluvias acidas, ocasionadas por diferentes factores entre ellos los industriales, García et al 2006 define la lluvia acida cuando su pH es menor a 5.6 y reporta que tan solo en Guadalajara en el 2005 hubo una tendencia acida en las lluvias con una variación de 5.33 a 5.9 unidades de pH [13,14].

Aunque estas superaleaciones son principalmente diseñadas para aplicaciones en entornos altamente corrosivos y agresivos a altas temperaturas, también pueden estar expuestas a temperaturas más bajas durante su vida útil. Pueden experimentar ciclos térmicos, arranque y apagado de equipos o situaciones de mantenimiento que impliquen temperaturas más bajas. Por lo tanto, es esencial comprender cómo se comportan y se corroen a bajas temperaturas para garantizar la integridad y durabilidad del material en todas las condiciones de operación.

En este trabajo de tesis, se realiza el estudio de tres superaleaciones base níquel de la casa Inconel: 600, 690 y 718, expuestas en medios ácidos de NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a una concentración de 5% y 1% respectivamente, manejando dos temperaturas de operación: 25° y 60°. La caracterización de la cinética de corrosión se realiza por técnicas electroquímicas: ruido electroquímico, polarización cíclica.

---

## Objetivo

---

Estudiar el mecanismo y cinética de corrosión, de las aleaciones Inconel 600, 690 y 718 mediante el uso de técnicas electroquímicas, en diferentes electrolitos a baja temperatura.

### Objetivos específicos

- Determinar la composición química de las aleaciones mediante la técnica de fluorescencia de rayos X.
- Preparación metalográfica de las aleaciones en estudio: Corte, montaje y pulido para obtener los electrodos a utilizar.
- Pruebas electroquímicas; ruido electroquímico, curvas de polarización e impedancia electroquímica a las aleaciones Inconel 600, 690 y 718 a una temperatura de 25 y 60 °C en electrolitos NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- Determinación los parámetros electroquímicos para obtener la velocidad de corrosión y el mecanismo de corrosión en las condiciones del estudio.
- Determinar la microestructura de las superaleaciones por microscopía óptica.

---

## Hipótesis

---

Las superaleaciones base níquel están diseñadas, entre otras cosas, para su uso en ambientes corrosivos a alta temperatura, mediante el uso de pruebas electroquímicas se espera obtener la misma eficiencia/comportamiento al evaluar estas aleaciones en ambientes ácidos en bajas temperaturas.

---

## Capítulo II: Marco Teórico

---

### 2.1 Materiales en el sector aeronáutico

Los materiales aeronáuticos desempeñan un papel crucial en el diseño, fabricación y operación de aeronaves. Estos materiales deben cumplir rigurosos estándares de rendimiento y seguridad debido a las condiciones extremas a las que están expuestas las aeronaves durante el vuelo [15].

En los últimos años, ha habido notables progresos en la investigación y desarrollo de materiales específicamente diseñados para cumplir funciones estructurales y en los motores en la industria aeroespacial. Estas innovaciones incluyen la creación de aleaciones con propiedades sobresalientes, tales como aquellas basadas en aluminio, titanio y níquel, que ofrecen ventajas extraordinarias para aplicaciones en la aeronáutica [16].

El rápido crecimiento de la industria aeronáutica impulsa el rápido desarrollo de nuevos materiales para aeronaves [1]. La principal fuerza impulsora es la reducción de costos mediante la reducción del peso y la extensión de la vida útil de las piezas/estructuras de las aeronaves. Debido a todas las condiciones agresivas a las que son sometidos existen una serie de criterios importantes durante la selección de un material para aplicación aeronáutica, entre los más importantes son: [17,18,19] .

- Peso.
- Estrés final.
- Estrés de rendimiento.
- Rigidez (módulo de elasticidad).
- Límites de temperatura.
- Resistencia a la corrosión (ambiente hostil).
- Resistencia a la fatiga (Curva de fatiga Esfuerzo-Número de ciclo).
- Tenacidad a la fractura.
- Fragilidad a bajas temperaturas.
- Resistencia al crecimiento de grietas.
- Ductilidad.

- Mantenibilidad (tiempo de inspecciones, reparaciones, etc.).
- Fiabilidad (tiempo medio entre fallo, etc.).
- Fabricación.

El desarrollo de materiales aeronáuticos comenzó en 1903 con estructuras de madera en los primeros vuelos. A partir de 1927, las aleaciones de aluminio se convirtieron en dominantes en la industria gracias a avances en tecnologías de revestimiento y anodizado, manteniendo su predominio durante más de 80 años, al pasar de los años se incorporaron las aleaciones de titanio, materiales compuestos y superaleaciones entre otros, en la figura 2 se muestra el porcentaje de materiales de las diferentes generaciones de la empresa Boeing [17].

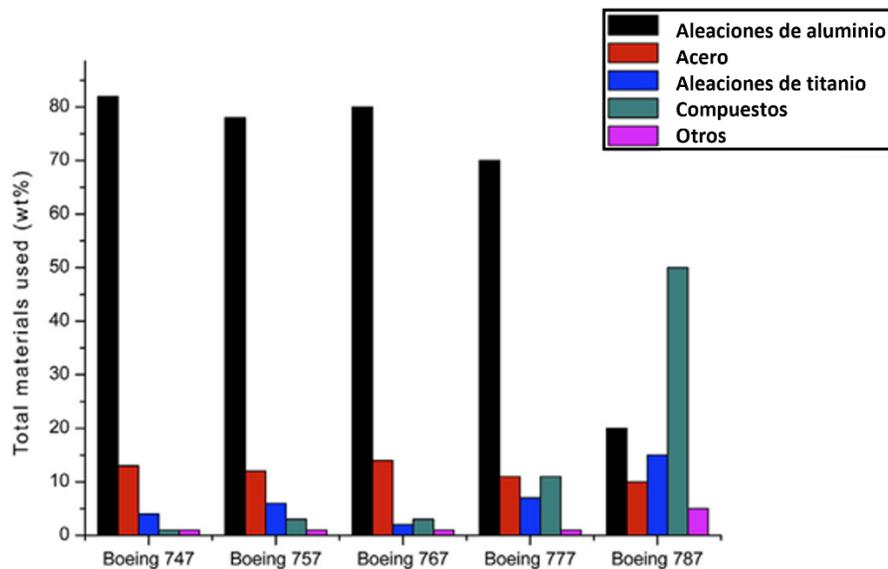


Figura 2. Evolución de material utilizados en distintas generaciones de aviones Boeing [17].

### 2.1.1 Aluminio y sus aleaciones

Las aleaciones a base de aluminio son un material clave y base para las estructuras del fuselaje esto debido a las diversas ventajas que tienen; bajo costo, fácil fabricación y peso ligero. Desde 1920 ha sido el material más utilizado en la construcción de aeronaves,(fig3) hoy en día existen dos series de aleaciones a base de aluminio, las principales aleaciones estructurales de aluminio han sido;

- las aleaciones 2XXX que contienen cobre (a partir de 2024).
- las aleaciones 7XXX que contienen zinc (a partir de 7075).

La serie 2XXX de aleaciones basadas en aluminio-cobre (Al-Cu) está principalmente compuesta por cobre y puede ser tratada térmicamente para alcanzar una resistencia comparable a la del acero. El cobre se disuelve en la matriz de aluminio formando una fase llamada  $Al_2Cu$ , y en ocasiones se combina con magnesio (Mg) para formar la fase  $Al_2CuMg$ , lo que aumenta la resistencia. Estas dos fases precipitadas resultan en una mayor resistencia. Además, las aleaciones de la serie 2000 tienen una tolerancia al daño superior y una mejor resistencia a la fatiga en comparación con otras aleaciones basadas en aluminio [17,20,21].

La serie 7XXX basadas en aluminio-zinc (Al-Zn) están principalmente aleadas con zinc y pueden ser tratadas térmicamente para lograr la mayor resistencia en comparación con otras series de aleaciones basadas en aluminio. El zinc tiene una alta solubilidad en el aluminio y, cuando se combina con magnesio (Mg) y cobre (Cu), forma diversas fases que fortalecen significativamente la aleación. La aleación 7075 es un ejemplo destacado utilizado en aplicaciones donde la resistencia es fundamental, como la piel superior de alas y estabilizadores. Sin embargo, estas aleaciones tienden a tener baja tenacidad a la fractura, tolerancia al daño limitada y una resistencia a la corrosión deficiente. Avances de estas aleaciones han llevado a su modificación para mejorar su resistencia, tenacidad y resistencia a la corrosión con el desarrollo de las aleaciones 7150 y 7055 [17,20,21].

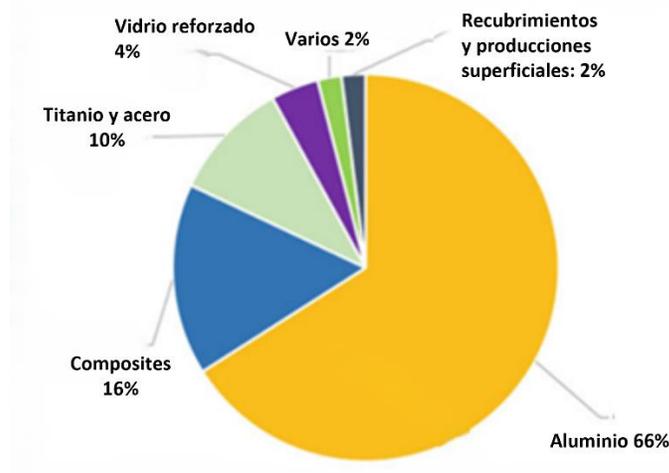


Figura 3. Porcentajes de los diferentes materiales utilizados en el Airbus A380, sobresaliendo las aleaciones de aluminio [4].

Los avances en ambas series se lograron principalmente mediante la reducción de niveles permitidos de impurezas, especialmente hierro y silicio, lo que resulta en una disminución de las partículas de la segunda fase de mayor tamaño en el volumen. Dado que estas fases secundarias a menudo son los puntos de inicio para el daño por fatiga y fractura, la mejora en la pureza llevó al desarrollo de variantes de aleaciones más resistentes al daño, como la evolución de la aleación 2024 a 2124, 2224 y, finalmente, 2524 [22].

## 2.1.2 Titanio y sus aleaciones

El titanio y sus aleaciones juegan un papel importante en el sector aeronáutico debido a sus propiedades, como su alta resistencia, excelente resistencia a la corrosión, baja densidad y capacidad para soportar altas temperaturas entre otros [21].

Estas características hacen que el titanio sea esencial en la fabricación de componentes críticos en aeronaves (Fig,4), como estructuras, partes de motores y sistemas de tren de aterrizaje, contribuyendo así a la seguridad, eficiencia y rendimiento de las aeronaves modernas [18,22].

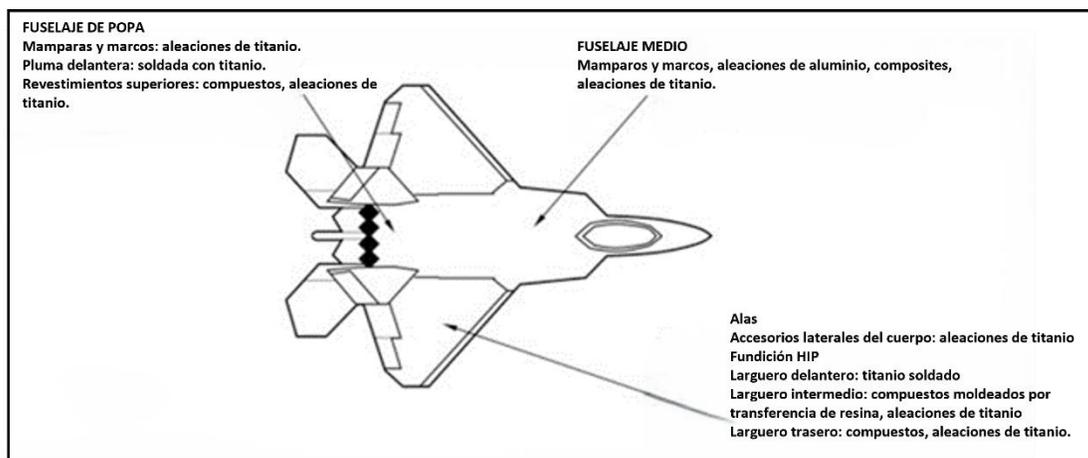


Figura 4 Aleación de titanio presente en el avión de combate avanzado Lockheed Martin-Boeing F22 Raptor [4].

La clasificación de las aleaciones de Ti se divide en cuatro clases dependiendo del porcentaje de elementos  $\beta$  presente, estas clases son:  $\alpha$ , cercanas a  $\alpha + \beta$  y  $\beta$  metaestables, estos elementos son Mo, Cr, V, Ta, Fe y Ni, principalmente; son estos elementos los que puede modificar las propiedades mecánicas y químicas de las aleaciones [24].

Una de las aleaciones más usadas en este sector es, Ti-6Al-4V, que su producción inicio en la década de 1950 y siguen siendo fundamental en la industria aeroespacial debido a su conjunto equilibrado de propiedades. Esta aleación mantiene su resistencia incluso a altas temperaturas, lo que es beneficioso para estructuras de aviones y misiles en condiciones de funcionamiento exigentes [23,24].

### 2.1.3 Superaleaciones

En la primera mitad del siglo XX, antes del surgimiento de las superaleaciones, los aceros inoxidable se empleaban en aplicaciones estructurales de alta temperatura, incluyendo componentes de los nuevos motores a reacción. Sin embargo, a medida que los motores de turbina de gas aumentaban su rendimiento, quedó claro que los aceros presentaban algunas limitaciones. Estas limitaciones impulsaron la necesidad de desarrollar una nueva clase de aleaciones metálicas que pudieran superar estos obstáculos [25].

Así nació la categoría de las superaleaciones, denominadas así debido a sus propiedades estructurales excepcionales, que se mantienen incluso a temperaturas relativamente altas. El desarrollo de estas aleaciones respondió a la demanda de materiales capaces de ofrecer un alto rendimiento y una estabilidad estructural duradera bajo condiciones de servicio que involucraban altas tensiones mecánicas y agentes corrosivos [25].

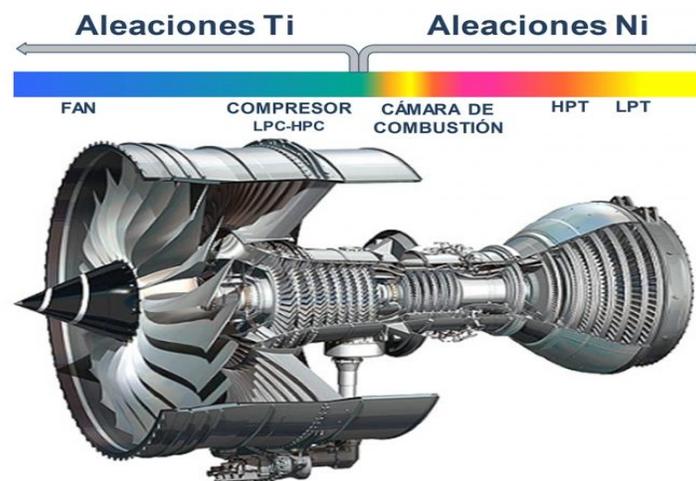


Figura 5. Tipos de materiales utilizados en turborreactor[25].

El término "superaleaciones" tienen sus raíces en el período posterior a la Segunda Guerra Mundial, se acuñó por primera vez para describir aleaciones utilizadas en turbocompresores y turbinas de motores de aviones, como se muestra en la figura 5. Estos componentes requerían una resistencia excepcional y un rendimiento óptimo en condiciones extremas. Las superaleaciones demostraron ser una solución prometedora y se convirtieron en la elección preferida para aplicaciones que requerían un rendimiento sobresaliente en condiciones extremas de temperatura y estrés mecánico [25,2].

Aunque inicialmente se enfocaron en aplicaciones aeroespaciales, las superaleaciones han evolucionado y se han convertido en materiales fundamentales para una amplia variedad de industrias, donde la resistencia a altas temperaturas y la estabilidad son requisitos esenciales. A medida que se expandieron, se utilizaron en plantas químicas y de petróleo en tierra, en la figura 6 se puede observar las principales industrias y componentes en donde las superaleaciones están presentes. La clave de su popularidad radica en su capacidad para retener la mayor parte de su resistencia incluso después de exposiciones prolongadas a temperaturas superiores a 650 °C (1200 °F). Esta propiedad es esencial para resistir las demandas extremas de estos entornos de funcionamiento.

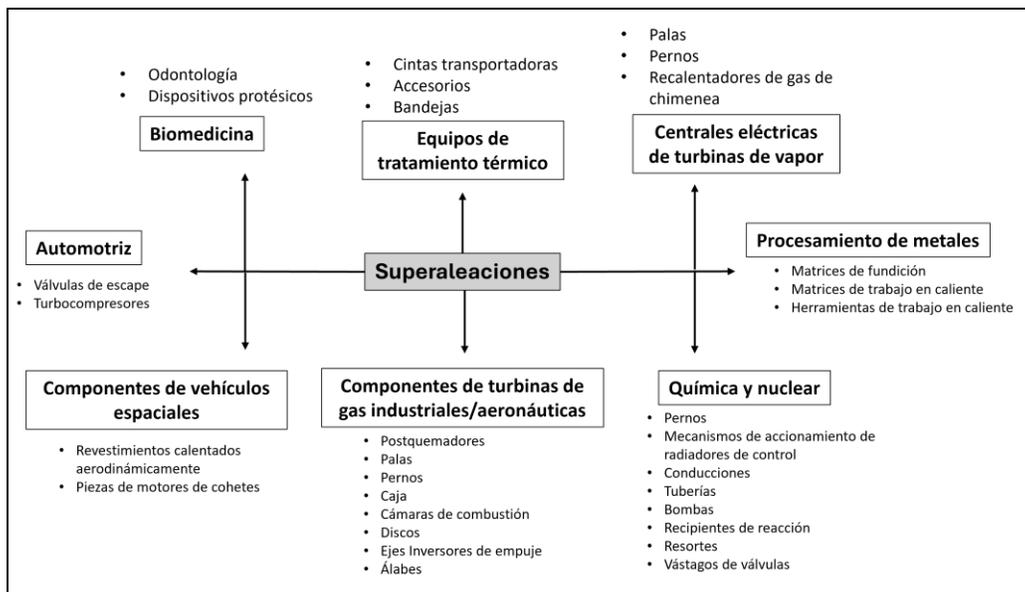


Figura 6. Un esquema con los principales campos de aplicación de las superaleaciones [4].

Por lo general, las superaleaciones exhiben una estructura o matriz de cristales cúbicos de cara centrada y están compuestas principalmente de aleaciones que contienen elementos como níquel, cobalto, titanio o níquel-hierro.

Las superaleaciones deben de contar con las siguientes propiedades, para cumplir con eficiencia el trabajo a realizar: [2]

- Capacidad para soportar cargas a altas temperaturas de operación, cercanas a su punto de fusión, especialmente en los puntos calientes de los componentes de la turbina de gas.
- Estabilidad mecánica a largo plazo, con baja deformación bajo carga en aplicaciones estructurales de alta temperatura, y mantenimiento de propiedades mecánicas como resistencia máxima a la tracción, límite elástico y tenacidad a la fractura.
- Resistencia a la corrosión en ambientes agresivos generados por la combustión de turbosina y la presencia de contaminantes, incluyendo fenómenos de corrosión a alta temperatura en fase gaseosa y posible condensación de depósitos de sal, tanto sólidos como líquidos.

## **2.2 Clasificación de superaleaciones**

Las superaleaciones se clasifican en tres según el metal predominante presente en la aleación [2,25].

### **2.2.1 Superaleaciones a base de hierro**

Surgieron como una evolución de los aceros inoxidable austeníticos y se fundamentan en la idea de combinar una estructura de matriz FCC de empaquetamiento denso con elementos de endurecimiento por solución sólida y formación de precipitados (en la mayoría de los casos). La matriz austenítica se compone principalmente de níquel y hierro, siendo necesario un contenido mínimo del 25 % de níquel para estabilizar la fase FCC. Con carburos (son aleaciones Fe-Ni-Cr).

### **2.2.2 Superaleaciones a base de cobalto**

Contienen más del 60 % de cobalto en peso. El níquel y el hierro se agregan como estabilizadores para promover la formación de la fase austenítica de alta temperatura del

cobalto. El cromo, por lo general, se encuentra en concentraciones que oscilan entre el 20 % y el 30 %, mientras que el molibdeno, el tungsteno y otros metales refractarios se añaden en una proporción máxima de alrededor del 10 %.

### 2.2.3 Superaleaciones base níquel

Las superaleaciones base níquel son aleaciones en las que el níquel es el elemento principal o predominante, y suelen contener adiciones de elementos comunes como aluminio, titanio y cromo. Gracias a estas adiciones presentan una excelente resistencia a la corrosión y oxidación a altas temperaturas, así como una buena resistencia mecánica a temperaturas elevadas.

Las superaleaciones basadas en níquel se utilizan principalmente en procesos industriales químicos y petroleros, cámaras de combustión, álabes de turbinas de gas de aviones(fig.7), toberas, industria aeroespacial y algunas baterías eléctricas.

Gracias a los procesos termomecánicos y tratamientos térmicos utilizados, las piezas fabricadas con superaleaciones basadas en níquel presentan una estabilidad superficial que les confiere resistencia a la termofluencia, fatiga, corrosión, oxidación y les permite operar a altas temperaturas durante largos períodos de tiempo.



*Figura 7 Superaleación base níquel presente principalmente en los álabes de turborreactor de aeronaves [imagen obtenida en línea].*

Las superaleaciones base níquel suelen presentar las siguientes fases principales (Fig.8) [2,25].

Fase Gamma ( $\gamma$ ): Esta fase es la matriz de la aleación y tiene una estructura cristalina cúbica centrada en las caras (FCC) a base de níquel. Por lo general, contiene un alto

porcentaje de elementos en solución sólida, como cobalto, cromo, molibdeno, hierro y tungsteno.

Fase Gamma Prima ( $\gamma'$ ): La fase gamma prima en las superaleaciones base níquel consiste en  $Ni_3(Al, Ti)$  y es una fase de precipitación. La fase  $\gamma'$  se precipita de manera homogénea en toda la matriz  $\gamma$  y proporciona estabilidad. Además, la fase  $\gamma'$  es altamente dúctil y contribuye a fortalecer la matriz sin comprometer la resistencia a la fractura de la aleación.

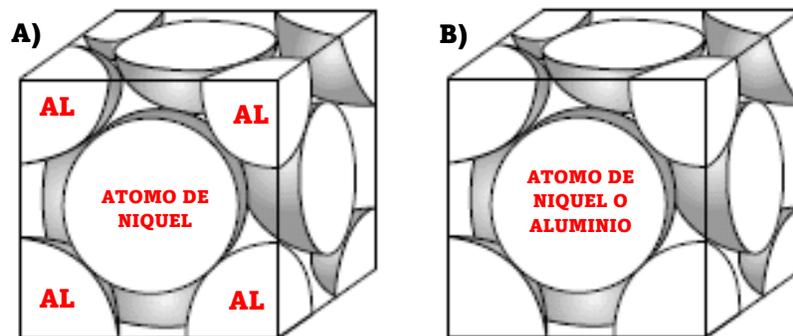


Figura 8. Estructura cristalina FCC, presentes en las superaleaciones base níquel, A) Gamma prima B) Gamma [4].

### **Inconel 600:**

La aleación INCONEL® 600 (UNS N06600/W.Nr. 2.4816) es un material estándar para aplicaciones que requieren resistencia a la corrosión y al calor. Tiene excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia y buena trabajabilidad. El alto contenido de níquel le confiere resistencia a la corrosión por compuestos orgánicos e inorgánicos, y es inmune al agrietamiento por corrosión bajo tensión de iones de cloruro. El cromo brinda resistencia a compuestos de azufre y a condiciones oxidantes a altas temperaturas o en soluciones corrosivas. La aleación no se endurece por precipitación, sino por trabajo en frío. INCONEL aleación 600 es versátil y se utiliza en diversas aplicaciones, desde temperaturas criogénicas hasta más de 2000 °F (1095 °C) [26].

### **Inconel 690:**

La aleación INCONEL® 690 (UNS N06690/W. Nr. 2.4642) es una combinación de níquel y cromo con una alta resistencia a medios acuosos corrosivos y altas temperaturas atmosféricas. Además de su resistencia a la corrosión, la aleación 690 muestra una resistencia

significativa, estabilidad metalúrgica y características favorables para su fabricación. El contenido considerable de cromo brinda a la aleación una excelente resistencia a químicos y gases oxidantes a altas temperaturas. La alta proporción de níquel proporciona resistencia al agrietamiento por corrosión bajo tensión en entornos que contienen cloruro y también frente a soluciones de hidróxido de sodio [27].

### **Inconel 718:**

La aleación INCONEL® 718 (UNS N07718/W.Nr. 2.4668) es un material resistente a la corrosión y de alta resistencia compuesto por cromo y níquel, que se utiliza en un rango de temperatura de -423°F a 1300°F. Esta aleación, que puede ser endurecida por envejecimiento, se puede fabricar fácilmente, incluso en piezas complejas. Sus propiedades de soldadura son destacables, especialmente su resistencia al agrietamiento posterior a la soldadura. La combinación de la facilidad y la economía de fabricación de la aleación 718 de INCONEL, junto con su buena resistencia a la tracción, fatiga, fluencia y ruptura, ha resultado en su amplia aplicación en diversos campos [28].

## **2.3 Corrosión**

La corrosión se refiere al proceso químico o electroquímico por el cual un material metálico, se deteriora gradualmente debido a la interacción con su entorno. Es un fenómeno natural que ocurre cuando el metal se expone a sustancias corrosivas, como el oxígeno, la humedad, los ácidos, los compuestos salinos o la contaminación atmosférica. A estos ambientes se le conoce como electrolitos [30, 31,32].

Estos electrolitos facilitan el traslado de iones (tanto cationes como aniones) y originan dos reacciones distintas (anódica y catódica). Al contar con dos variedades de metales en un electrolito específico, el metal menos noble asumiría la función de ánodo, presentando corrosión en el proceso, mientras que el metal más noble desempeñaría el papel de cátodo, quedando protegido [30, 32,33].



Figura 9. tipos de corrosión y tipos de corrosión típicos en aeronáutica [31-32].

### 2.3.1 Corrosión en la industria aeronáutica

El manejo de la corrosión en la industria aeronáutica representa una preocupación histórica, la cual adquiere una relevancia creciente conforme la flota de aeronaves envejece. La corrosión tiene el potencial de ocasionar que una aeronave salga de servicio e incluso, en situaciones extremas, provocar fallos catastróficos (Fig. 10) [29].



Figura 10. Accidente del avión Boeing 737 operado por Aloha Airlines. [obtenida de internet]

En una industria tan importante como la industria aeronáutica, se hace necesario que los materiales y componentes sean altamente eficientes frente a condiciones o entornos que

puedan ponerlos en riesgo, como es el caso de los ambientes corrosivos y las ramificaciones asociadas [29].

En el estudio de SJ.findlay y colaboradores, mencionan que en aeronaves los componentes pueden fallar cuando ya no soportan las tensiones durante su operación. También determina diferentes razones de fallas entre ellas, la corrosión, que se encuentra en segundo lugar en componentes aeronáuticos y es la primera en componentes de ingeniería como se muestra en la tabla 1.

*Tabla 1. Frecuencia de los mecanismos de falla[8].*

<b>Mecanismo de fallo</b>	<b>Porcentajes de falla (%)</b>	
	<b>Componentes de ingeniería</b>	<b>Componentes de aeronaves</b>
<b>Corrosión</b>	29	16
<b>Fatiga</b>	25	55
<b>Fractura por fragilidad</b>	16	-
<b>Sobrecarga</b>	11	14
<b>Corrosión a alta temperatura</b>	7	2
<b>SCC</b>	6	7
<b>Arrastre</b>	3	-
<b>Desgaste/abrazión/erosión</b>	3	6

### **Tipos de corrosión en aeronáutica**

La corrosión esta presenta en todas las industrias que utilizan materiales metálicos en sus componentes, y la industria aeronáutica no es la excepción,(fig.9) la mayoría de los componentes son propensos a sufrir algún tipo de corrosión en mayor o menor porcentaje [31,32].

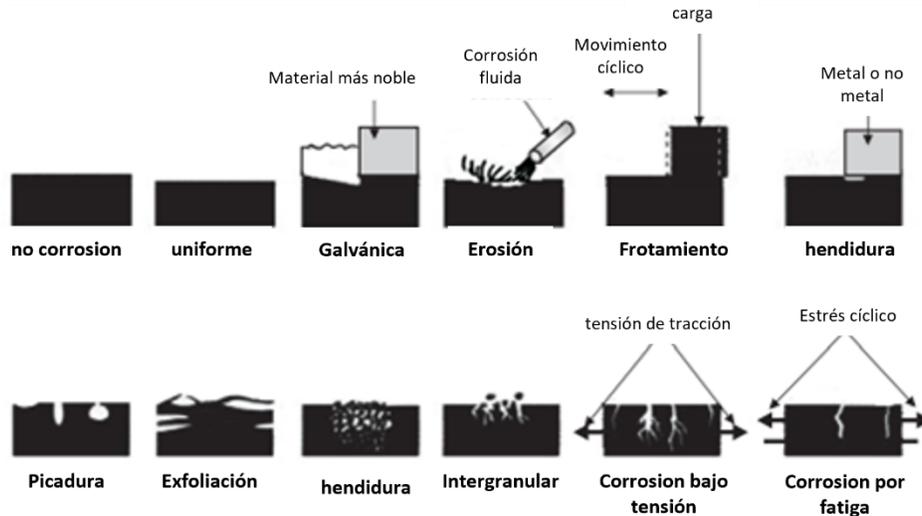


Figura 9. Esquemas de las Formas Comunes de corrosión [30].

En aeronaves existen diferentes tipos de corrosión, en la figura 11 se observa esquemas de cómo se puede observar desde un corte trasversal y se explican a continuación.

**Corrosión uniforme:** Este tipo de corrosión, llamado también corrosión general o seca, afecta de manera relativamente homogénea la superficie metálica estéril. El oxígeno juega un papel central en su desarrollo. Cuando los metales se exponen a ambientes húmedos, pueden manifestar un aspecto oxidado [34-37].

**Corrosión galvánica;** La corrosión galvánica se presenta al unir dos metales distintos en un sistema. Los metales con menor potencial actuarán como ánodos (cediendo iones al sistema), mientras que los metales con mayor potencial electroquímico funcionarán como cátodos. Un caso es la corrosión que se presenta entre los elementos del fuselaje y los remaches [34-37].

**Corrosión intergranular:** La corrosión intergranular es un tipo de corrosión localizada que ocurre en los límites de granos de un metal o aleación, sin afectar significativamente los propios granos o cristales. Surge debido a una diferencia de potencial entre los límites anódicos y catódicos de los granos. En casos graves, este ataque puede llevar a una disminución de la resistencia y ductilidad, llegando incluso a la destrucción del metal por corrosión [34-37].

**Corrosión por picadura:** La corrosión por picaduras provoca la formación de agujeros en la estructura. Estos agujeros pueden variar en forma, pero tienden a crecer vertical y profundamente en el material. Las picaduras pueden también desencadenar la formación de grietas por fatiga, disminuyendo la resistencia del material [34-37].

**SCC:** Esto ocurre debido a la combinación de tensiones de tracción estática o aplicada en una superficie durante un tiempo bajo condiciones corrosivas. En general, la susceptibilidad se incrementa con el aumento del esfuerzo, especialmente cerca del límite elástico, así como con la elevación de la temperatura, el tiempo de exposición y la concentración de agentes corrosivos en el entorno circundante [34-37].

### 2.3.2 Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica es un proceso químico que ocurre cuando un metal se deteriora debido a reacciones electroquímicas con su entorno. Es un tipo común de corrosión que ocurre en presencia de un electrolito.

El fundamento de la corrosión electroquímica se basa en las reacciones redox (de reducción-oxidación) que ocurren entre un metal y su entorno corrosivo [32,38].

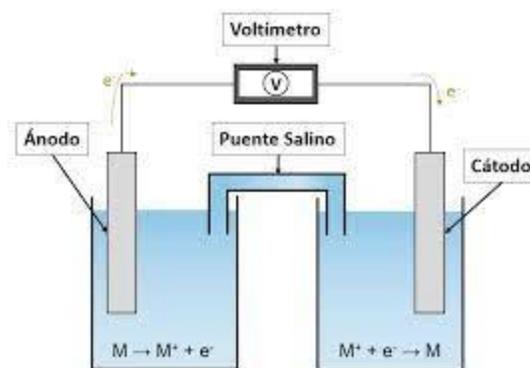


Figura 10 Esquematización de celda electroquímica [33].

Cuando un metal se encuentra en contacto con un electrolito, que puede ser un líquido conductor o incluso la humedad presente en el aire, se establece una interfaz metal-electrolito. En esta interfaz, ocurren dos reacciones electroquímicas simultáneas:[32,33,38].

**Oxidación:** En el metal expuesto al electrolito, los átomos metálicos pierden electrones y se convierten en iones metálicos positivos (cationes).

Reducción: En el electrolito, ocurre una reacción de reducción donde los iones presentes en el electrolito aceptan los electrones liberados en la reacción de oxidación. Esto puede involucrar la reducción de oxígeno, la reducción de iones hidrógeno o la reducción de otros componentes del electrolito, dependiendo del medio corrosivo.

A medida que la corrosión electroquímica avanza, el metal se va oxidando en el ánodo y los iones metálicos positivos se disuelven en el electrolito. Esto provoca la degradación y la pérdida de masa del metal a lo largo del tiempo [33].

### **2.3.3 Cinética de corrosión**

La cinética de corrosión se refiere al estudio de la velocidad y el mecanismo de la corrosión de materiales en contacto con su entorno corrosivo. La cinética de corrosión se ocupa de comprender cómo y a qué velocidad ocurre este proceso de deterioro [39].

La velocidad de corrosión puede variar según varios factores, como la naturaleza del material, la composición química del entorno corrosivo, la temperatura, la presión y otros factores ambientales. El estudio de la cinética de corrosión implica la medición y el análisis de la velocidad de corrosión en función de estos factores [39,40].

El conocimiento de la cinética de corrosión es fundamental para el diseño de materiales resistentes a la corrosión, así como para la selección de materiales adecuados en entornos corrosivos específicos.

## **2.4 Técnicas de evaluación electroquímicas**

Las técnicas de corrosión electroquímica son métodos veloces para evaluar la capacidad de un material para resistir la corrosión al estar expuesto a un ambiente específico. El comportamiento del material frente a la corrosión se estima mediante la medición de su potencial y corriente, lo cual proporciona información sobre su respuesta ante este fenómeno. Entre las más utilizadas se encuentran:

- Ruido electroquímico.
- Curvas de polarización cíclica.
- Espectroscopia de impedancia electroquímica.
- Resistencia de polarización lineal.

### **2.4.1 Ruido electroquímico**

La técnica de ruido electroquímico (EN por sus siglas en inglés) ha sido un avance significativo en la investigación y monitorización de la corrosión. Una de sus ventajas clave es la capacidad para detectar y analizar las etapas iniciales de la corrosión localizada. El EN describe las fluctuaciones espontáneas de potencial y corriente de bajo nivel durante procesos electroquímicos [41].

El EN Permite estimar la velocidad y el mecanismo de corrosión en diversas aleaciones metálicas a través de la medición y análisis de las fluctuaciones de corriente y voltaje. Además, su principal ventaja radica en que no perturba los sistemas corrosivos estudiados durante la medición, lo que permite que los sistemas se mantengan en su potencial de corrosión natural [42,43].

Cottis, RA (2008) [41] describe dos tipos de ruidos electroquímicos.

#### **Ruido de Potencial Electroquímico**

La medición del Ruido de Potencial Electroquímico (RPE) se puede llevar a cabo de dos maneras: registrando la diferencia de potencial entre un electrodo corroído y un electrodo de referencia con bajo nivel de ruido, o registrando la diferencia de potencial entre dos electrodos corroídos. Aunque la segunda técnica tiene ventajas para la monitorización práctica de la corrosión, los resultados pueden ser un poco más complicados de interpretar, ya que no es posible determinar con certeza cuál de los dos electrodos está generando el ruido.

#### **Ruido de Corriente Electroquímica**

Normalmente, la medición del Ruido de Corriente Electroquímica (RCE) se realiza al medir la corriente entre dos electrodos que son nominalmente idénticos. Como alternativa, se puede medir la corriente generada por un solo electrodo que se mantiene a un potencial fijo. El primer método es más sencillo, ya que evita la necesidad de utilizar un electrodo de referencia con bajo nivel de ruido y un potencióstato, y también elimina las dudas acerca de cómo afecta el mantener el electrodo de trabajo a un potencial fijo en lugar de permitir que varíe de manera natural.

## **Métodos de análisis**

Existen diferentes métodos de análisis, para la interpretación de los datos obtenidos mediante EN, de los cuales lo más comunes son, dominio o serie de tiempo, dominio o serie en frecuencia y dominio o serie en frecuencia-tiempo, (en este trabajo solo hablaremos y por lo tanto trabajaremos en dominio o serie en el tiempo).

### **Dominio o serie de tiempo**

Este método, (también conocido como dominio de tiempo), se utiliza para analizar las fluctuaciones estocásticas de corriente y potencial a lo largo del tiempo. Permite identificar visualmente detalles característicos de varios tipos de corrosión, como transitorios de rompimiento y repasivación, así como oscilaciones asociadas a resquicios o corrosión por picadura [44].

Además, en el dominio del tiempo, se emplean métodos estadísticos que incluyen medidas como varianza, sesgo, media, curtosis, desviación estándar, índice de localización y resistencia al ruido ( $R_n$ ) para un análisis más completo de la corrosión [44].

### **Análisis visual**

Es el primero que se realiza casi en tiempo real, Las series temporales de potencial y corriente se grafican en función del tiempo. Esto permite identificar patrones y anomalías visualmente. Algunas de estas son transitorios o tendencias y así poder identificar corrosión por picadura, uniforme o si el sistema es pasivo. Sin embargo, como se trata de un análisis visual las interpretaciones de este puede variar dependiendo la experiencia en el área.

### **Análisis estadísticos**

Los métodos estadísticos simples consideran una serie de tiempo como una colección de potenciales o corrientes individuales, sin tener en cuenta la relación entre un valor y el siguiente. En lugar de ello, se enfocan en la distribución de los valores a lo largo del tiempo [41,44,46]. Algunos de estos parámetros son los siguientes;

**Desviación estándar:** La desviación estándar es un parámetro estadístico utilizado para medir la magnitud de las fluctuaciones en señales de ruido electroquímico. Se relaciona con la velocidad de corrosión, ya que, a mayor desviación estándar en un registro, mayor es

la velocidad de corrosión del sistema. Este parámetro proporciona información sobre la amplitud de las fluctuaciones relacionadas con el ruido y es comúnmente utilizado en aplicaciones de control de corrosión, siendo el primer paso en el análisis de procesos [41,44,46].

$$\sigma_x = \sqrt{x^2} = \sqrt{\frac{\sum_1^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad [ec. 1]$$

**Media:** Existen dos tipos de medias, de corriente y de potencial, ambas indican diferentes valores, El valor del potencial promedio es útil para calcular parámetros en procesos de ataques localizados y la media en corriente se esperaría que tuviese un valor de cero cuando se realiza la medición entre dos electrodos idénticos lo cuál en la práctica no ocurre debido a pequeñas diferencias en el comportamiento de cada uno de los dos electrodos [41,44,46].

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i^2} \quad [ec. 2]$$

Es un punto discutible si el potencial o la corriente media pueden considerarse realmente como EN, y algunos métodos de medición utilizan un filtro de paso alto para eliminar estos datos.

**Resistencia (Rn);** Es el valor que se obtiene al dividir la variación estándar del potencial entre el valor de la variación estándar de la corriente, multiplicado por el área total expuesta del material. Como lo muestra la siguiente formula:

$$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_I} * A \quad [ec. 3]$$

Varias series de experimentos han demostrado que Rn es comparable con la resistencia a la polarización lineal, Rp. Aceptando la equivalencia de Rp y Rn, es posible

determinar la densidad de corriente de corrosión a partir de la ecuación de Stern-Geary [41,44,46].

**Índice de localización;** El índice de localización se creó para reemplazar el coeficiente de variación y evitar problemas con valores muy grandes. Se calcula como la desviación estándar de una corriente dividida por la raíz cuadrática media (rms) de la misma corriente:

$$IL = \frac{\sigma_I}{I_{rms}} \quad [ec. 4]$$

Debido a que el valor RMS siempre es mayor que la media, el índice de localización nunca puede ser mayor que 1, Así valores de IL cercanos a 1, indica que el proceso está siendo dominado por corrosión localizada. Mientras que valores cercanos a 0, indica que el proceso está siendo dominado por corrosión uniforme como lo marca en la tabla 2 [41, 44,46].

*Tabla 2 Rango del indice de localización para el tipo de corrosión [47].*

IL	TIPO DE CORROSION
0.1-1	Localizada
0.001-0.01	Generalizada
0.01-0.1	Mixta
>0.1	Iniciación de picado

No obstante, Mansfeld y Sun llevaron a cabo una investigación en la que descubrieron que el uso del índice de localización tiene ciertas restricciones al analizar distintos sistemas, y aunque es posible seguir utilizándolo, se recomienda ejercer precaución al aplicarlo en un contexto específico. Por este motivo, Eden y Reid desarrollaron una patente para identificar el tipo de corrosión basándose en el tercer y cuarto momento estadístico, es decir, el Sesgo y la Curtosis [48].

**Sesgo:** La asimetría, también conocida como sesgo, es un indicador que muestra cuán inclinada está la distribución de valores en una dirección. Se normaliza en relación con la

desviación estándar y carece de unidades de medida. Una distribución perfectamente simétrica tiene una asimetría de 0. La asimetría a veces se ha utilizado para identificar eventos de corrosión por picadura metaestable. Es importante destacar que los eventos transitorios que ocurren en ambas direcciones tienden a tener una asimetría cercana a cero. Por lo tanto, este parámetro puede ser menos útil cuando se monitorea la corrosión utilizando tres electrodos similares.

$$Sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_n - \bar{x}_n}{\sigma} \right)^3$$

[ec. 5]

**Kurtosis:** La kurtosis es un indicador que mide la "altura" o el "pico" de la distribución de valores. En una distribución normal, la kurtosis es 3 y siempre es positiva. A menudo, se resta 3 al valor medido, lo que se conoce como "kurtosis normalizada" para evitar confusiones, aunque no siempre se hace. Si una distribución muestra una cantidad moderada de eventos transitorios en ambas direcciones, se esperaría que tenga una kurtosis mayor que 3, y esto se ha utilizado como indicador de corrosión localizada.

$$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_n - \bar{x}_n}{\sigma} \right)^4$$

[ec. 6]

La tabla 3 muestra los valores de sesgo y Kurtosis según Eden y Reid, según sea la señal que se estudia (corriente o potencial) determinando el tiempo de corrosión presente en el material, complementando otros métodos de análisis.

Tabla 3 tipos de corrosión en base a sesgo y Kurtosis [48].

	Potencial		Corriente	
	Sesgo	Kurtosis	Sesgo	Kurtosis
Uniforme	<+1	<3	<+1	<3
Picadura	<-1	>3	>+2	>3
Intergranular SCC	4	20	-4	20
Intergranular SCC #1	-6.6	18 a 114	1.5 a 3.2	6.4 a 15.6
Intergranular SCC#2	-2 a -6	5 a 45	3 a 6	10 a 60

## 2.4.2 Curvas de polarización potenciodinámica cíclica

Las curvas de polarización cíclica (CPC) es un método de análisis que nos permiten estudiar directamente las propiedades de corrosión de un material. En La CPC, un potencióstato aplica un potencial de corriente continua (CC) que aumenta o disminuye constantemente (potenciodinámico) dentro de un rango específico en una celda electroquímica al electrodo de trabajo, que es el material que se está analizando [49-52].

En el proceso de polarización cíclica, se obtienen curvas CPC, estas curvas representan el comportamiento del potencial del electrodo de prueba en función de la densidad de corriente aplicada. La rama anódica de la curva muestra cómo el potencial del electrodo aumenta en la dirección anódica hasta alcanzar un valor máximo preseleccionado.

Durante este proceso, se polariza el material, lo que induce oxidación o reducción en la superficie dependiendo de si el potencial aumenta o disminuye con el tiempo. Cuando el potencial aumenta, provoca la ruptura de la película pasiva de óxido y un aumento drástico en la corriente, después de eso eventualmente inicia la corrosión, una vez que alcanza un punto específico (Epic).

Una vez alcanzado el potencial máximo se invierte y disminuye hasta volver al potencial en circuito abierto inicial (OCP), lo que convierte la medición en un ciclo. Esta exploración inversa es útil para comprender cómo el material puede recuperar su resistencia a la corrosión después de que esta haya comenzado. Algunos materiales pueden ser excelentes para prevenir la corrosión inicialmente, pero pueden ser menos efectivos para detenerla una vez que ha comenzado [49-52].

En las curvas, dos datos importantes son la histéresis y el potencial de repasivación, ( $E_{rep}$ ). Estos dos datos se ilustran y se explican en la figura 13. La histéresis puede ser positiva o negativa, dependiendo de si la densidad de corriente en el escaneo inverso es mayor o menor que en el escaneo directo. La histéresis proporciona información sobre la facilidad con la que una película pasiva se repara y puede ayudar a entender la corrosión por picaduras. La histéresis positiva ocurre cuando el daño pasivo de la película no se repara y/o se inician picaduras; La histéresis negativa ocurre cuando una película pasiva dañada se repara sola y no se inician picaduras [49].

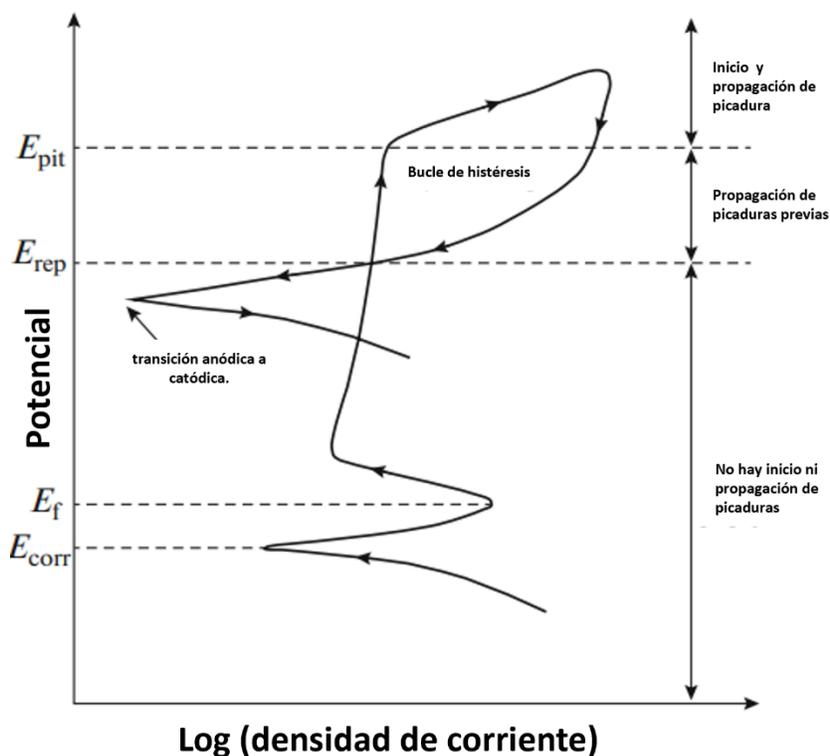


Figura 11 Ilustración esquemática de la curva CPC y los parámetros de corrosión[49].

Cuando el OCP es mayor que  $E_{rep}$ , los pozos de corrosión generalmente seguirán creciendo; cuando es menor, es menos probable que crezcan. La capacidad de un material para recuperar su resistencia a la corrosión se relaciona con su capacidad para reformar la película de óxido pasiva después de su ruptura, es decir, lograr la repasivación.

La interpolación de Tafel (Fig14) se utiliza en electroquímica para determinar los parámetros fundamentales de una curva de polarización cíclica, como la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) y el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) entre otros valores de un sistema electroquímico [50].

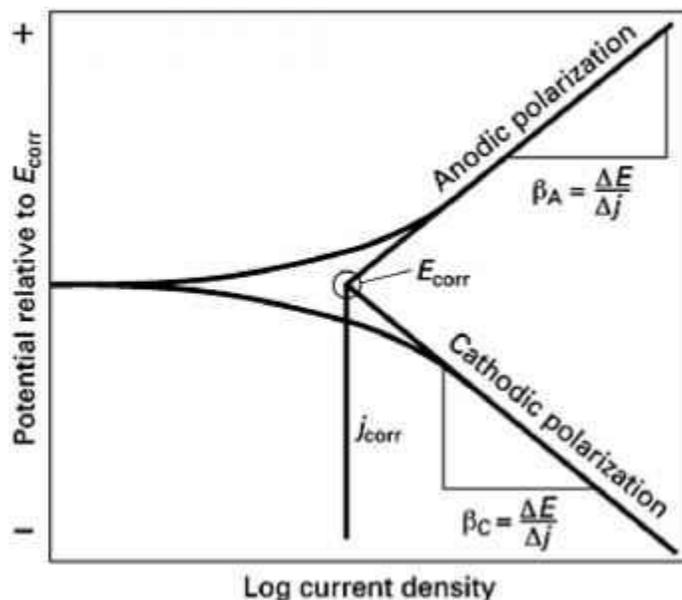


Figura 12. Esquematización de interpolación Tafel [50].

### 2.4.3 Impedancia electroquímica

Esta técnica utiliza una señal de CA para excitar o perturbar un sistema se utiliza comúnmente para investigar procesos electroquímicos en interfaces sólido-líquido, como en electrodos, recubrimientos protectores, películas delgadas. La espectroscopia de impedancia electroquímica es una técnica utilizada en la electroquímica para estudiar la respuesta de un sistema electroquímico a una perturbación sinusoidal en el potencial o la corriente eléctricos [34, 52,53].

Estas perturbaciones son pequeñas señales periódicas en la superficie del electrodo midiendo así su respuesta electroquímica, la cual se analiza para obtener datos de los mecanismos y la cinética de corrosión del material.

Entre sus ventajas se incluyen:

- Puede ser utilizado sobre materiales de alta resistencia como pinturas y revestimientos.
- Puede utilizarse como técnica en línea ya que se dispone de datos dependientes del tiempo.
- Es una técnica no destructiva.
- Proporciona datos cuantitativos.
- Utiliza entornos de servicio.

#### **2.4.4 Resistencia de polarización lineal**

La técnica de resistencia a la polarización proporciona una estimación de la velocidad de corrosión. Este método se basa en la ecuación de Stern Geary. La teoría detrás de la técnica es que la velocidad de corrosión de la probeta de ensayo es inversamente proporcional a su resistencia a la polarización [52, 54,55].

La ventaja de la técnica de monitoreo LPR es que la medición de la velocidad de corrosión es relativamente instantáneamente. Esta es una herramienta más rentable en comparación al método de cupón o el método ER, donde la medición fundamental es la pérdida de metal y donde para la obtención de la velocidad de corrosión es necesario largas exposiciones de tiempo. Por el contrario, la desventaja de LPR es que, para realizarla con éxito, se tiene que exponer en ambientes electrolíticos acuosos limpios, la técnica no funcionará en gases o emulsiones de agua/aceite [54,56].

### **2.5 Métodos de protección**

La corrosión, puede ser significativamente controlada mediante la aplicación de métodos de protección contra la corrosión, el manejo efectivo de la corrosión implica la aplicación de técnicas de ingeniería, que aprovechan los avances tecnológicos y científicos en el desarrollo (entre otros) de recubrimientos anticorrosión y materiales resistentes a la corrosión.

El objetivo principal de estas técnicas de control de la corrosión es minimizar la tasa de corrosión de los materiales a un nivel aceptable, lo que puede aumentar significativamente su vida útil y reducir los costos de mantenimiento y reemplazo [57,58].



Figura 13. Metodos de protección A) ánodos de sacrificio, B) inhibidor de corrosión, C) recubrimientos [obtenidos de internet].

### 2.5.1 Protección catódica

La protección catódica es un método esencial para prevenir la corrosión de estructuras metálicas. Puede lograrse a través de dos enfoques principales: mediante el uso de un ánodo de sacrificio o mediante la aplicación de corriente impresa.

La utilización de "ánodos de sacrificio" (fig. 15A), donde se emplea un ánodo hecho de un metal más activo que la estructura a proteger. En este caso, la estructura a proteger funciona como el cátodo de una nueva celda de corrosión. Este enfoque se aplica ampliamente para proteger estructuras subterráneas como tanques de almacenamiento de agua, tuberías enterradas, cascos de barcos e instalaciones marinas.

La protección catódica también se puede lograr polarizando la estructura a proteger a potenciales más negativos que su potencial de corrosión mediante una fuente de alimentación externa [57,58].

### 2.5.2 Inhibidores de corrosión

Los inhibidores de corrosión (Fig. 15 B), en su mayoría compuestos orgánicos, son esenciales para la prevención de la corrosión. Al introducirse en el medio corrosivo en pequeñas cantidades, estos inhibidores forman una película protectora en la superficie metálica, reduciendo así el contacto entre el metal y el entorno corrosivo. Este método es altamente eficaz en la reducción de la corrosión en diversas aplicaciones industriales [57,58].

### **2.5.3 Recubrimientos**

Recubrimientos son aplicados como materiales delgados, ya sea líquidos o en polvo, y se solidifican para adherirse de manera continua al material que se busca proteger. Es fundamental evitar daños localizados que puedan exponer áreas de la superficie metálica a la corrosión como se ve en la figura 15 C.

Entre los ejemplos de capas de protección mediante recubrimientos superficiales se encuentran la aplicación de pintura o recubrimientos de polímeros, la formación de óxidos metálicos como en el anodizado de aluminio, y la utilización de recubrimientos metálicos como el electrochapado de láminas de acero con zinc o el galvanizado por inmersión en caliente [57,58].

---

## Capítulo III: Metodología experimental

---

### 3.1 Materiales

#### 3.1.1 Composición Química

Se llevó a cabo un análisis del material utilizando la técnica de espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX) mediante el uso de una pistola portátil mostrada en la figura 16. El objetivo principal fue determinar la composición química de la superaleación y compararla con las hojas técnicas.



*Figura 14 .Pistola de Fluorescencia de rayos X.*

#### 3.1.2 Preparación de Electroodos

Las muestras de análisis fueron obtenidas mediante el corte de barras de las diferentes superaleaciones (INCONEL<sup>®</sup> 600,690 y 718) aproximadamente de 1 cm de espesor, se procedió a encapsular en resina conectado a un cable de cobre permitiendo el contacto eléctrico y poder conectarlo las pruebas electroquímicas. Se realizaron un total de 12 electrodos de trabajo, 4 por cada superaleación.

Al finalizar el tiempo de fraguado de la resina se procedió al desbaste y lijado de la superficie de trabajo de las probetas, se realizó mediante una desbastadora metalográfica Marca Struers Modelo Tegrapol 25, Tegraforce 5 y Tegradocer 5, (figura 17) hasta lija de carburo de silicio #600, al finalizar son enjuagadas con alcohol y secados con aire a presión, y almacenadas en un desecador para evitar su oxidación.



*Figura 15. Devastadora metalográfica marca Struers.*

### **3.1.3 Análisis Metalográfico**

Para el análisis microestructural se seleccionaron una probeta de cada material, se realizó la técnica de metalografía siguiendo los pasos de desbaste, y pulido hasta acabado espejo (lija de carburo de silicio #4000), la superficie fue atacada químicamente con una solución de 5 mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 3 mL HNO<sub>3</sub>, 92 mL HCl (ASM Handbook 9) [59] , para revelar su microestructura, los tiempos de permanencia fueron variando de segundos a minutos, puesto que se tenía que verificar el correcto revelado de su microestructura.

Se empleó el microscopio óptico Zeiss modelo V12 observado en la figura 18, para realizar la observación de la microestructura. Se tomaron micrografías con el software Zeiss-Axio observer Z1 a una magnificación de 100X en un área específica.



Figura 16. Microscopio óptico Zeiss modelo V12.

### 3.2 Pruebas electroquímicas

Las pruebas electroquímicas que se realizaron fueron curvas de polarización cíclica y ruido electroquímico preparadas en una celda de corrosión convencional, utilizando un equipo de potencióstato/galvanostato/ZRA VERSASTAT 4 (fig.19) con una configuración de tres electrodos; un electrodo de trabajo, un electrodo auxiliar de platino y un electrodo de referencia de calomel saturado. Se manejaron dos electrolitos diferentes, de NaCl al 5% y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 1%, a dos temperaturas diferentes, 25 °(ambiente) y 60°. En la tabla 4 se puede observar la matriz de experimentación.

Tabla 4. Matriz de experimentación

Superaleación	Temperatura (°C)	Electrolito	Técnicas electroquímicas	
			Ruido electroquímico	Curvas de polarización cíclica
<b>600</b>	25	NaCl 5%	*	*
	60	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1%	*	*
<b>690</b>	25	NaCl 5%	*	*
	60	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1%	*	*
<b>718</b>	25	NaCl 5%	*	*
	60	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1%	*	*

Las pruebas electroquímicas son métodos fundamentales utilizados en el estudio de procesos de corrosión. Estas pruebas se basan en la medición y análisis de los cambios eléctricos que ocurren en una interfaz metal-electrolito durante la corrosión.



Figura 17 Potenciostato/galvanostato/ZRA VERSASTAT 4 y celda de corrosión.

### 3.2.1 Curvas De Polarización Cíclica

Las curvas de polarización son herramientas esenciales para el estudio de la corrosión, ya que proporcionan información sobre la cinética de corrosión, los mecanismos de corrosión y la resistencia a la corrosión de los materiales. Al igual que la prueba de ruido electroquímico, en esta prueba se manejaron dos electrodos de trabajo, (electrodo de platino y electrodo de superaleación) y un electrodo de referencia (electrodo calomel saturado), siguiendo la norma ASTM G61 [61], los parámetros electroquímicos con los que se llevó a cabo esta técnica se muestran en la tabla 7.

Tabla 5. Parámetros electroquímicos utilizados en CPC.

<b>Rango de polarización</b>	-1.2 a 1.2 mV vs OCP
<b>Ciclo</b>	Completo
<b>Velocidad de barrido</b>	1 mV/seg
<b>Potencial de inicio</b>	OCP
<b>Electrodo de referencia</b>	Calomel saturado (ECS)

Una vez obtenido las curvas se realiza la extrapolación Tafel (fig.20), que es un método matemático utilizado para estimar la corriente de corrosión ( $I_{corr}$ ) o el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) entre otros valores de una celda electroquímica, lo que nos proporciona

información principalmente sobre la velocidad de corrosión y la tendencia que tiene el material al corroerse.

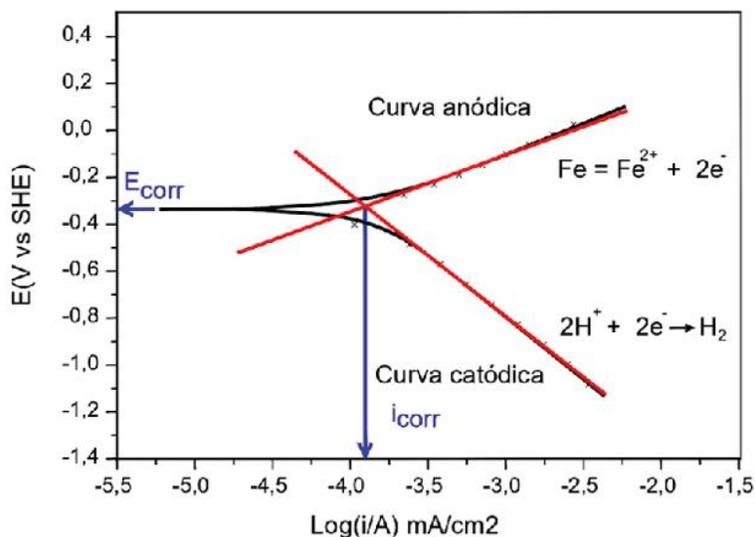


Figura 18 Ejemplificación de extrapolación Tafel[50].

Esta técnica implica la extensión de una serie de valores lineales conocidos en un gráfico de Tafel para determinar estos parámetros. Todo este proceso se puede llevar a cabo manualmente o con la ayuda de software, en este caso se utilizó la ayuda del programa Cview para obtener los datos antes mencionados, figura 21.

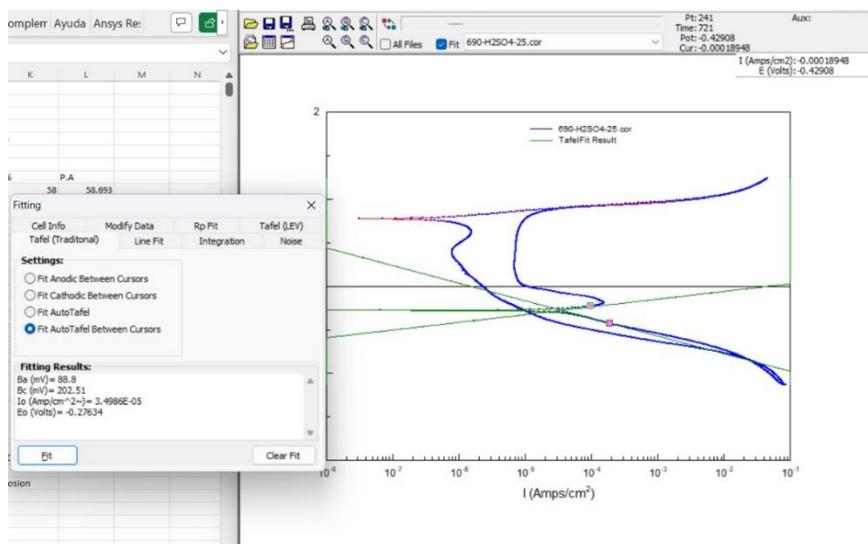


Figura 19. Software Cview obteniendo datos electroquímicos.

### 3.2.2 Ruido Electroquímico

Es una técnica no invasiva, sensible y versátil que permite monitorear y comprender mejor el comportamiento corrosivo de los materiales en diferentes condiciones de servicio. Como se mencionó antes, para esta prueba se utilizó un arreglo de 3 electrodos, dos electrodos de trabajo, (electrodo de platino y electrodo de superaleación) y un electrodo de referencia (electrodo calomel saturado), siguiendo la norma ASTM G199-9[60]. En la tabla 5 se exponen los parámetros de la prueba.

*Tabla 6. Parámetros de técnica de Ruido Electroquímico.*

<b>Parámetros de EN</b>	
<b>Velocidad de adquisición de datos</b>	1 dato por segundo
<b>Número de datos</b>	4096
<b>Electrodo de referencia</b>	Calomel Saturado (ECS)

Mediante el uso del programa desarrollado en MATLAB 2020a por el Grupo de Corrosión y protección del CIIIA/FIME/UANL se realizó el procesamiento de los datos para obtener el análisis en el dominio del tiempo, para obtener mediante fórmulas mostradas en la tabla 6:

Tabla 7. Fórmulas para el análisis en el dominio del tiempo.

Fórmulas para el análisis en el dominio del tiempo	
Resistencia al ruido	$R_n = \frac{\sigma_v}{\sigma_I} * A$
Índice de localización	$IL = \frac{\sigma_I}{I_{rms}}$
Sesgo	$Sesgo = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_n - \bar{x}_n}{\sigma} \right)^3$
Kurtosis	$Kurtosis = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{x_n - \bar{x}_n}{\sigma} \right)^4$

### 3.3 Microscopía Electrónica de Barrido

Para la caracterización de la superficie de las muestras, se empleó la técnica de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) mediante el uso de un microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo 6510lv mostrado en la figura 22. Se examinó la superficie del material a un aumento de 200X y 500X.

Luego, mediante el uso de la técnica de Espectroscopía por Dispersión de Energía (EDS), se identificaron los elementos presentes en la superficie y los elementos causantes de corrosión desarrollados en la superficie del material durante las pruebas electroquímicas, buscando.



Figura 20. Microscopio electrónico de barrido marca Jeol modelo 6510lv.

---

## CAPITULO IV: Resultados y Discusión

---

### 4.1 Análisis de composición química.

En la tabla 8 se presentan la composición química obtenida mediante espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX) [9,10].

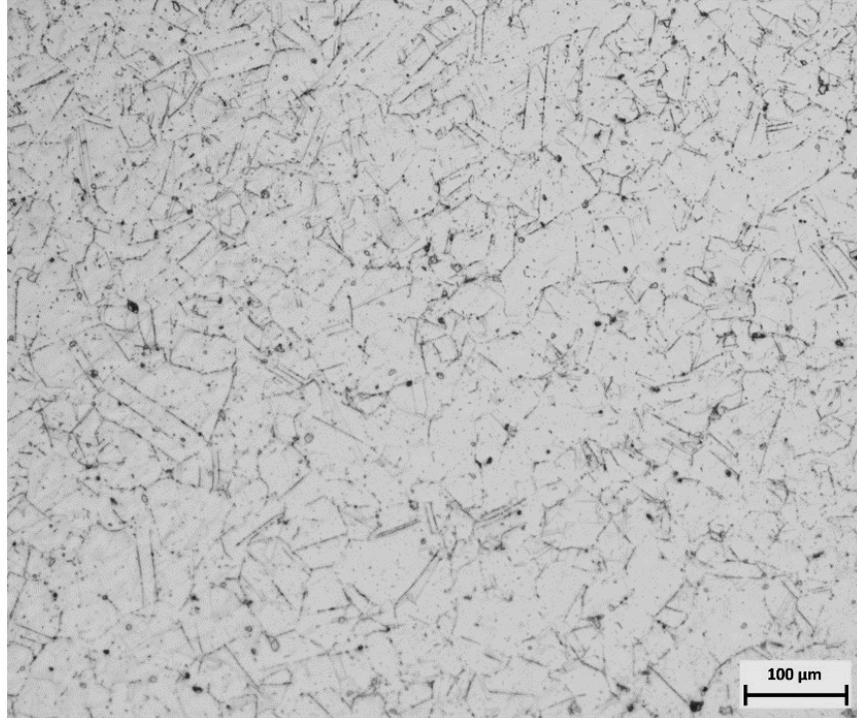
*Tabla 8. Composición Química de las superaleaciones evaluadas*

<b>Composición</b>		
<b>Inconel 600</b>	Níquel	72.72%
	Cromo	16.18%
	Hierro	9.10%
	Cobre	0.53%
	Manganeso	0.30%
	Silicio	0.22%
<b>Inconel 690</b>	Níquel	61.43%
	Cromo	28.45%
	Hierro	8.23%
	Silicio	0.47%
	Cobre	0.44%
	Manganeso	0.28
<b>Inconel 718</b>	Níquel	50.16%
	Hierro	18.65%
	Cromo	18.55%
	Niobio	4.978%
	Molibdeno	2.844%
	Azufre	1.43%
	Titanio	1.03%
	Aluminio	0.80%
	Cobre	0.54%
	Cobalto	0.46%
	Silicio	0.25%
	Manganeso	0.20%

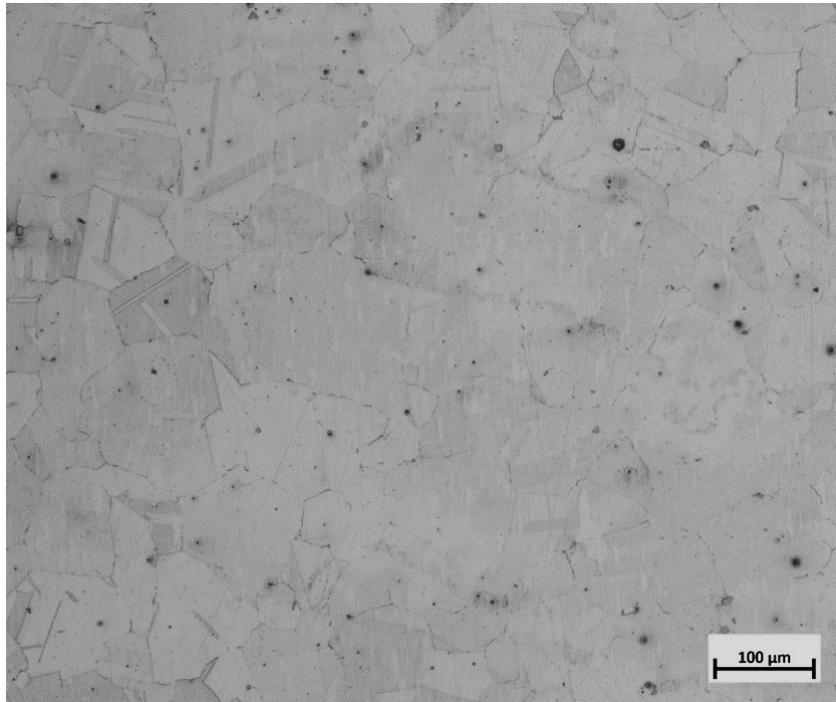
---

## 4.2 Caracterización microestructural

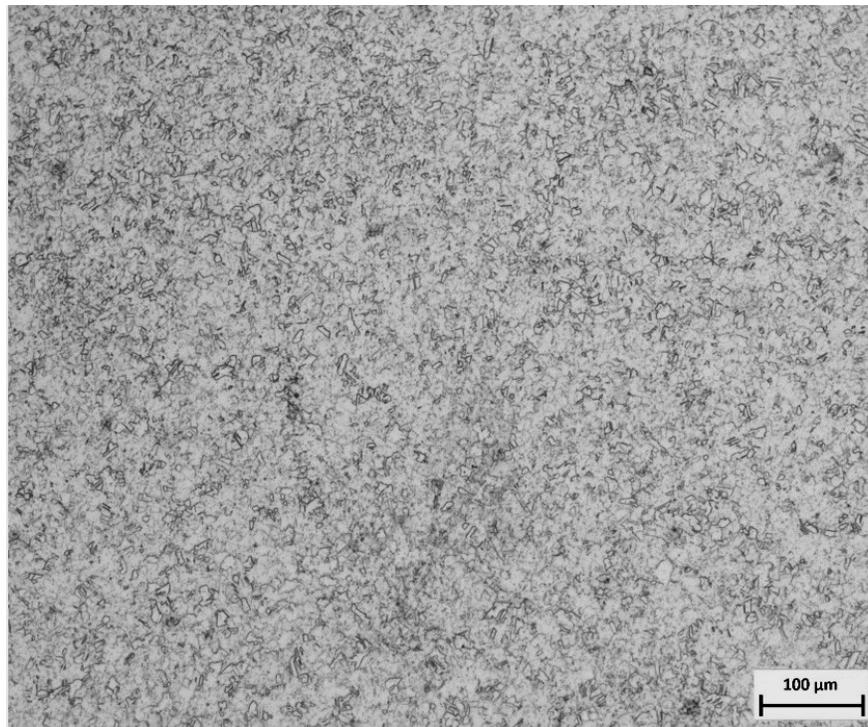
En la figura 23,24,25 se observan las microestructuras de las superaleaciones 600, 690 y 718 respectivamente en donde se observa diferencia principalmente en los tamaños de grano. En las superaleaciones 600 y 690 hay presencia de maclas con una microestructura austenítica, mientras que en la superaleación 718 presenta granos equiaxiales de tamaño pequeño, en las 3 microestructuras se alcanzan a apreciar algunos precipitados.



*Figura 21. Microestructura, Superaleación 600 a 100X.*



*Figura 22. Microestructura, Superalación 690 A 100x.*



*Figura 23. Microestructura, Superalación 718 A 100x.*

### 4.3 Curvas de Polarización Cíclica

Se presentan los resultados obtenidos por CPC, entre los parámetros obtenidos donde se analizaron los potenciales de corrosión ( $E_{corr}$ ), densidades de corriente ( $I_{corr}$ ) e histéresis. Para identificación de las muestras se nombraron mediante el siguiente código; SUPERALEACION – ELECTROLITO- TEMPERATURA, por ejemplo, la muestra 600-NaCl-25, es la superaleación 600 expuesta en cloruro de sodio a temperatura de 25°.

Los graficas obtenidas mediante CPC, se presentan en 4 grupos divididos en electrolito y temperatura, para su fácil comparación bajo las mismas variables, por lo tanto, se cuenta con:

- Grupo 1: electrolito  $H_2SO_4$  a 25° de temperatura.
- Grupo 2: electrolito  $H_2SO_4$  a 60° de temperatura.
- Grupo 3: electrolito NaCl a 25° de temperatura.
- Grupo 4: electrolito NaCl a 60° de temperatura.

Por otro lado, se presentan tablas con los valores electroquímicos obtenidos mediante la extrapolación Tafel, estas tablas se dividen solamente por electrolitos.

La resistencia del material a la corrosión localizada se evalúa en base a la medición de potencial de repasivacion  $E_{rep}$  y el potencial de corrosión  $E_{corr}$ . Si  $E_{rep}$  se encuentra en los valores más nobles que el  $E_{corr}$ , la propagación de las picaduras activas se ve disminuida o detenida. Al mismo tiempo el tamaño del ciclo de histéresis nos da información sobre la resistencia, a mayor tamaño del bucle de histéresis significa una mayor interrupción de la película pasiva, seguida de una mayor dificultad para restaurar la película pasiva dañada, a mayor tamaño más grave el ataque localizado [49].

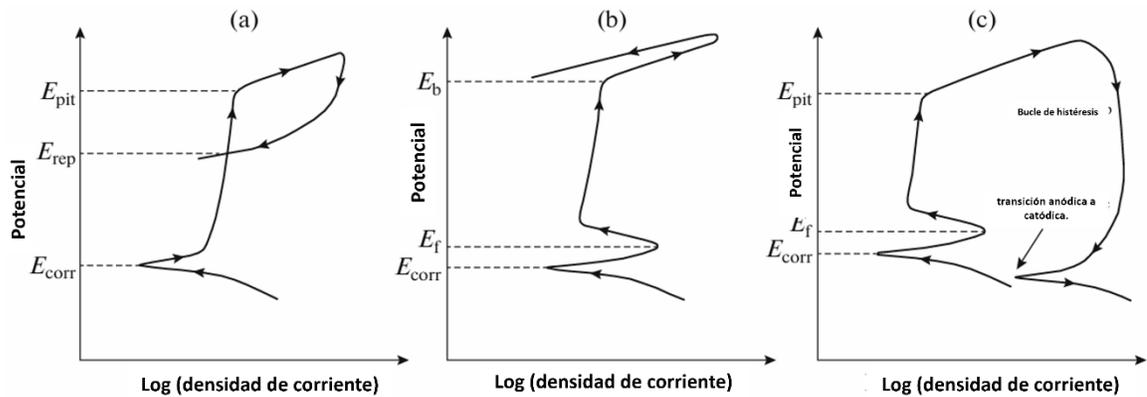


Figura 24. Ilustración esquemática de pruebas CPC para tres condiciones diferentes: (a) exhibiendo potencial de protección, (b) con evolución de oxígeno, (c) sin potencial de protección. [49].

En la norma ASTM G82 [62], nos indica que podemos determinar si una superaleación es susceptible a sufrir o frenar la corrosión mediante su potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), usando el principio básico de una serie galvánica: entre más noble (electropositivo) sea el material tendrá tendencia a sufrir una corrosión reducida, mientras si es más activo (electronegativo) será más susceptible a sufrir una corrosión.

De acuerdo con la norma ASTM G102 [63], La densidad de corriente está directamente proporcional a la velocidad de corrosión que un metal puede sufrir, esto quiere decir que mientras más densidad de corriente consume un metal, mayor velocidad de corrosión obtendrá respecto a los demás.

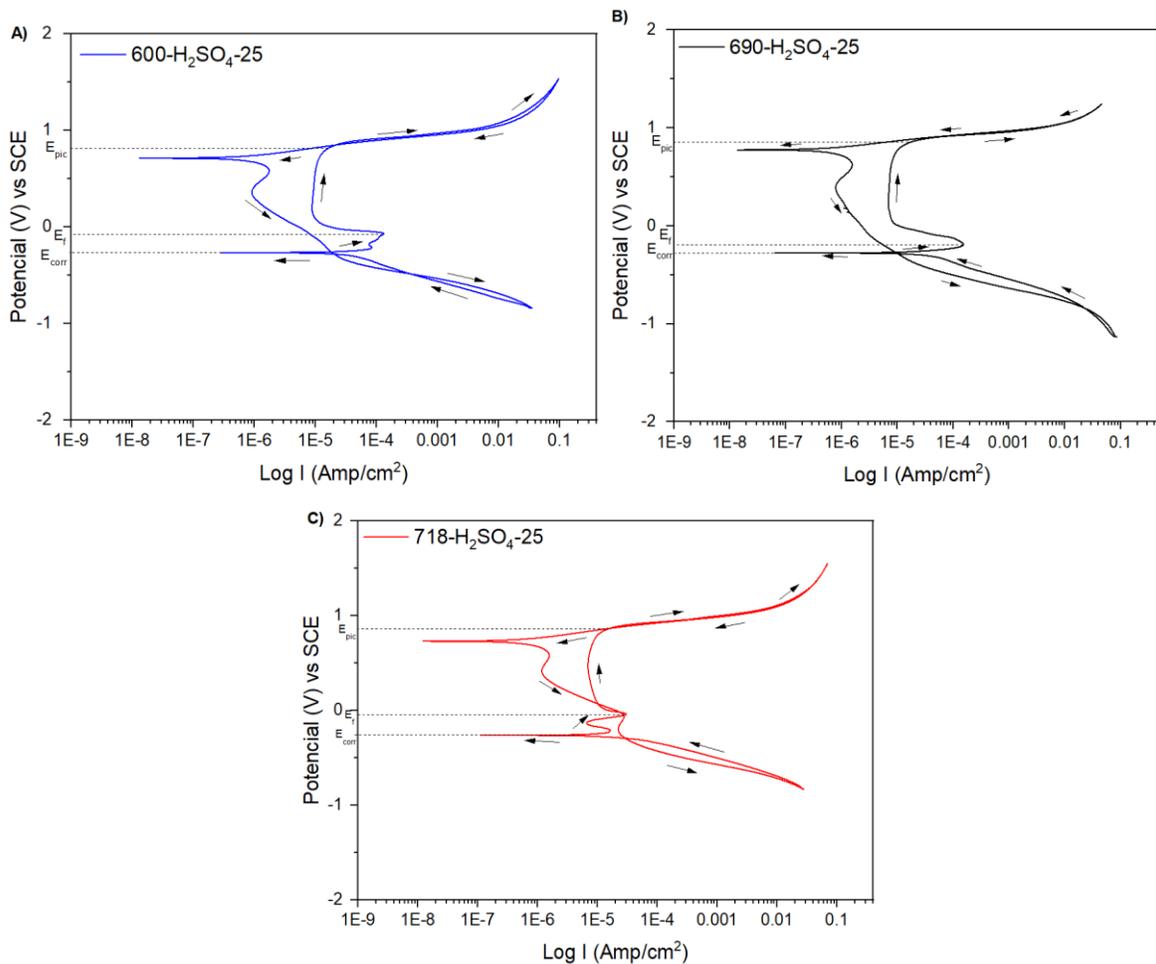


Figura 25. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en  $H_2SO_4$  a  $25^\circ$ .

En la figura 27 y 28 (600-A, 690-B, y 718-C) se puede observar los resultados de CPC donde se muestra las superaleaciones 600, 690 y 718 en  $H_2SO_4$  a  $25^\circ$  y  $60^\circ$  respectivamente, las tres superaleaciones se comportan de una manera similar, se observa una curva catódica de activación, hasta llegar al potencial de corrosión, después de pasar por una región de corrosión activa, la densidad de corriente disminuye a un potencial crítico, llamado potencial de Flade ( $E_f$ ), esta disminución se debe a la formación de la capa pasiva sobre la superficie del metal (zona siguiente casi vertical) lo cual indica resistencia a la iniciación y propagación de la corrosión, esta capa pasiva se rompe al llegar al potencial de picadura de donde inicia un proceso de activación, al término del medio ciclo, se puede observar que en las 6 muestras se desarrolla una pequeña histéresis positiva, que se puede atribuir a una corrosión localizada.

Termodinámicamente, bajo estas condiciones es la superaleación 718 a una temperatura de 60° C, la que presenta un  $E_{corr}$  más noble con un valor de -0.26211 V, mostrando la menor tendencia a corroerse [62,64], al mismo tiempo desde la cinética corrosión, fue la misma superaleación 718 que presento un valor mucho menor de  $6.06 \times 10^{-6}$  Amp/cm<sup>2</sup>, con diferencia de un orden de magnitud en comparación a las demás, indicando una corrosión más lenta que las demás [49].

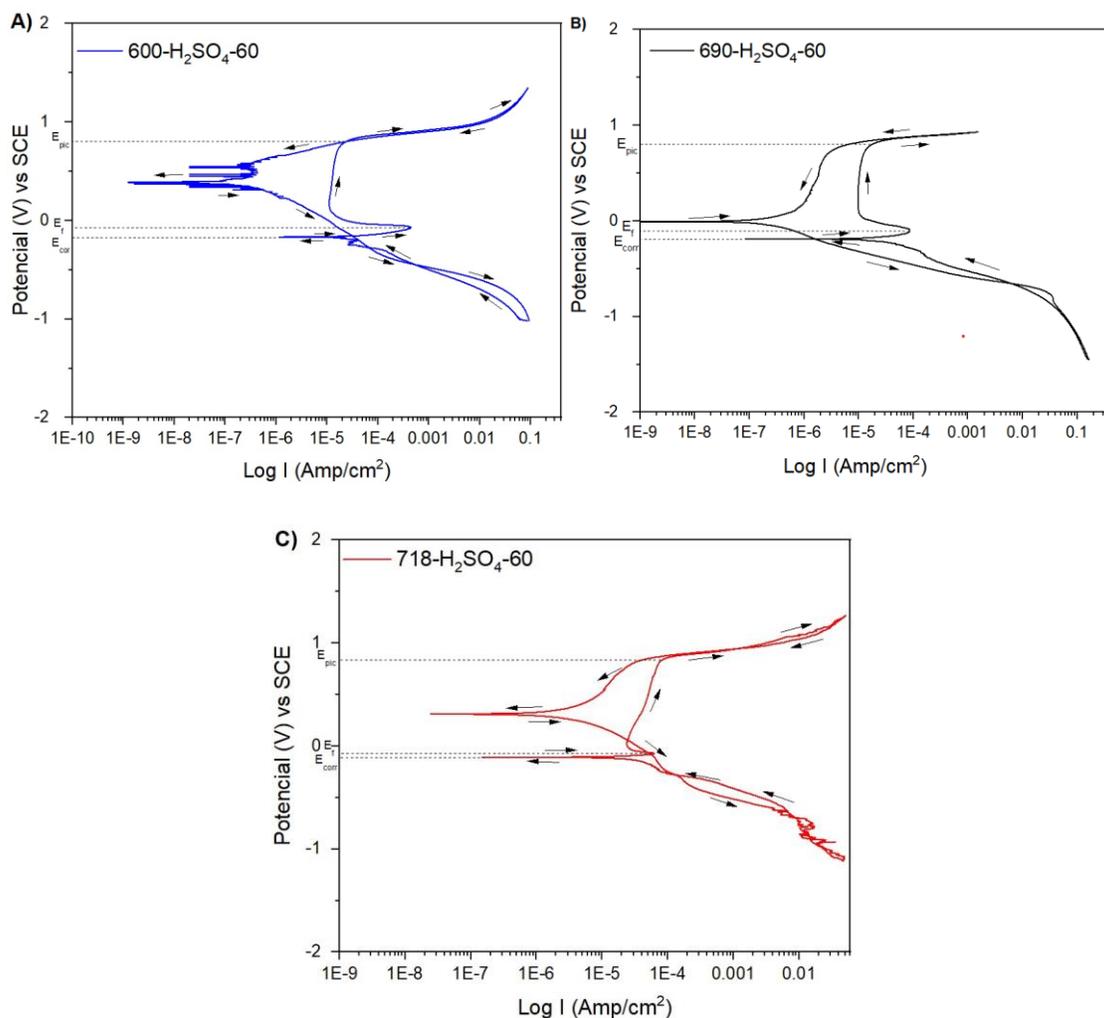


Figura 26. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 60°.

En ambas figuras se observa que en el escaneo inverso la curva siempre permanece por encima del escaneo inicial, por lo tanto, no se forma (o es diminuto) un bucle de histéresis. Demostrando que las superaleaciones 600, 690 y 718 en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 25° y 60° C son excelente

para reformar la película pasiva de óxido y, por lo tanto, es muy buena frenando el proceso de corrosión.

De la misma manera que los resultados a 25 grados, es la superaleación 718 que presenta potencial de corrosión más positivo de  $-0.10919$  V, indicando mayor resistencia a la corrosión, desde el punto de vista de la cinética, aunque las tres están en el orden de magnitud  $10^{-5}$  Amp/cm<sup>2</sup> presenta una pequeña diferencia de las demás muestras [49,62.64].

El comportamiento electroquímico de las superaleaciones en ambiente de cloruro de sodio a 25° y 60° C se presenta en las figuras 29 y 30 respectivamente

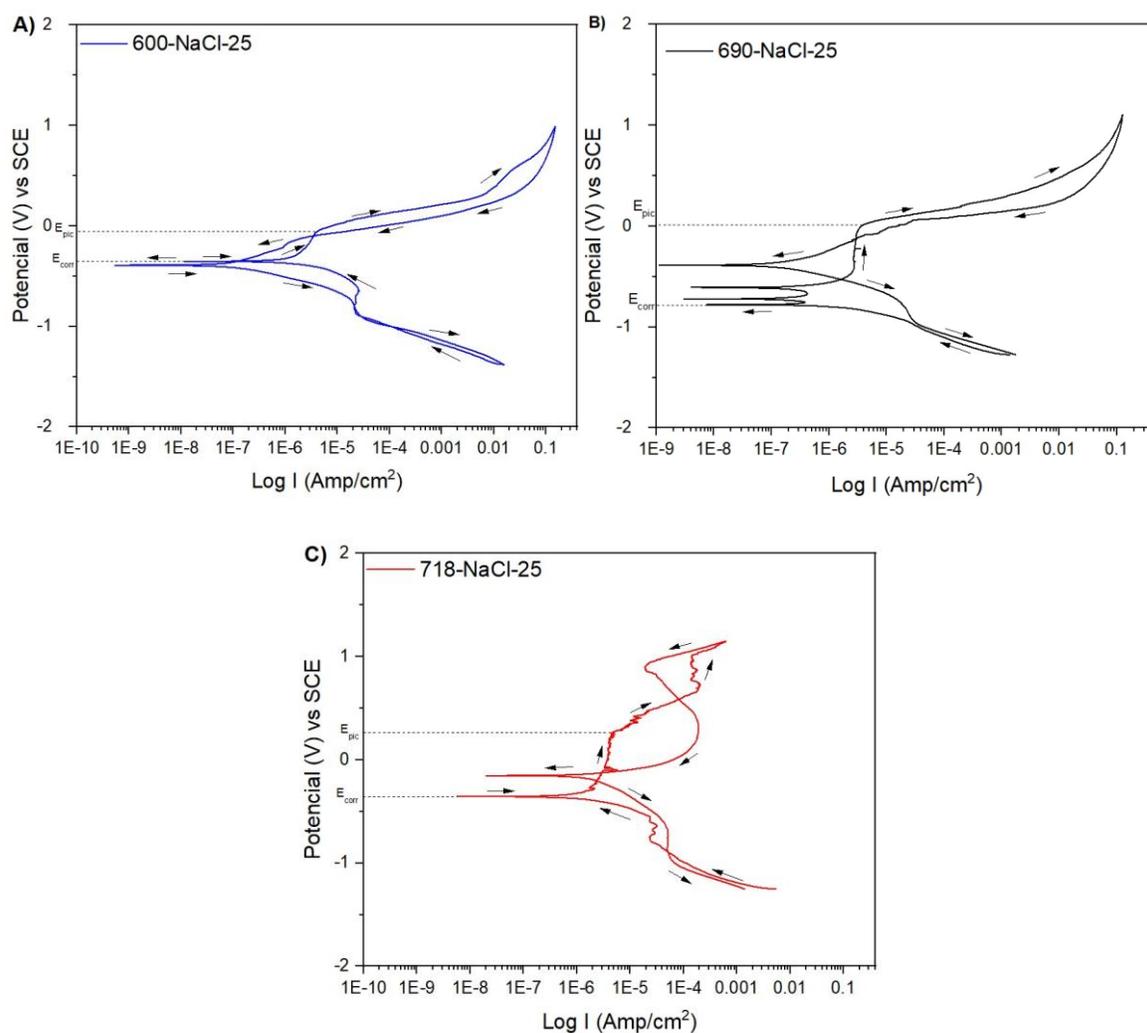


Figura 27. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en NaCl a 25°.

En la figura 29 se observan que las superaleaciones 600(Fig.29A) y 690 (Fig.29B), después del potencial de corrosión tiene una pasivación más pequeña (en comparación a las expuestas en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), hasta llegar al potencial de picadura donde hay un aumento en la densidad de corriente, al finalizar el medio ciclo ambas presentan una histéresis positiva con un ciclo de mayor tamaño en comparación a las muestras expuestas a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, denotando alta tendencia al daño localizado.

Así mismo, la aleación 718 (Fig.29C) después de llegar al E<sub>corr</sub>, existe un proceso de pasivación, seguido de una pequeña activación, para seguir con un segundo proceso de pasivación, al finalizar a diferencia de los otros dos materiales presenta una histéresis negativa como resultado de una corrosión uniforme.

A diferencia que en las expuestas en ácido sulfúrico, es la superaleación 600 en cloruro de sodio a 25°, la que presenta (por muy poco) un potencial de Corrosion más positivo de -0.35296 V, presentando menor tendencia a corroerse, en cambio es la super aleación 718 la que presenta una cinética de corrosión menor de  $4.16 \times 10^{-07}$  Amp/cm<sup>2</sup> (con diferencia de un orden de magnitud) indicando que, aunque no es la que tiene menor tendencia a corroerse, es la aleación que lo hace a una velocidad más lento en comparación a las demás. [49,62.64].

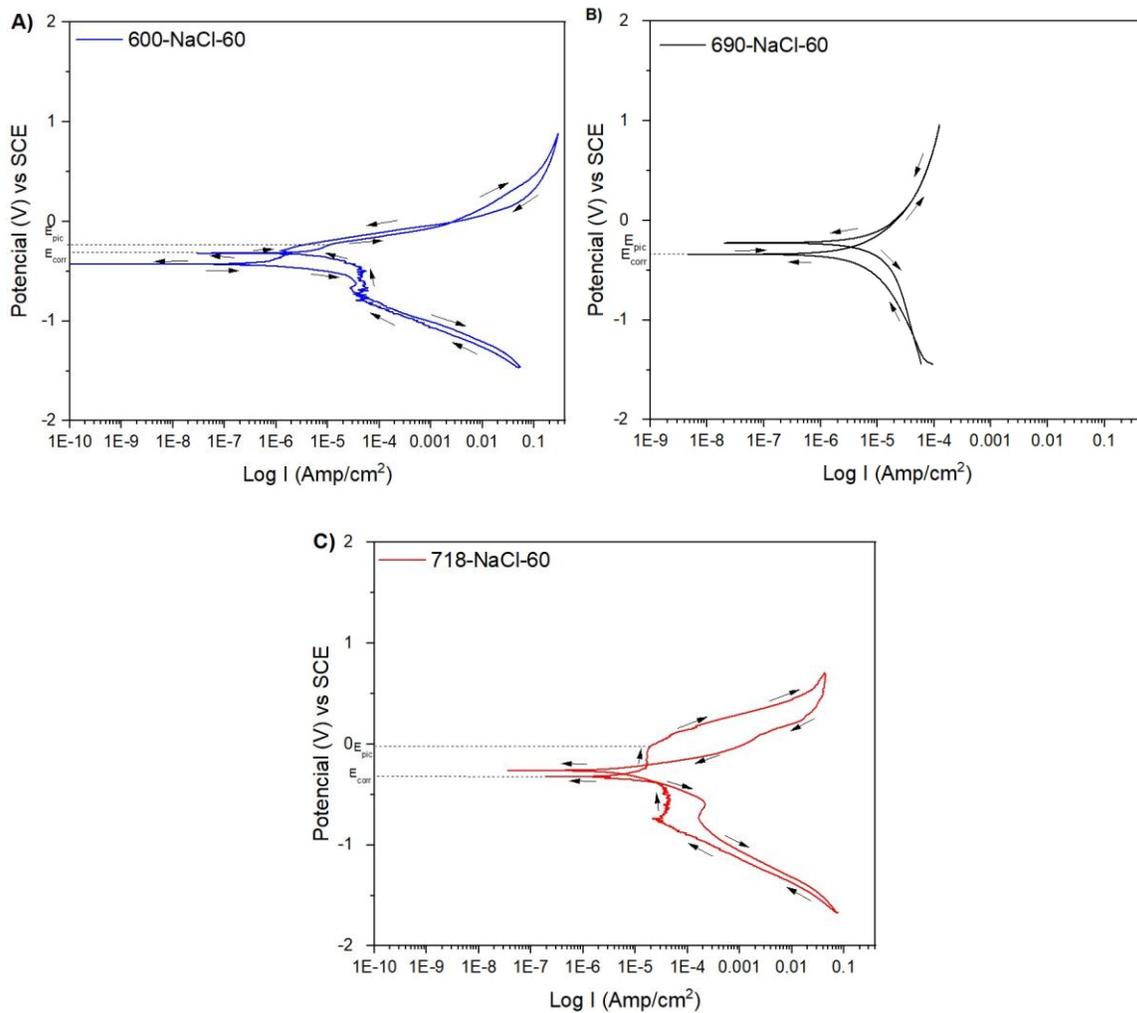


Figura 28. Curvas de polarización cíclica de las superaleaciones Inconel 600(A) 690(B) Y 718(C) en NaCl a 60°.

En la figura 30 se observa que las superaleaciones en presencia de NaCl a 60°, de las cuales es la superaleación 690 la que presenta una forma peculiar, donde el barrido inicial concuerda en la posición del barrido final, indicando corrosión general.

En las superaleaciones 690 y 718 se observa que después de llegar a Epic, presentan una zona activa con gran demanda de corriente siendo la 600 (Fig.30A) la que más demanda presenta, bajo estas condiciones la superaleación 718 (Fig.30C) tiene una pequeña zona de pasivación, sin embargo, es la que presenta un ciclo de mayor tamaño en su histéresis positiva, indicando una alta tendencia al daño localizado en comparación a la superaleación 600.

A 60 grados dan unos resultados muy distintos y que no tienen similitud a los obtenidos a 25 grados como en el caso de los expuestos en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, con un potencial de corrosión de más noble de -0.31818 V es la aleación 600, seguida por la 718 y 690, pero presenta un I<sub>corr</sub> de 6.1611x10<sup>-06</sup> Amp/cm<sup>2</sup>, esto quiere decir que, aunque es la menos propensa a presentar corrosión lo haría de manera más rápida a diferencia de los demás, una vez iniciada.

La diferencia entre el área superficial del ciclo de histéresis para las superaleaciones en presencia de NaCl (siendo esta mayor) en comparación a las expuestas en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, significa que, las superaleaciones expuestas a electrolitos de NaCl sufrieron una severa corrosión por picaduras en comparación a las expuestas en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Esta diferencia entre los bucles de histéresis de las superaleaciones en los diferentes electrolitos se debe a los iones agresivos de cloruro como lo explica S. Esmailzadeh et al 2017. Los cuales tienen un efecto agresivo en la durabilidad de la capa pasiva en la superficie del material, esto se puede observar comparando las figuras 27 y 28 con la 29 y 30.

Del mismo modo hay una diferencia entre la cinética de corrosión, donde se ve claramente que las aleaciones expuestas en ácido sulfúrico tienen una mayor velocidad de corrosión en comparación a las expuestas en cloruro de sodio por diferencia de uno hasta dos órdenes de magnitud.

Tabla 9. Parámetros electroquímicos de la técnica de CPC de las superaleaciones Inconel 600, 690 y 718 en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 25 y 60°C (L=Localizada G= Generalizada).

Superaleación	Electrolito/ Temperatura (°C)	E <sub>corr</sub> (V)	E <sub>rep</sub> (V)	I <sub>corr</sub> (Amp/cm <sup>2</sup> )	Histéresis	Tipo de corrosión
600	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -25	-0.26609	0.8487	3.0129E-05	Positiva	L
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -60	-0.16628	0.8026	1.8096E-05	Positiva	L
690	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -25	-0.27634	1.0260	3.4986E-05	Positiva	L
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -60	-0.18240	0.9160	3.31E-05	Positiva	L
718	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -25	-0.26211	0.8639	6.06E-06	Positiva	L
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -60	-0.10919	0.9532	1.67E-05	Positiva	L

Tabla 10. Parámetros electroquímicos de la técnica de CPC de las superaleaciones Inconel 600, 690 y 718 en NaCl a 25 y 60°C (L=Localizada G= Generalizada).

Superaleación	Electrolito/ Temperatura (°C)	E <sub>corr</sub> (V)	E <sub>rep</sub> (V)	I <sub>corr</sub> (Amp/cm <sup>2</sup> )	Histéresis	Tipo de corrosión
600	NaCl-25	-0.35296	-0.0969	1.4391E-06	Positiva	L
	NaCl-60	-0.31818	-0.0110	6.1611E-06	Positiva	L
690	NaCl-25	-0.77575	-0.1257	2.9320E-06	Positiva	L
	NaCl-60	-0.33940	---	4.5788E-06	---	L
718	NaCl-25	-0.35406	---	4.16E-07	Negativa	G
	NaCl-60	-0.32112	-0.2073	5.85E-06	Positiva	L

En las tablas 9 y 10 se presentan los parámetros electroquímicos de las tres aleaciones en las diferentes variables trabajadas, de las cuales algunos ya fueron explicadas anteriormente mediante las gráficas obtenidas, en las cuales se puede observar y concluir que la superaleación 718 a 25 grados expuesta en cloruro de sodio es la que presenta una menor cinética de corrosión de todas las muestras analizadas, pero es la muestra 718- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-60 el que presenta un potencial de corrosión más noble, demostrando menor tendencia a presentar corrosión.

La gran resistencia presentada por la superaleación 718 en comparación a la 600 y 690, se le atribuye a la diferencia en su composición química de las tres superaleaciones, presentados anteriormente en las tablas 9 y 10, siendo la superaleación 718 que cuenta con mayor cantidad de cromo, (en comparación a la 600) y presenta molibdeno y titanio (que las otras dos no cuentan) aportando gran resistencia a la corrosión como lo cita Mouritz 2012.[65]

## 4.4 Ruido electroquímico

### 4.4.1 Análisis visual de las series de tiempo.

El análisis visual de las series de tiempo permite la identificación de las particularidades de diversos tipos de corrosión. Esto implica asociar los momentos transitorios ya sea con la corrosión generalizada o con eventos de ruptura o reactivación, al mismo tiempo que se identifican fluctuaciones vinculadas a la formación de hendiduras o picaduras.

Al igual que en apartado de CPC, los resultados obtenidos mediante RE se presentan en 4 grupos divididos en electrolito y temperatura, ya su vez presentado en potencial y corriente, para su comparación bajo las mismas variables, por lo tanto, se cuenta con:

- Grupo 1: electrolito  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $25^\circ$  de temperatura.
- Grupo 2: electrolito  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a  $60^\circ$  de temperatura.
- Grupo 3: electrolito  $\text{NaCl}$  a  $25^\circ$  de temperatura.
- Grupo 4: electrolito  $\text{NaCl}$  a  $60^\circ$  de temperatura.

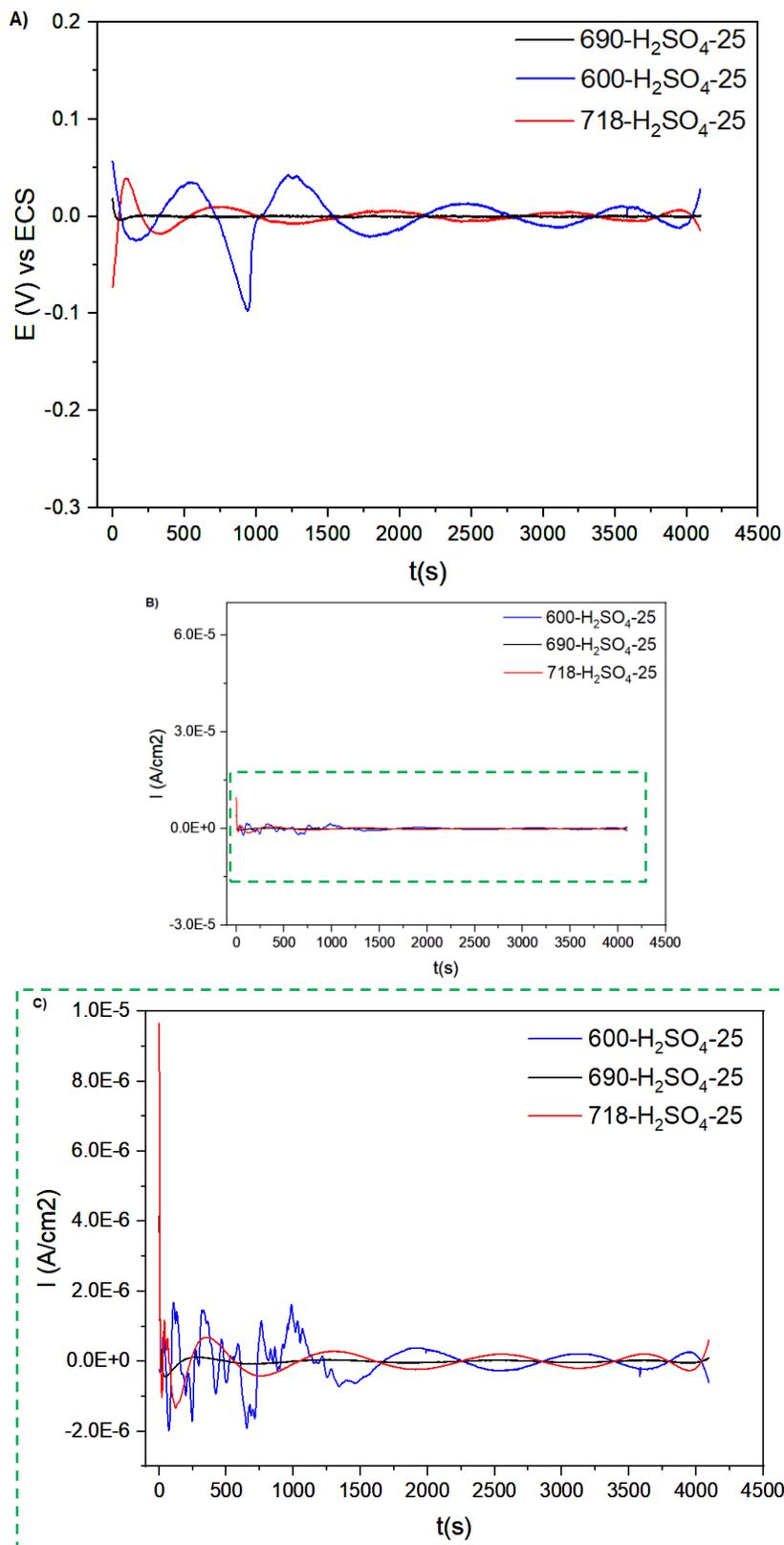


Figura 29. Series de tiempo de RE de las superaleaciones en  $H_2SO_4$  a 25 grados. Ruido en potencial (A) y ruido en corriente (B-C).

En la figura 31 se presentan la serie de tiempo de ruido electroquímico en potencial y corriente de las 3 superaleaciones en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 25 grados, en la figura 31A, se muestra la serie en tiempo en potencial donde se observan que las superaleaciones 690 y 718 presentan un comportamiento similar teniendo unas oscilaciones con un amplia frecuencia y baja amplitud de potencial, lo cual indica que la superficie del material se encuentra en condiciones pasivas, con la única diferencia de la superaleación 600, donde aproximadamente entre los 700 y 1200 s, presenta una fluctuación de potencial de amplia frecuencia y amplitud hacia potenciales menos nobles, este comportamiento indican que hay una nucleación en áreas localizadas, y a partir de los 1200 s continua con un comportamiento estable similar a las otras dos muestras.

La figura 31 B y C presentan la respuesta de RE en corriente de las tres superaleaciones, se observa que tienen una demanda de corriente muy bajas, en el orden de  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  Amp/cm<sup>2</sup>, la superaleación 718 presenta transitorios (secuencia de valores característicos por un aumento seguido por una disminución) iniciales oscilando valores muy cercanos a  $10^{-5}$  Amp/cm<sup>2</sup>, y la superaleación 600 presenta transitorios con valores de  $10^{-6}$  Amp/cm<sup>2</sup>, estos transitorios nos indica que hubo algún tipo de disolución del material lo que provoca que este tenga algún tipo de corrosión localizada [66,67,68], a partir del segundo 1500 la superaleación presentan un comportamiento de oscilaciones similar, por su parte la muestra 690 no presenta fluctuaciones, indicando un proceso de pasivación, significando pocos productos de corrosión.

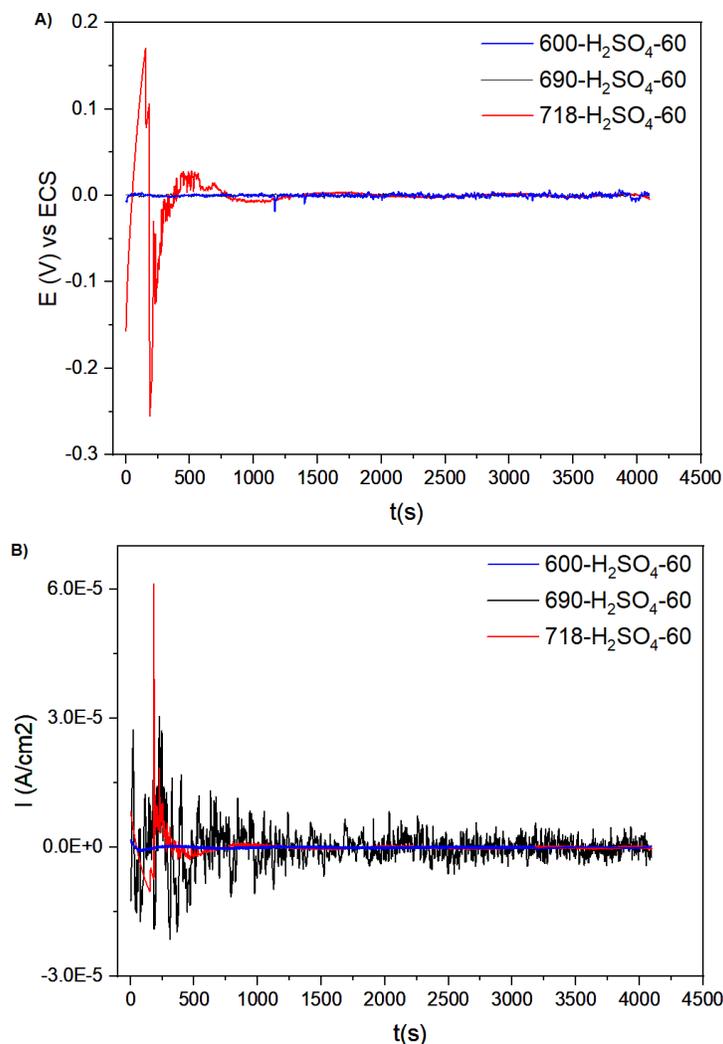


Figura 30. Series de tiempo de RE de las superaleaciones en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 60 grados. Ruido en potencial (A) y ruido en corriente (B)

En la figura 32 se observan los resultados de la serie de tiempo en potencial y corriente de las superaleaciones expuestas en ácido sulfúrico a 60 grados, en la figura 32A (ruido en potencial) se observa como la probeta con superaleación 718 presenta fluctuaciones iniciales tanto catódico como anódicos de alta amplitud y baja frecuencia, para después estabilizarse y presentar fluctuaciones de gran frecuencia y muy baja amplitud, al igual que el resto de las muestras, por otra parte, la superaleación 600 se observan dos transitorios entre los 1000 y 1500 segundos que sobresalen por su amplitud mayor, en comparación a sus restos los cuales muestran transitorios de baja amplitud y frecuencia, mismo comportamiento que mantiene la superaleación 690 durante todo la prueba.

En la respuesta de ruido electrónico en corriente, fig. 32B, la superaleación 690 presenta una gran cantidad de transitorios caóticos tanto catódicos como anódicos de vida corta, indicando que hay rupturas de la película pasiva en áreas localizadas y por lo tanto mayor material disuelto [44,67,68], en comparación a la 718 que solo presenta un solo transitorio y se comporta de manera estable al igual que la superaleación 600, característico de un comportamiento más estable. Esta información se puede complementar con los datos de la tabla 11 donde se obtiene que la superaleación 690 presenta un  $i_{corr}$  más grande por lo tanto tiende a corroerse más rápido en comparación a las otras superaleaciones.

Las pruebas realizadas en NaCl a 25 grados se puede observar en la figura 33 , en la respuesta de RE en corriente (Fig. 33 B-C), se observa una demanda de corriente demasiado pequeña en valores de  $10^{-6}$  Amp/cm<sup>2</sup>, la muestra 690 presenta un comportamiento estable durante toda la prueba, oscilaciones de muy baja amplitud, la muestra 718 antes de los 500 puntos, presento pequeños transitorios de poca vida y fue el de valor de  $6 \times 10^{-6}$  Amp/cm<sup>2</sup> el de mayor amplitud, asociados a nucleación de picaduras en un lugar localizado, a partir de ahí presento el mismo comportamiento estable al igual que la superaleación 690, a diferencia de la muestra 600 donde se muestra oscilaciones y pequeños transitorios caóticos en comparación a las otras dos muestras.

En estos resultados se puede observar con mayor claridad que los transitorios que se presentan en la RE de corriente, corresponden a los presenten en RE en potencial [66], lo cual se entiende que hubo una baja presencia de corrosión localizada pero las nucleaciones no continuaron, y se siguió con un comportamiento pasivante.

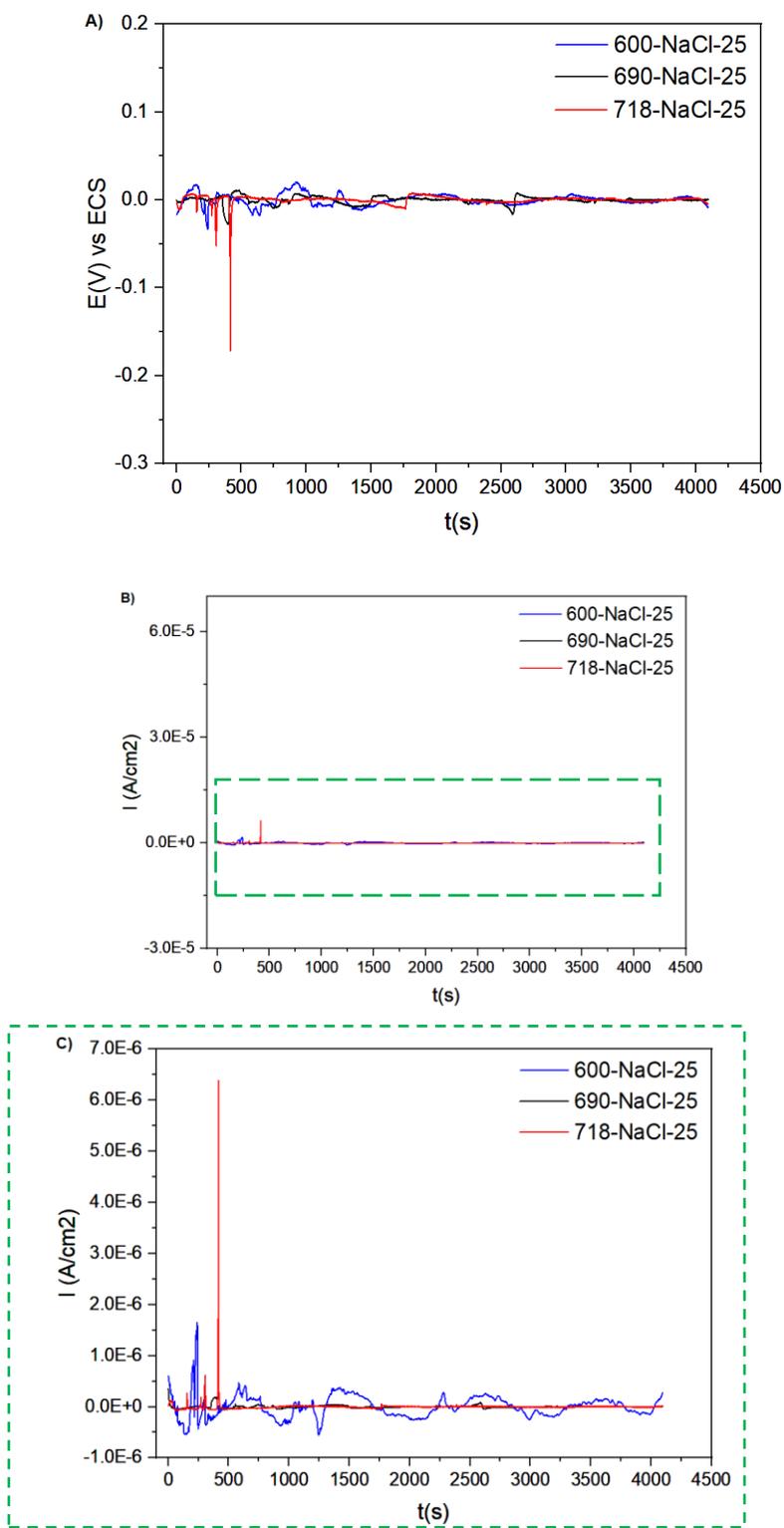
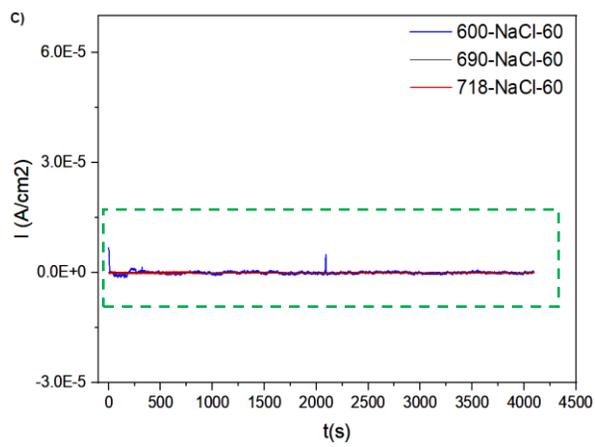
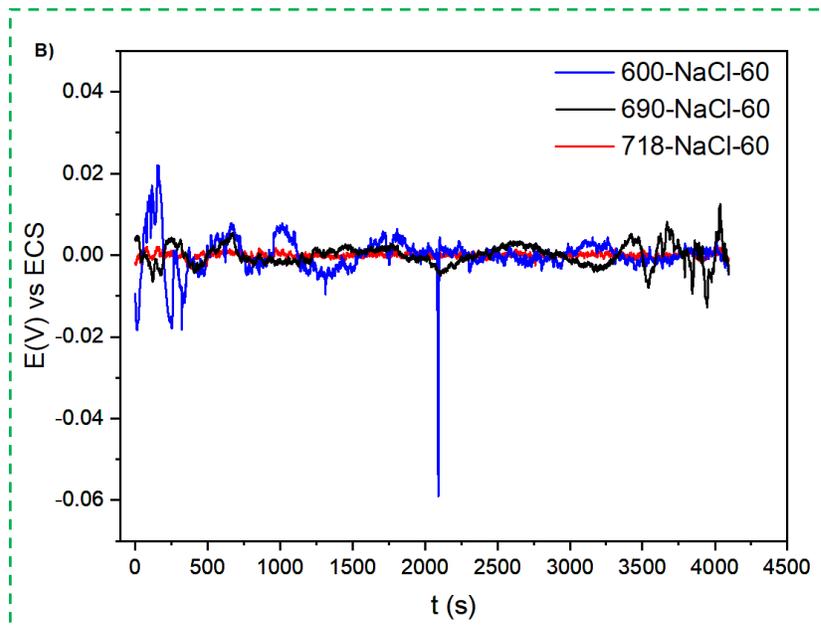
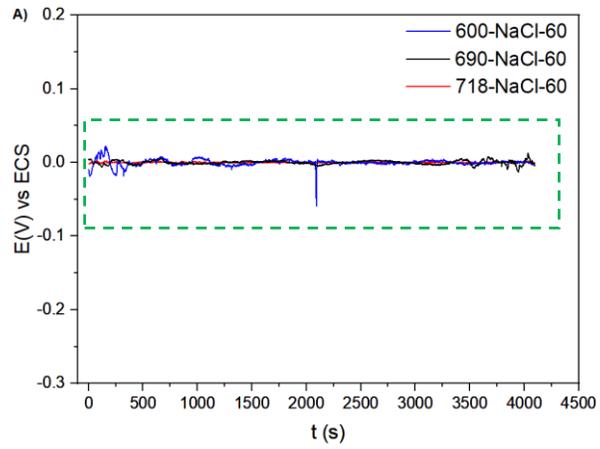


Figura 31. Series de tiempo de RE de las superaleaciones en NaCl a 25 grados. Ruido en potencial (A) y ruido en corriente (B-C).



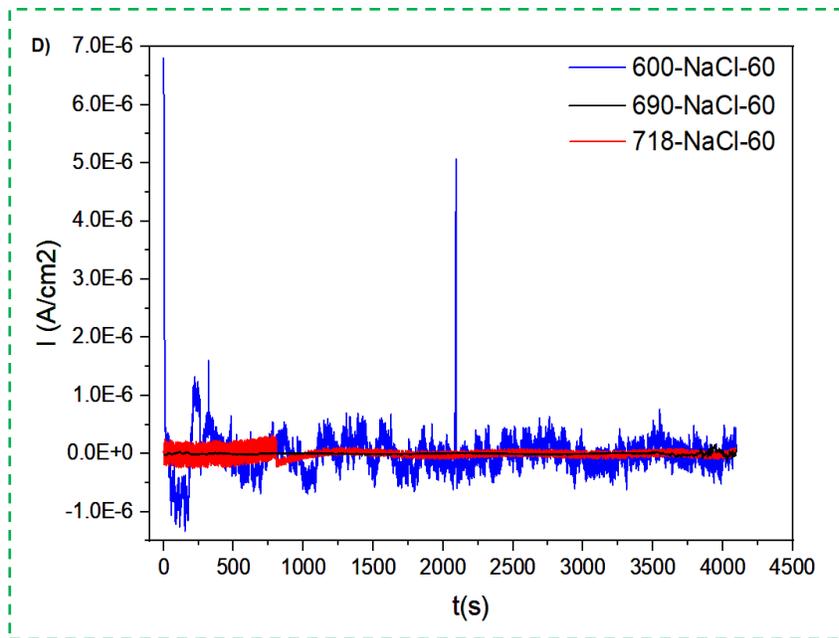


Figura 32 Series de tiempo de RE de las superaleaciones en NaCl a 60 grados. Ruido en potencial (A-B) y ruido en corriente (C-D).

En la figura 34 se muestra el comportamiento de las superaleaciones en cloruro de sodio a  $60^{\circ} C$ , donde en la figura 34 A y B se observa la serie de tiempo de Ruido electroquímico en potencial y se observa una baja demanda de potencial, en la figura 34B, se observa más claro que la superaleación 600 es la que presenta oscilaciones de mayor amplitud en comparación a las demás, y también se observa un transitorio anódico sobresaliente por su mayor amplitud en comparación a los demás, aproximadamente en el punto 2100, de poca duración de vida. En cambio, las muestras 690 y 718, tuvieron un comportamiento similar con pequeños transitorios de baja amplitud y frecuencia durante toda la prueba.

En la figura 34 C y D se observan los resultados de la serie en corriente, donde las muestras presentan un comportamiento de transitorios caóticos (en comparación a las demás muestras) tanto anódicos como catódicos, lo que representa rupturas de las capas pasivas y disolución de material en áreas localizadas, siendo la muestra 600 la que presenta las oscilaciones más grandes en comparación a las demás, con una demanda de corriente de  $10^{-6}$   $Amp/cm^2$ , en comparación a las otras dos donde sus amplitudes son de  $10^{-7}$   $Amp/cm^2$  y  $10^{-7}$   $Amp/cm^2$ .

<sup>8</sup> Amp/cm<sup>2</sup>, con un comportamiento muy estable, solo sobresalen dos transitorio anódico, uno al inicio y el segundo aproximado en los 2100 segundos, los mismos que se observa en la respuesta en potencial, lo que significa que por un momento se rompió la pasividad natural del material pero se repasivó rápidamente [66,67].

#### 4.4.2 Análisis estadístico en la serie de tiempo

En las tablas 11 y 12 presentan los resultados de los parámetros electroquímicos en el dominio de tiempo obtenidos de las tres superaleaciones, dichos parámetros son: densidad de corriente (I<sub>corr</sub>), raíz cuadrática media(I<sub>rms</sub>), desviación estándar en corriente( $\sigma_i$ ), resistencia al ruido(R<sub>n</sub>), índice de localización(IL), Sesgo, Kurtosis, y tipo de corrosion(M=Mixta, L=localizada, U=Uniforme).

Al observar los índices de localización, junto con el sesgo y Kurtosis, se cuenta que en la mayoría de las muestras presentan un proceso de corrosion localizado, pero también se observan muestras donde el índice de localización es MIXTA y el sesgo y Kurtosis es LOCALIZADO, en estos casos se toma en cuenta el resultado obtenido por sesgo y kurtosis, como se mencionó en capítulo anterior el IL tiene limitaciones y se puede corroborar con estos momentos estadísticos [48].

Tabla 11. Resultados de parámetro del ruido electroquímico cuando se realiza el análisis estadístico de las superaleaciones en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-

M	I <sub>corr</sub> A/cm <sup>2</sup>	I <sub>rms</sub> mA/cm <sup>2</sup>	$\sigma_i$ mA/cm <sup>2</sup>	R <sub>n</sub> KOhms	I.L.	T.C.	sesgo	T.C.	Kurtosis	T.C.
718-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -25	1.10E-06	2.90E-06	4.00E-07	24200.67	0.12	L	5.77	L	40.70	L
718- H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -60	1.90E-06	5.80E-06	2.20E-06	13639.11	0.37	L	3.70	L	32.35	L
600- H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -25	6.00E-07	6.90E-06	5.00E-07	42940.97	0.07	M	0.80	U	1.89	U
600- H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -60	3.00E-06	2.20E-06	2.00E-07	8735.219	0.09	M	4.02	L	22.66	L
690-H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -25	3.90E-06	5.00E-07	1.00E-07	6750.48	0.27	L	6.95	L	87.42	L
690- H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> -60	1.26E-04	7.88E-05	4.60E-06	206.339	0.05	M	1.64	L	4.51	L

En la tabla 11 se presentan los parámetros electroquímicos en el dominio del tiempo obtenidos por RE, de las muestras expuestas en ácido sulfúrico, donde se pueden destacar

principalmente dos cosas, la primera es que, la superaleación 600 a 25 grados es la única que presenta corrosión uniforme (determinado por el sesgo y kurtosis) y es, según su parámetro de  $I_{corr}$ , la muestra con menor cinética de corrosión, la segunda cosa que se puede destacar, es que, la superaleación 690 a 60 grados es la que presenta la más alta densidad de corriente; con una magnitud de  $10^{-4}$  Amp/cm<sup>2</sup>, lo cual representa que tiende a tener la velocidad de corrosión más alta en comparación a los demás.

*Tabla 12. Resultados de parámetro del ruido electroquímico cuando se realiza el análisis estadístico de las superaleaciones en NaCl.*

<b>M</b>	<b>I<sub>corr</sub> A/cm<sup>2</sup></b>	<b>I<sub>rms</sub> mA/cm<sup>2</sup></b>	<b>σ<sub>i</sub> mA/cm<sup>2</sup></b>	<b>R<sub>n</sub> KOhms</b>	<b>I.L.</b>	<b>T.C.</b>	<b>sesgo</b>	<b>T.C.</b>	<b>Kurtosis</b>	<b>T.C.</b>
<b>718-NaCl-25</b>	5.00E-07	2.00E-07	1.00E-07	47846.90	0.54	L	26.07	L	1139.86	L
<b>718-NaCl-60</b>	3.30E-06	4.00E-07	1.00E-07	7886.45	0.20	L	2.51	L	9.10	L
<b>600-NaCl-25</b>	9.00E-07	2.80E-06	2.00E-07	29464.42	0.07	M	-0.44	U	1.78	U
<b>600-NaCl-60</b>	2.20E-06	6.70E-06	4.00E-07	11736.51	0.05	M	1.05	L	11.34	L
<b>690-NaCl-25</b>	2.00E-07	3.00E-07	0.00E+00	154538.07	0.10	L	2.50	L	24.58	L
<b>690-NaCl-60</b>	2.00E-07	1.00E-07	0.00E+00	156834.68	0.13	L	3.13	L	12.33	L

En la tabla 12 se muestran los resultados de los parámetros electroquímicos de las superaleaciones expuestas en cloruro de sodio, donde al igual que las muestras anteriores, la superaleación 600 a 25°, es la única que presentan un tipo de corrosión uniforme (determinado por sesgo y kurtosis), bajo estos parámetros de experimentación, el  $I_{corr}$  de todas las muestras, están en dos magnitudes  $10^{-6}$  Amp/cm<sup>2</sup> y  $10^{-7}$  Amp/cm<sup>2</sup>, la mayor y menor cinética de corrosión se definen por diferencias diminutas, siendo la superaleación 718 a 60° la que tiene la cinética de corrosión más alta, por otro lado, la superaleación 690 a 25° y 60° son la que cuenta con la más baja.

Actualmente no hay muchos trabajos en donde se estudie el comportamiento electroquímico de superaleaciones a baja temperatura, sin embargo, con base a los resultados de la densidad de corriente que son proporcional a la velocidad de corrosión, las

superaleaciones base níquel de la familia INCONEL 600, 690 y 700 que se estudiaron en este trabajo, demostraron tener una alta resistencia a la corrosión en baja temperatura.

Los resultados de este trabajo son semejantes a diversas investigaciones similares sobre otras aleaciones y superaleaciones, incluso en concentraciones más fuertes como es el caso de: J. M. Jáquez-Muñoz et al [69] que estudio superaleación base níquel y cobalto Waspaloy and Ultimet en un electrolito de NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en concentración de 3.5% a 25° y 60° obteniendo  $i_{corr}$  de magnitudes de E<sup>-6</sup> y E<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup>, igualmente, en el 2021 J. M. Jáquez-Muñoz et al[42] analizo diversas aleaciones de titanio en un electrolito de NaCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en concentración de 3.5% a temperatura ambiente obteniendo valores de  $i_{corr}$  en magnitudes de E<sup>-6</sup> y E<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup>, por otro lado, Gaona Tiburcio en el 2014,[67] comparo la resistencia de diferentes superaleaciones con aceros comerciales, en diferentes electrolitos en altos porcentajes de concentración obteniendo magnitudes de  $i_{corr}$  de entre E<sup>-6</sup> y E<sup>-8</sup> A/cm<sup>2</sup>.

---

## CAPITULO V: Conclusiones

---

- El uso de pruebas electroquímicas, como curvas de polarización cíclica y ruido electroquímico, proporciona una comprensión detallada y complementaria del comportamiento de corrosión de los materiales.
- La combinación de estos métodos no solo mejora la precisión en la caracterización de la corrosión, sino que también facilita una evaluación más profunda de los mecanismos subyacentes y el desarrollo de estrategias de mitigación más efectivas.
- Las curvas de polarización cíclica permiten evaluar la resistencia a la corrosión y la formación de películas pasivantes, ofreciendo una visión clara de las características electroquímicas de los materiales en condiciones variadas.
- El análisis de ruido electroquímico ofrece información sobre la estabilidad de las reacciones de corrosión y determinar el tipo de corrosión a las que el material es susceptible bajo condiciones específicas.
- De las CPC obtenemos que la muestra 718-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-60 presenta un E<sub>corr</sub> de -0.10919 V indicando una menor tendencia a la corrosión en comparación a las demás muestras, por otro lado, en presencia de cloruro de sodio es la superaleación 600 a 60° que indica menor tendencia a corroerse presentado un E<sub>corr</sub> de -0.31818
- Las superaleaciones en presencia de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> tienden a presentar una capa pasiva sobre la superficie del metal como vemos en las curvas.
- La mayoría de las superaleaciones presentan histéresis positiva, representativa de corrosión localizada, siendo las expuestas en NaCl las que presentan un área superficial mayor de histéresis.
- Gracias a los parámetros estadísticos de Índice de localización, sesgo y Kurtosis se confirma que la mayoría de las superaleaciones tiende a presentar corrosión localizada por picaduras.
- Las superaleaciones presentan una densidad de corriente bajas de E<sup>-6</sup> y E<sup>-7</sup> A/cm<sup>2</sup> indicando una gran resistencia a la corrosión bajo las condiciones trabajadas.

---

## Referencias

---

- [1] Arnold, S. M. 2012, “Materials Selection for Aerospace Systems”, National Aeronautics and Space Administration Glenn Research Center, Hanover, MD
- [2] Gialanella, S. & Malandrucolo, A. (2020). Aerospace Alloys. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering. doi:10.1007/978-3-030-24440-8
- [3] Mouritz, A. P. (2012) Introduction to Aerospace Materials. Woodhead Publishing
- [4] Benavides S. “Corrosion control in the aerospace industry us coast guard.” Woodhead publishing limited. UK. 2009.
- [5] Findlay, S.J. y Harrison, N.D. “Why aircraft fail.” Materials today vol. 5 no. 11.
- [6] Superalloys for gas turbine engines. (2012). Introduction to Aerospace Materials, 251–267. doi:10.1533/9780857095152.25
- [7] Mouritz, A. P. (2012), Aerospace materials: past, present, and future. (2012). Introduction to Aerospace Materials, 15–38. doi:10.1533/9780857095152.15
- [8] Rao- Muktinutalapati, N. (2011). Materials for Gas Turbines – An Overview. Advances in Gas Turbine Technology. doi:10.5772/20730
- [9] Grilli, M. L.; Valerini, D.; Slobozeanu, A. E.; Postolnyi, B. O.; Balos, S.; Rizzo, A. & Piticescu, R. R. (2021). Critical Raw Materials Saving by Protective Coatings under Extreme Conditions: A Review of Last Trends in Alloys and Coatings for Aerospace Engine Applications. Materials, 14(7), 1656. doi:10.3390/ma14071656
- [10] Davis, J.R. (2000). “Corrosion understanding the basics.” Eua: ASM international.
- [11] Revie, R. W. & Uhlig, H.H. “Corrosión and corrosión control” 4th edición, Wiley 2008
- [12] Hernán, A. (2018) “Análisis de Fallos en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevención”.
- [13] García, G.M. et al. Concentración de contaminantes SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y correlación con H<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. Rev. chil. enferm. respir. [online]. 2013, vol.29, n.2, pp.81-88. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-73482013000200004>.

- [14] Seinfeld, J.H. & Pandis, S.N. Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 1998.
- [15] Pantelakis, S., & Tserpes, K. (Eds.). (2020). Revolutionizing Aircraft Materials and Processes. doi:10.1007/978-3-030-35346-9
- [16] Parveez, B. et al. “Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review.” *Polymers* **2022**, *14*, 5007.  
<https://doi.org/10.3390/polym14225007>
- [17] Zhang, X.; Chen, Y. & Hu, J. (2018). Recent advances in the development of aerospace materials. *Progress in Aerospace Sciences*, *97*, 22–34. doi: 10.1016/j.paerosci.2018.01.001
- [18] Lopes, J.C. Material selection for aeronautical structural application. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2008, *20*, 78–82
- [19] Jayakrishna, K.; Kar, V. R.; Sultan, M. T. H. & Rajesh, M. (2018). Materials selection for aerospace components. *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, 1–18. doi:10.1016/b978-0-08-102131-6.00001-3
- [20] Soni, R.; Verma, R. & Garg, R. (2023) “A critical review of recent advances in the aerospace materials”, *materialstoday: proceedings*.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.108>
- [21] Parveez, B.; Kittur, M.I.; Badruddin, I.A.; Kamangar, S.; Hussien, M.; Umarfarooq, M.A. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. 2022; *14*(22):5007.  
<https://doi.org/10.3390/polym14225007>
- [22] Boyer, R.R.; Cotton, J.D.; Mohaghegh, M. & Schafrik, R.E. Materials considerations for aerospace applications. *MRS Bulletin* *40*, 1055–1066 (2015).  
<https://doi.org/10.1557/mrs.2015.278>
- [23] Otero-Marquez, J. (2015). Aleaciones metálicas en aplicaciones aeronáuticas. 10.13140/RG.2.1.4491.2485.
- [24] Jáquez-Muñoz, J.M.; Gaona-Tiburcio, C.; Méndez-Ramírez, C.T.; Baltazar-Zamora, M.Á.; Estupinán-López, F.; Bautista-Margulis, R.G.; Cuevas-Rodríguez, J.; Flores-De los Rios, J.P. & Almeraya-Calderón, F. Corrosion of Titanium

- Alloys Anodized Using Electrochemical Techniques. *Metals*. 2023; 13(3):476.  
<https://doi.org/10.3390/met13030476>
- [25] Díaz del Castillo, F. & Cárdenas, J. (2015). Lecturas para ingeniería no. 23 “Superaleaciones”. México: UNAM, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán
- [26] Special Metals Corporation, “INCONEL alloy 600”  
<https://www.specialmetals.com>
- [27] Special Metals Corporation, “INCONEL alloy 690”  
<https://www.specialmetals.com>
- [28] Special Metals Corporation, “INCONEL alloy 718”  
<https://www.specialmetals.com>
- [29] Benavides S. “corrosion control in the Aerospace industry.” Woodhead publishing limited. UK. 2009.
- [30] Davis, J.R., editor, 2000, Corrosion: Understanding the Basics, ASM Publication, USA.
- [31] Schweitzer, P.A. (2010), Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methods
- [32] McCafferty, E. (2010). Introduction to Corrosion Science. doi:10.1007/978-1-4419-0455-3
- [33] Harsimran, S.; Santosh, K. & Rakesh, K. “Overview of corrosion and its control: a critical review,” Proceedings on Engineering Sciences, 2021, 13–24, DOI: 10.24874/PES03.01.002.
- [34] Winston, R. (2008) “Corrosion and Corrosion Control an Introduction to Corrosion Science and Engineering”
- [35] Gaona-Tiburcio, C.; Zambrano-Robledo, P.; Martínez-Villafañe, A.; & Almeraya Calderón, F. Corrosión en la industria aeroespacial. En Valdez Salas B, & Schorr Wiener M (Eds.). Corrosión y preservación de la infraestructura industrial. Barcelona, España: OmniaScience; 2013. pp. 33-48.
- [36] Czaban, M. (2018) “aircraft corrosion – review of corrosion processes and its effects in selected cases” fatigue of aircraft structures (2018) pp. 5–20, DOI: 10.2478/fas-2018-0001

- [37] Charng, T., & Lansing, F. (1982). Review of corrosion causes and corrosion control in a technical facility (N--8230252). United States
- [38] Buchanan, R. A., & Stansbury, E. E. (2005). Electrochemical corrosion. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 81–103. doi:10.1016/b978-081551500-5.50007-0
- [39] Frankel, G. S. (2016). *Fundamentals of Corrosion Kinetics*. Springer Series in Materials Science, 17–32. doi:10.1007/978-94-017-7540-3\_2
- [40] Habashi, F. (1965). Kinetics of corrosion of metals. *Journal of Chemical Education*, 42(6), 318. doi:10.1021/ed042p318
- [41] Cottis, R. A. (2008). Electrochemical noise for corrosion monitoring. *Techniques for Corrosion Monitoring*, 86–110. doi:10.1533/9781845694050.1.86
- [42] Jáquez-Muñoz, J.M.; Gaona-Tiburcio, C.; Cabral-Miramontes, J.; Nieves-Mendoza, D.; Maldonado-Bandala, E.; Olguín-Coca, J.; López-Léon, L.D.; Flores-De los Rios, J.P. & Almeraya-Calderón, F. Electrochemical Noise Analysis of the Corrosion of Titanium Alloys in NaCl and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Solutions. *Metals*. 2021; 11(1):105. <https://doi.org/10.3390/met11010105>
- [43] Montesperelli, G. & Gusmano, G. (2011). Electrochemical noise for corrosion detection. *Corrosion Reviews*, 29(5-6). doi:10.1515/correv.2011.012
- [44] Cottis, R. A. (2001). Interpretation of Electrochemical Noise Data. *corrosion*, 57(3), 265–285. doi:10.5006/1.3290350
- [45] Malo-Tamayo, J. M. & Uruchurtu-Chavarín, J. “La técnica de ruido electroquímico para el estudio de la corrosión”, I jornada de técnicas electroquímicas, XVI congreso S.M.E. Querétaro, Querétaro 2001.
- [46] Cottis, R. & Turgoose, S. 1999. *Electrochemical Impedance and Noise. Corrosion Testing Made Easy*, (Syrett, B.C, Series Editor), NACE International, Houston, TX, 1999.
- [47] Aguilar, M. (2013) Caracterización electroquímica de superaleaciones base-níquel.
- [48] Jáquez-Muñoz, J.M. (2023) Estudio de la corrosión en aleaciones de titanio anodizadas en ambientes ácidos y alcalinos

- [49] Esmailzadeh, S.; Aliofkhazraei, M. & Sarlak, H. Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review. *Prot Met Phys Chem Surf* 54, 976–989 (2018).  
<https://doi.org/10.1134/S207020511805026X>
- [50] Tait, W. S. (2018). Electrochemical Corrosion Basics. *Handbook of Environmental Degradation of Materials*, 97–115. doi:10.1016/b978-0-323-52472-8.00005-8
- [51] Gonzalez, R. (2022) Electrochemical corrosion analysis of nickel-based superalloys
- [52] *ASM Handbook Volume 13 - Corrosion Fundamentals, Testing, And Protection*
- [53] Kelly, R. G.; Scully, J. R.; Shoesmith, D. & Buchheit, R. G. (2002). “Electrochemical techniques in corrosion science and engineering,” First Edition, CRC Press, BocaRaton, Florida, USA
- [54] Speight, J. G. (2015). Corrosion. *Subsea and Deepwater Oil and Gas Science and Technology*, 213–256. doi:10.1016/b978-1-85617-558-6.00008-8
- [55] He, Y. (2016). Corrosion Monitoring. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.03460-3
- [56] Agrawal, A. K. (2001). Corrosion Monitoring. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 1698–1701. doi:10.1016/b0-08-043152-6/00302-8
- [57] Walsh, F.; Ottewill, G. & Barker, D. (1993). Corrosión y Protección de Metales: II. Tipos de Corrosión y Métodos de Protección. *Transacciones del FMI*, 71(3), 117–120. doi:10.1080/00202967.1993.1187100
- [58] Zehra, S.; Mobin, M. & Aslam, R. “Corrosion prevention and protection methods,” in *Eco-Friendly Corrosion Inhibitors*, L. Guo, C. Verma and D. Zhang, Eds. Berlin, Germany: Elsevier, pp. 13-26, 2022
- [59] *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures*
- [60] *ASTM G199-9 Standard Guide for Electrochemical Noise Measurement*
- [61] *ASTM G61, Standard Test Method for Conducting Cyclic Potentiodynamic Polarization Measurements for Localized Corrosion Susceptible of Iron, Nickel or Cobalt-Based.*

- [62] ASTM G82 Standard Guide for Development and Use of a Galvanic Series for Predicting Galvanic Corrosion Performance
- [63] ASTM G102 Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements
- [64] Finšgar, M. (2013). Galvanic series of different stainless steels and copper- and aluminium-based materials in acid solutions. *Corrosion Science*, 68, 51–56. doi:10.1016/j.corsci.2012.10.032
- [65] Mouritz, A.P. (2012) *Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead Publishing
- [66] Estupiñán, L.F.; Tristancho R.J.L. & Almeraya C.F. (2010). Análisis de los transitorios en ruido electroquímico para aceros inoxidable que presentan corrosión por picaduras. *Scientia Et Technica*, XVII (46), 34-39.
- [67] Gaona-Tiburcio, C.; Aguilar, L.M.R.; Zambrano-Robledo, P.; Estupiñán-López, F.; Cabral-Miramontes, J.A.; Nieves-Mendoza, D. Castillo-González, E. & Almeraya-Calderón, F. Electrochemical Noise Analysis of Nickel Based Superalloys in Acid Solutions. *Int. J. Electrochem. Sci.* 2014, 9, 523–533
- [68] Soltis, J.; Krouse, D. P.; Laycock, N. J. & Zavadil, K. R. (2010). Automated processing of electrochemical current noise in the time domain: I. Simulated signal. *Corrosion Science*, 52(3), 838–847. doi: 10.1016/j.corsci.2009.11.007
- [69] Jáquez-Muñoz, J. M.; Gaona-Tiburcio, C.; Cabral, J. A.; Martínez-Aparicio, B. S.; Estupiñán-López, F.; Tristancho, J. L. & Almeraya-Calderón, F. (2019). Corrosion Behaviour of Superalloys-Based Ni and Co Employing Electrochemical Noise. *ECS Transactions*, 94(1), 19–26. doi:10.1149/09401.0019ecst